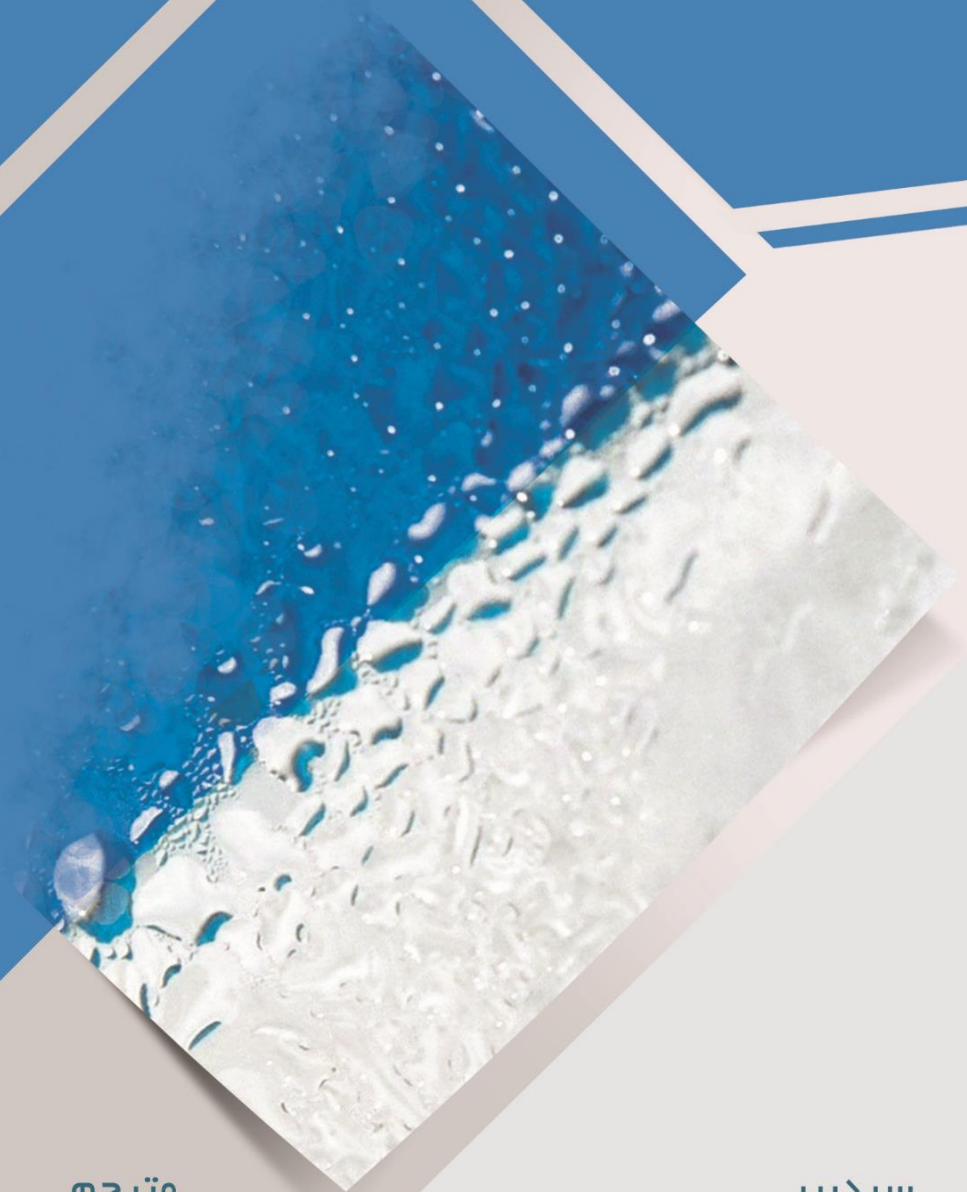
دانشگاه خلیج فارس

کتاب

راهنمای رطوبت گیری

ویراست دوم



سردبیر

لوییس جی هریمن سوم

مترجم

رضا میرزایی

روح‌اله فاتحی


بسم الله الرحمن الرحيم

کتاب راهنمای رطوبت‌گیری

ویراست دوم

مولف

لوییس جی هریمن سوم

مترجمان

مهندس رضا میرزایی

و

دکتر روح‌اله فاتحی

(عضو هیات علمی دانشگاه خلیج فارس)

بوشهر، ۱۳۹۷

انتشارات دانشگاه خلیج فارس

عنوان و نام پدیدآور	:	کتاب راهنمای رطوبت‌گیری / مولف[ویراستار] لوییس‌جی هریمن سوم؛ مترجمان رضا میرزایی روح‌اله فاتحی.
مشخصات نشر	:	بوشهر: دانشگاه خلیج‌فارس، انتشارات، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	:	۲۲۱ ص.: مصور(بخشی رنگی)، جدول(بخشی رنگی)، نمودار(بخشی رنگی).
شابک	:	978-600-7544-24-2
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	عنوان اصلی: The dehumidification handbook
یادداشت	:	واژه نامه .
موضوع	:	رطوبت هوا -- کنترل -- دستنامه‌ها
موضوع	:	Humidity -- Control -- Handbooks, manuals, etc.
شناسه افزوده	:	هریمن، لوئیس جی.، ۱۹۴۹ - م.
شناسه افزوده	:	Harriman, Lewis G, ۱۹۴۹-
شناسه افزوده	:	میرزایی، رضا، ۱۳۶۸-
شناسه افزوده	:	فاتحی، روح‌الله، مترجم
شناسه افزوده	:	دانشگاه خلیج فارس
رده بندی کنگره	:	۱۳۹۷ ۲ک/TH۶۰۲۵
رده بندی دیویی	:	۶۹۷/۹۳۲۳
شماره کتابشناسی ملی	:	۵۳۷۰۵۹۱

کتاب راهنمای رطوبت‌گیری (ویراست دوم)

مولف: لوییس جی هریمن سوم

مترجمان: رضا میرزایی و روح‌اله فاتحی

ویراستار: رضا میرزایی

طراح جلد: سید علی جعفری

ناشر: دانشگاه خلیج فارس

نوبت چاپ: اول

محل و سال چاپ: بوشهر، ۱۳۹۷

شمارگان : ۱۰۰۰ نسخه

قطع: رحلی

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۵۴۴-۲۴-۲

کلیهٔ حقوق این اثر برای مترجمان و دانشگاه خلیج فارس محفوظ است.

نشانی: بوشهر-خیابان خلیج فارس، دانشگاه خلیج فارس، کتابخانه مرکزی، انتشارات دانشگاه خلیج فارس ،کدپستی:۷۵۱۶۹۱۳۸۱۷- تلفن : ۰۷۷۳۱۲۲۲۰۷۷

رایانامه: press@pgu.ac.ir

گروه نویسندگان

لوییس جی هریمن سوم؛ ویراستار، سردبیر تیم مشاوره سال ۱۹۸۹

انو آبل

استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی چالمرز، گوتبورگ، سوئد

نیک برانوف

مدیر اجرایی فنی، مهندسی مکانیک، گلاکسو، استیونایته، بریتانیا

بروس بونر

رئیس شرکت سیستم‌های بونر، چلمسفورد، آمریکا

استیون بریکلی

مدیر تحقیق و توسعه، بخش رطوبت‌سازان مانترز، آمسبری، آمریکا

لوئیز فلیپ دی کاروالیو

استاد بازنشسته تکنولوژی حرارتی، دانشگاه ریو دو ژانیرو، ریو دو ژانیرو، برزیل

داگلاس کوسار

مدیر ارشد پروژه، تکنولوژی دسیکنت، موسسه فناوری گاز، شیکاگو، آمریکا

هانس کروگر

مدیر کل موسسه مانترز مکزیک

رالف لاهمون

معماری و خدمات مهندسی، ایستمن کداک، روچستر، آمریکا

میلتون مکلر

رئیس گروه مکلر، ونتورا، آمریکا

محمد مولدینا

ارشد مهندس فرآیند، کمیسیون انرژی اتمی کانادا، میسی ساگا، کانادا

تری پنی

مدیر بخش تحقیقات ساختمان، آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر، گلدن، کلرادو، آمریکا

یوجینو ای. سانچز

مدیریت مهندسی، مشاوران میداس، کاراکاس، ونزوئلا

دانیل شرودر

برنامه حفاظت از حمل و نقل هوایی و دریایی، انبار نیروی هوایی و نیروی دریایی ایالات متحده، سن دیگو، آمریکا

جیمز استونتون

مهندسی فرآیندهای ماشینی، استمن کداک، روچستر، آمریکا

استیون توث

مهندس ارشد مکانیک شرکت داروسازی مایلز، الخارت، آمریکا

کنت ولتر

مهندس ارشد مکانیک، بنیانگذار سوپر مارکت‌های ایست و خرید، بوستون، آمریکا

سامنر وایزمن

مدیر مهندسی نرم افزار، ابزارهای عمومی شرقی ,ووبورن، آمریکا

رولاند ویمرستت

استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه لوند، لوند، سوئد

خوزه زولوتا

مدیر پروژه مهندسی مکانیک شرکت داروسازی فیزر، نیویورک، آمریکا

فهرست مطالب

پیش‌گفتار مترجمان ۱۰

واژه‌نامه ۱۲

۱ مقدمه ۱۵

۲ سایکرومتری ۱۷

۲-۱ دمای حباب خشک (درجه فارنهایت) ۱۹

۲-۲ رطوبت نسبی (درصد اشباع) ۱۹

۲-۳ نسبت رطوبت (گرین بخار آب بر پوند هوا) ۲۰

۲-۴ فشار بخار (اینچ جیوه) ۲۰

۲-۵ دمای نقطه شبنم (درجه فارنهایت) ۲۱

۲-۶ آنتالپی (Btu در یک پوند هوا) ۲۲

۲-۷ دمای حباب تر (درجه فارنهایت) ۲۲

۲-۸ مراجع بیشتر ۲۳

۳ روش‌های رطوبت‌گیری ۲۴

۳-۱ رطوبت‌گیری سرمایشی ۲۵

۳-۲ رطوبت‌گیرهای دسیکنت ۲۹

۳-۲-۱ برج اسپری مایع ۳۲

۳-۲-۲ برج جامد فشرده ۳۳

۳-۲-۳ بستر افقی چرخان ۳۶

۳-۲-۴ بستر قائم چندگانه ۳۷

۳-۲-۵ شانه زنبوری چرخان ۳۸

۳-۳ مقایسه رطوبت‌گیرهای دسیکنت ۳۹

۳-۳-۱ هزینه نصب و راه‌اندازی ۳۹

۳-۳-۲ هزینه بهره‌برداری ۴۰

۳-۳-۳ قابلیت اطمینان عملیاتی موجود ۴۰

۳-۳-۴ فرض‌های طراحی ۴۰

۴-۳ انتخاب بین رطوبت‌گیرهای سرمایشی و دسیکنت ۴۱
۴ کاربردها ۴۳
۴-۱ جلوگیری از خوردگی ۴۴
۴-۱-۱ انبار تجهیزات نظامی ۴۵
۴-۱-۲ حفاظت از قطعات الکترونیکی ۴۵
۴-۱-۳ لی‌آپ نیروگاه‌ها ۴۵
۴-۱-۴ تولید باتری‌های لیتیمی ۴۵
۴-۲ جلوگیری از چگالش ۴۶
۴-۲-۱ میدان‌های یخ‌بازی ۴۷
۴-۲-۲ ایستگاه‌های تصفیه آب ۴۷
۴-۲-۳ آماده‌سازی و پوشش‌دهی سطح ۴۷
۴-۲-۴ قالب‌گیری تزریقی ۴۷
۴-۳ جلوگیری از رشد قارچ‌ها ۴۸
۴-۳-۱ انبارهای بایگانی ۴۹
۴-۳-۲ ذخیره‌سازی بذرها ۴۹
۴-۳-۳ حفاظت از محموله کشتی‌ها ۴۹
۴-۳-۴ تولید آبجو ۴۹
۴-۴ جلوگیری از جذب مجدد رطوبت ۵۰
۴-۴-۱ بسته‌بندی آب‌نبات ۵۱
۴-۴-۲ اتاق‌های تمیز داروسازی و نیمه هادی‌ها ۵۱
۴-۴-۳ لایه‌بندی شیشه‌های ایمنی ۵۱
۴-۴-۴ تولید مواد مرکب ۵۱
۴-۵ خشک کردن محصول ۵۲
۴-۵-۱ ریخته‌گری دقیق ۵۳
۴-۵-۲ خشک‌کردن رزین‌های پلاستیکی ۵۳
۴-۵-۳ پوشش‌دهی آب‌نبات‌ها ۵۳
۴-۵-۴ خشک‌کردن ماهی ۵۳
۴-۶ سرمایش خشک ۵۴

۴-۶-۱ سوپرمارکت‌ها ۵۵
۴-۶-۲ هتل‌ها و متل‌ها ۵۵
۴-۶-۳ ساختمان‌های بهداشتی-درمانی ۵۵
۴-۶-۴ سامانه‌های HVAC پیشرفته ۵۵
۵ محاسبات بارهای رطوبی ۵۷
۵-۱ انتخاب شرایط طراحی ۵۸
۵-۲ منابع بارهای رطوبی ۵۹
۵-۲-۱ نفوذ رطوبت ۶۰
۵-۲-۲ رطوبت محصولات و بسته‌بندی ۶۳
۵-۲-۳ رطوبت افراد و کارکنان ۶۵
۵-۲-۴ رطوبت ناشی از احتراق ۶۶
۵-۲-۵ رطوبت تبخیر شده از سطوح مرطوب ۶۶
۵-۲-۶ رطوبت ناشی از نشت هوا از سوراخ‌ها و حفره‌ها ۶۸
۵-۲-۷ بارهای رطوبی متناوب و پیوسته ۷۴
۵-۲-۸ بار رطوبی هوای تازه ۷۴
۵-۳ محاسبات نمونه بار رطوبی ۷۷
۵-۳-۱ رطوبت‌گیری انبار ۷۷
۵-۳-۲ اتاق تولید شیشه‌های چند لایه ۸۲
۵-۴ منابع ۸۶
۶ عملکرد رطوبت‌گیر دسیکنت ۸۷
۶-۱ متغیرهای عملیاتی ۸۸
۶-۱-۱ رطوبت ورودی هوای فرآیندی ۹۰
۶-۱-۲ دمای هوای فرآیندی ورودی ۹۰
۶-۱-۳ سرعت هوا در قسمت فرآیندی ۹۱
۶-۱-۴ دمای هوای ورودی به احیا ۹۲
۶-۱-۵ رطوبت هوای ورودی به احیا ۹۳
۶-۱-۶ سرعت هوا در فرآیند احیا ۹۴
۶-۱-۷ مقدار دسیکنت قرار داده شده در معرض جریان هوا ۹۶

۶-۱-۸ مشخصات جذب و دفع دسیکنت ۹۷
۷ طراحی سامانه ۱۰۱
۷-۱ انبارهای غیر فعال – مثال یک موزه ۱۰۴
۷-۱-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه ۱۰۴
۷-۱-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن ۱۰۴
۷-۱-۳ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی ۱۰۵
۷-۱-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار رطوبی ۱۰۶
۷-۱-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی ۱۰۶
۷-۱-۶ ملاحظات دیگر ۱۰۷
۷-۱-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک موزه ۱۰۸
۷-۲ انبارهای غیر فعال – مثال تجهیزات نظامی ۱۰۹
۷-۲-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه ۱۰۹
۷-۲-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن ۱۰۹
۷-۲-۳ گام سوم- محاسبات بارهای رطوبی ۱۱۰
۷-۲-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار رطوبی ۱۱۱
۷-۲-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی ۱۱۲
۷-۲-۶ ملاحظات دیگر ۱۱۲
۷-۲-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک انبار تجهیزات نظامی ۱۱۳
۷-۳ انبارهای فعال- مثال سردخانه ۱۱۴
۷-۳-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه ۱۱۴
۷-۳-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن ۱۱۴
۷-۳-۳ گام سوم- محاسبه بارهای رطوبی و حرارتی ۱۱۶
۷-۳-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار رطوبی ۱۱۸
۷-۳-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی ۱۲۰
۷-۳-۶ ملاحظات دیگر ۱۲۱
۷-۳-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک انبار تجهیزات ۱۲۱
۷-۴ سامانه‌های HVAC تجاری- مثال سوپرمارکت ۱۲۳
۷-۴-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه ۱۲۳

۷-۴-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن ۱۲۳
۷-۴-۳ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی ۱۲۳
۷-۴-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار های رطوبی و حرارتی ۱۲۶
۷-۴-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی ۱۲۹
۷-۴-۶ ملاحظات دیگر ۱۳۱
۷-۴-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک انبار تجهیزات ۱۳۱
۷-۵ سامانه‌های HVAC صنعتی- مثال تولید قرص‌های دارویی ۱۳۲
۷-۵-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه ۱۳۲
۷-۵-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن ۱۳۲
۷-۵-۳ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی ۱۳۳
۷-۵-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بارهای رطوبی و حرارتی ۱۳۴
۷-۵-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی ۱۳۹
۷-۵-۶ ملاحظات دیگر ۱۴۰
۷-۵-۷ منابع-ساختمان‌های صنعتی ۱۴۱
۷-۶ خشک‌کردن محصولات-مثال پوشش‌دهی شیرینی ۱۴۲
۷-۶-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه ۱۴۲
۷-۶-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن ۱۴۲
۷-۶-۳ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی ۱۴۳
۷-۶-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار های رطوبی و حرارتی ۱۴۵
۷-۶-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی ۱۴۷
۷-۶-۶ ملاحظات دیگر ۱۴۹
۷-۶-۷ منابع – سامانه‌های خشک‌کننده محصولات ۱۵۰
۸ بهینه‌سازی سامانه‌های ترکیبی ۱۵۲
۸-۱ تشریح مثال نمونه ۱۵۳
۸-۱-۱ سامانه ۱- فقط خشک کردن هوای جبرانی ۱۵۴
۸-۱-۲ سامانه ۲- پیش‌سرد کردن هوای جبرانی و رطوبت‌گیری هوای مخلوط‌شده ۱۵۴
۸-۱-۳ سامانه ۳- پیش‌سرد کردن هوای مخلوط‌شده قبل از ورود به رطوبت‌گیر ۱۵۶
۸-۱-۴ سامانه ۴-گرفتن تمام بار رطوبی با استفاده از رطوبت‌گیر و بدون انجام پیش‌سرمایش ۱۵۷

۸-۲ مقایسه جایگزین‌ها ۱۵۹
۹ تجهیزات اندازه‌گیری رطوبت ۱۶۳
۹-۱ انواع اندازه‌گیری ۱۶۴
۹-۲ چرخه کار و محیط کاری ۱۶۵
۹-۳ کاربردهای تجهیزات ۱۶۶
۹-۴ تکرارپذیری و دقت ۱۶۷
۹-۵ حسگر رطوبت نسبی ۱۶۸
۹-۵-۱ رطوبت‌سنج انبساط مکانیکی ۱۶۸
۹-۵-۲ رطوبت‌سنج انبساط الکتریکی ۱۶۹
۹-۵-۳ حسگر ظرفیت خازنی الکترونیکی ۱۶۹
۹-۵-۴ حسگرهای مقاومتی الکترونیکی ۱۷۰
۹-۵-۵ ابزارهای سایکرومتری ۱۷۰
۹-۶ حسگرهای رطوبت مطلق ۱۷۱
۹-۶-۱ ترن گراویمتری ۱۷۲
۹-۶-۲ رطوبت‌سنج چگالشی ۱۷۲
۹-۶-۳ حسگرهای آلومینیم‌اکسید ۱۷۳
۹-۶-۴ حسگرهای تعادل نمک ۱۷۴
۹-۶-۵ رطوبت‌سنج الکترولیتی ۱۷۴
۹-۷ حسگرهای رطوبت مواد ۱۷۶
۹-۷-۱ تیتراسیون کولنی کارل فیشر ۱۷۶
۹-۷-۲ جذب امواج فروسرخ ۱۷۶
۹-۷-۳ گیرنده‌های رطوبت تعادلی ۱۷۷
۹-۷-۴ حسگرهای رطوبت مقاومتی ۱۷۸
۹-۷-۵ جذب مایکروویو ۱۷۸
۹-۷-۶ حسگرهای فرکانس رادیویی ۱۷۹
۹-۸ ملاحظات کلی ۱۸۱
۹-۸-۱ نصب حسگر ۱۸۱
۹-۸-۲ اندازه‌گیری رطوبت در رطوبت نسبی کمتر از ٪۱۰ ..... ۱۸۱

۹-۸-۳ محفظه‌های محیطی ۱۸۲
۹-۹ منابع ۱۸۲
۱۰ کمینه کردن هزینه‌ها و حداکثر کردن مزایا ۱۸۳
۱۰-۱ شناسایی و تعیین مزایای اقتصادی ۱۸۴
۱۰-۱-۱ کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ۱۸۴
۱۰-۱-۲ کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری ۱۸۶
۱۰-۱-۳ افزایش سود از طریق بهبود کیفیت ۱۸۸
۱۰-۱-۴ بهبود واکنش‌های عملیاتی ۱۸۹
۱۰-۲ کمینه کردن هزینه‌ها ۱۹۰
۱۰-۲-۱ کمینه کردن هزینه اولیه ۱۹۰
۱۰-۲-۲ کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری ۱۹۲
۱۰-۳ خلاصه ۱۹۷
۱۱ پیوست ۲۰۰

پیش‌گفتار مترجمان

رطوبت هوا یکی از عوامل مؤثر بر کیفیت زندگی و آسایش انسان در ساختمان‌های مسکونی و مانند آن است. همچنین بر کیفیت برخی از محصولات غذایی و صنعتی و دوام آن‌ها تأثیرگذار است. اهمیت این امر در مناطقی که رطوبت هوای محیط بیشتر است (مانند نوار ساحلی شمال و جنوب کشور) دوچندان می‌شود. متأسفانه، در کشور ما، در هنگام طراحی تأسیسات ساختمان‌های مسکونی و صنعتی، توجه ویژه‌ای به رطوبت هوا نمی‌شود و معمولا رطوبت‌گیری به عنوان یک وظیفه جانبی بر عهده سامانه تهویه مطبوع (آن هم تنها در تابستان) گذاشته می‌شود. با توجه به روند افزایش کیفیت زندگی و اهمیت بیشتر کیفیت محصولات صنعتی، به نظر می‌رسد که توجه به کنترل رطوبت هوا نیز رو به افزایش است.

کتاب حاضر ترجمه ویراست دوم کتاب The Dehumidification Handbook چاپ ۲۰۰۲ میلادی است که در شرکت مانترز[1] توسط هیأتی تحت نظر لوییس جی هاریمن سوم[2] نوشته شده است. وی متولد ۱۹۴۹ و عضو پیوسته جامعه مهندسی گرمایش، تهویه مطبوع و تبرید آمریکا[3] است و برای این جامعه راهنمای ساختمان‌های اقلیم گرم و مرطوب را نیز تألیف کرده‌است. وی هم اکنون در شرکت مشاوره میسون-گرنت[4] در آمریکا مشغول به کار است.

ویراست اول کتاب در ۱۹۸۲ توسط شرکت مهندسی کارگوکک ایر[5] منتشر شد. این شرکت بعدا توسط شرکت مانترز تصاحب شد و هم اکنون به عنوان بخش رطوبت‌گیری این شرکت شناخته می‌شود. تا ۱۹۸۹ ویراست اول ۷ بار چاپ شد. در آن سال، ویراست دوم به چاپ رسید که گسترش چشم‌گیری نسبت به ویراست اول داشت. تا سال ۲۰۰۲ نیز ویراست دوم ۳ بار به چاپ رسیده است. از آن سال تاکنون، چاپ جدیدی ارائه نشده است. از این رو، نسخه آخر کتاب، همین نسخه پیش روی شماست که توسط شرکت مانترز به روی اینترنت قرار داده شده است.

عنوان کتاب، کتاب راهنما است. با این حال، بر خلاف سایر کتاب‌های راهنما می‌توان از آن به عنوان یک کتاب آموزشی نیز بهره برد. در انتخاب این کتاب، افزون بر اهمیت موضوع و کاربرد آن در کشور، متن ساده و روان آن نیز موثر بود. کتاب به زبانی بی‌تکلف نوشته شده و در آن تا حد امکان از روابط ریاضی پیچیده پرهیز شده است. همین مطلب آن را برای طیف وسیعی از خوانندگان قابل استفاده کرده است؛ از جمله مهندسین، تکنسین‌ها و دانشجویان رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی و تأسیسات ساختمان. این کتاب، علاوه بر مبانی و محاسبات، شامل نکته‌های ریز مهندسی نیز هست که از تجربه هیأت نویسندگان در پروژه‌های متعدد به دست آمده است. به ویژه مثال‌های عملی که در فصل هفتم توضیح داده شده است، شامل نکات ریز مهندسی است که برای مهندسان حتی در مواردی جز رطوبت‌گیری نیز مفید و الهام‌بخش است. همچنین، این کتاب مرور جامعی بر وسایل و روش‌های اندازه‌گیری رطوبت دارد که در نوع خود کمتر دیده می‌شود.

در ترجمه کتاب سعی کرده‌ایم تا حد امکان به متن وفادار باشیم. اما در مواردی نیز، روان بودن متن فارسی بر وفاداری به متن

---

[1] Munters
[2] Lewis G. Harriman III
[3] American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE)
[4] Mason-Grant Consulting
[5] Cargocaire

انگلیسی ترجیح داده شد. واحدهای نسخه اصلی انگلیسی است که با وجود رواج واحدهای SI در دوره کنونی، به خاطر حفظ امانت، در ترجمه نیز عینا آورده شده است. مورد دیگری که در این ترجمه دیده می‌شود، نبود اشاره به همه شکل‌ها و جدول‌ها در متن است. این نقیصه نیز به نسخه انگلیسی کتاب برمی‌گردد که برخی از قاعده‌های پذیرفته شده متون فنی در آن رعایت نشده است. از همین قبیل، می‌توان به نداشتن توضیح برای برخی از شکل‌ها و نبود ارجاع مستقیم به منابع مورد استفاده در متن اشاره کرد.

در پایان، ضمن سپاس از خوانندگان محترم، از هرگونه پیشنهاد و انتقاد در مورد این کتاب استقبال می‌کنیم. مطالب خود را می‌توانید به آدرس fatehi@pgu.ac.ir بفرستید.

روح‌اله فاتحی رضا میرزایی

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

اختلاف فشار	Pressure difference
انبار غیر فعال	Passive storage
انبار فعال	Active storage
اواپراتور	Evaporator
اینچ جیوه	Inches of mercury
آب خنک	Chilled water
آبسردکن	Water cooler
آنتالپی	Enthalpy
بار رطوبی	Moisture load
بار رطوبی داخلی	Internal moisture load
بارهای پیوسته	Continuous loads
بارهای متناوب	Periodic loads
برج اسپری مایع	Liquid spray-tower
برج جامد فشرده	Solid packed tower
برفک	Frost
برفک‌زدایی	Defrost
بستر افقی چرخان	Rotating horizontal bed
بستر قائم چندگانه	Multiple vertical bed
پمپ رطوبت	Humidity pump
پوشش پلاستیکی	Plastic strip
پوشش‌دهی	Coating
پیش-سرمایش	Pre-cooling
تبخیر	Evaporation
تجهیزات رطوبت‌گیری	Dehumidification equipment
تکرارپذیری	Repeatability
تنظیم انرژی	Energy modulation
تهویه مطبوع	Air conditioning
تیتراسیون کولنی	Coulombic titration
ثبت‌کننده	Recorder

جاذب سطحی	Adsorbents
جریان هوا	Airflow
جریان هوای برگشتی	Return airflow
چرخ چرخان	Rotating wheel
چرخ دسیکنت	Desiccant wheel
چرخش هوا	Air circulation
چرخه جذب و دفع	Adsorption-desorption cycle
چرخه کار	Duty Cycle
چگالش	Condensation
چگالی هوا	Air density
چیلر	Chiller
حسگر	Sensor
حسگر امواج رادیویی	Radio frequency sensor
حسگر تعادل نمک	Salt equilibrium sensor
حسگر ظرفیت خازنی	Capacitance sensor
حسگر مقاومتی	Resistive sensor
حسگرهای رطوبت مطلق	Absolute Humidity Sensors
خوردگی	Corrosion
دالان هوابند	Air lock vestibules
دسیکنت	Sesiccant
دسیکنت‌های جامد	Solid desiccants
دسیکنت‌های دانه‌ای	Granular desiccant
دقت	Accuracy
دما	Temperature
دماسنج	Thermometer
دمای احیا	Reactivation temperature
دمای حباب تر	Wet-bulb temperature
دمای حباب خشک	Dry Bulb Temperature
دمای محسوس	Sensible temperature
دمای نقطه شبنم	Dew point temperature
دمپرهای جریان هوا	Airflow dampers
رزین‌های پلاستیکی	Plastic resins
رطوبت	Humidity

Moisture	رطوبت
Absolute moisture	رطوبت مطلق
Relative humidity	رطوبت نسبی
Specific humidity	رطوبت ویژه
Hygrometer	رطوبت‌سنج
Electrolytic hygrometer	رطوبت‌سنج الکترولیتی
Mechanical expansion hygrometer	رطوبت‌سنج انبساط مکانیکی
Aspirated psychrometer	رطوبت‌سنج تنفسی
Condensation-based hygrometer	رطوبت‌سنج چگالشی
Sling psychrometer	رطوبت‌سنج زنجیره‌ای
Dehumidifier	رطوبت گیر
Hygroscopic	رطوبت گیر
Sesiccant dehumidifier	رطوبت گیر دسیکنت
Cooling dehumidifiers	رطوبت گیرهای سرمایشی
Dehumidification	رطوبت گیری
Warehouse dehumidification	رطوبت گیری انبار
Epoxy paint	رنگ اپوکسی
Vapor-retarder paint	رنگ عایق بخار
Response time	زمان پاسخ
Air distribution system	سامانه توزیع هوا
Cogeneration system	سامانه تولید همزمان
Central system	سامانه مرکزی
Refrigeration systems	سامانه‌های تبرید
Residential air conditioner	سامانه‌های تهویه خانگی
Cooling-based dehumidification systems	سامانه‌های رطوبت گیری سرمایشی
Heating and air conditioning systems	سامانه‌های گرمایش و تهویه مطبوع
Psychrometrics	سایکرومتری
Direct expansion cooling	سرمایش انبساط مستقیم
Post-cooling	سرمایش ثانویه
Chilled liquid cooling	سرمایش مایع خنک‌کننده
Control level and tolerance	سطح کنترل و تلرانس
Moist surface	سطح مرطوب
Humidity control level	سطح کنترل رطوبت
Rotating Honeycombe	شانه زنبوری چرخان
Peak conditions	شرایط اوج
Comfort condition	شرایط آسایش
Optimum condition	شرایط بهینه
Outside condition	شرایط خارجی
Internal condition	شرایط داخلی
Part-load conditions	شرایط نیمه-بار
Inlet conditions	شرایط ورودی
Permeance factor	ضریب نفوذ
Desiccant capacity	ظرفیت دسیکنت
Moisture removal capacity	ظرفیت رطوبت‌گیری
Refrigeration system capacity	ظرفیت سامانه تبرید
Absorbent	عامل جاذب
Vapor barrier	عایق بخار
Moisture removal performance	عملکرد دفع رطوبت
Pressure	فشار
Vapor pressure	فشار بخار
Positive pressure	فشار مثبت
Ambient pressure	فشار محیطی
Negative pressure	فشار منفی
Loading dock	فضای بارگیری
Controlled space	فضای کنترل شده
Operational reliability	قابلیت اطمینان عملیاتی
Injection molding	قالب‌گیری تزریقی
Calibration	کالیبره کردن
Recalibration	کالیبره کردن مجدد
Ductwork	کانال
Compressor	کمپرسور
Reactivation energy control	کنترل انرژی احیا
Humidity control	کنترل رطوبت
Controller	کنترل‌کننده

Condenser	کندانسور
Coil	کویل
Cooling coil	کویل سرمایش
Indoor air quality	کیفیت هوای داخل
Refrigerant gas	گاز مبرد
Sensible heat	گرمای محسوس
Latent heat	گرمای نهان
Post-heating	گرمایش ثانویه
Reheat	گرمایش مجدد
Grains of water vapor	گرین بخار آب
Air boundary layer	لایه مرزی هوا
Thermal stratification	لایه‌بندی گرمایی
Fresh air intake	مجرای مکش هوای تازه
Moisture content	محتوای رطوبت
Outlet moisture content	محتوای رطوبت خروجی
Surrounding environment	محیط اطراف
Operating Environment	محیط کاری
Moist environments	محیط‌های مرطوب
Ice storage	مخزن یخ
Mixture	مخلوط
Bypass	مسیر کنارگذر
Saturation curve	منحنی اشباع
Humidity Ratio	نسبت رطوبت
Sensible heat ratio (SHR)	نسبت گرمای محسوس
Air leakage	نشت هوا
Installation	نصب و راه‌اندازی
Permeation	نفوذ
Equilibrium point	نقطه تعادل
Indicator	نمایشگر
Equilibrium diagram	نمودار تعادل
Psychrometric chart	نمودار سایکرومتری
Vapor-retarder tape	نوار عایق بخار
Conveyor	نوار نقاله

Installed cost	هزینه نصب و راه‌اندازی
Operating costs	هزینه‌های بهره‌برداری
Capital investments	هزینه‌های سرمایه‌گذاری
Air washer	هواشو
Reactivation air	هوای احیا
Surrounding air	هوای اطراف
Fresh air	هوای تازه
Make-up air	هوای جبرانی
Leaving air	هوای خروجی
Dehumidified air	هوای رطوبت‌گیری شده
Process air	هوای فرآیندی
Blended air	هوای مخلوط‌شده
Moist air	هوای مرطوب
Entering air	هوای ورودی
Reactivation heater	هیتر احیا
Humidistat	هیومیدیستات
Refrigerated display cases	یخچال‌های ویترینی

۱ مقدمه

این کتاب راهنما به توضیح این می‌پردازد که چرا و چگونه باید هوا را رطوبت‌گیری کرد و برای مهندسانی نوشته شده است که درکی اولیه از سامانه‌های سرمایش و گرمایش ساختمان دارند و یا کسانی که از ساختمان یا فرآیندی بهره‌برداری می‌کنند که تحت تأثیر رطوبت اتمسفری قرار دارد.

فرض بر این است که خواننده به فناوری علاقه‌مند است و برای رسیدن به سود اقتصادی به آن نیاز دارد. همچنین فرض می‌شود که خواننده به کاربردهای خاص از جمله تئوری رطوبت‌گیری علاقه دارد. این فرضیات نویسنده کتاب را ملزم می‌کند که تعادلی بین دقت و شفافیت ایجاد کند. از سویی باید جزییاتی ذکر شود که حالت‌های خاص را نشان دهد و از سوی دیگر جزییاتی که نمایان‌گر کلیت و اصول انتزاعی باشد.

بخشی از اطلاعات موجود در اینجا از منابع دیگری که با موضوع رطوبت‌گیری سر وکار دارند، جمع‌آوری شده است. جامعه مهندسی گرمایش، تهویه مطبوع و تبرید آمریکا[1] اطلاعات مفیدی را در مجموعه کتاب‌های راهنمای خود فراهم آورده است. افزون بر این، بسیاری از صنایع اطلاعاتی تهیه کرده‌اند که می‌تواند یاری‌گر مهندس رطوبت‌گیری شاغل در سایر زمینه‌ها باشد.

منبع اولیه اطلاعات تجربه‌های جمع‌آوری شده از صدها مهندسی است که روزانه با مسائل رطوبت‌گیری و کنترل رطوبت درگیر هستند. این افراد سخاوتمندانه تجربیاتشان را در فهم فناوری رطوبت‌گیری که به سختی و با صرف زمان به دست آمده است، ارائه کرده‌اند. آنان هر روز باید بین میل به عملکرد بهینه تئوری سامانه و محدودیت اطلاعات، زمان و بودجه موجود، موازنه برقرار کنند. مثال‌های طراحی سامانه ساختگی هستند، ولی موارد و نکات ذکر شده در این مثال‌ها همگی در واقعیت نیز اتفاق افتاده است.

در چند سال گذشته فناوری رطوبت‌گیری از میراث صنعتی‌اش بیرون آمده و نقشی موثر و رو به پیشرفت در سامانه‌های تجاری و اداری گرمایش و سرمایش ساختمان پیدا کرده است. زمینه کلی این مبحث سریعا در حال تغییر است. محدودکردن اطلاعات این کتاب به اطلاعات قابل فهم کنونی و کاربردهای گسترده در زمان انتشار کتاب تصمیمی دشوار است؛ زیرا در چند سال آینده کاربردها و طراحی‌های جدید بسیاری ایجاد خواهد شد.

بدون شک برخی از کاربردهای رطوبت‌گیری در این کتاب راهنما آورده نشده است که دلیل آن یا عدم آگاهی از آن‌ها و یا عدم احساس نیاز به توضیح آن‌ها در اینجا بوده است. بابت این از

[1] American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE)

قلم افتادگی‌ها لازم است که عذرخواهی کنیم. سردبیر و نویسندگان امیدوارند که خواننده از روی لطف، ناشر را از تجارب و دانش خود در این زمینه آگاه کند که در این صورت نسخه‌های بعدی این کتاب راهنما بسیار مفیدتر خواهند بود.

۲ سایکرومتری

آشنایی با خواص و رفتار هوای مرطوب، که دانش سایکرومتری نام دارد، برای کنترل رطوبت امری ضروری است. اگرچه فهم عمیق ترمودینامیک هوای مرطوب ضروری نیست، اما به درک عباراتی که در این حرفه بکار می‌رود و نیز مفاهیم لازم در طراحی سامانه‌ها، کمک می‌کند.

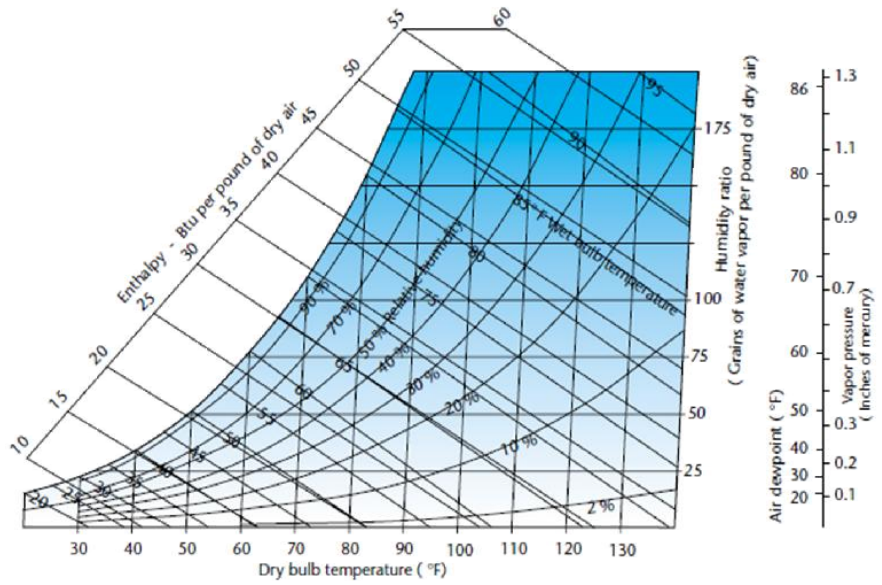
عبارات و روابط سایکرومتری به طور مفصل در کتاب راهنمای اصول پایه ارائه شده توسط جامعه مهندسی گرمایش، تهویه مطبوع و تبرید آمریکا (ASHRAE) توضیح داده شده‌اند. در صورتی که مهندسی نیاز دارد که همه جوانب سایکرومتری را مد نظر قرار دهد، کتاب راهنمای ذکر شده مرجع بسیار خوبی است.

در این فصل، مخلوط آب و هوا در همه دماها و فشارها با دقت کامل مورد توجه قرار نمی‌گیرند. فرض می‌کنیم که طراح در فشار هوای سطح دریا و با مخلوط آب و هوا در محدوده دمایی ۲۰- تا $۱۰۰^{o}F$ کار می‌کند. مطالب این فصل به توضیح ساده‌ای از عبارات پایه می‌پردازد و نشان می‌دهد که چگونه جداول و نمودارها به درک الگوی کلی دینامیک هوای مرطوب کمک می‌کنند.

در اوایل قرن بیستم، مهندسی آلمانی به نام ریچارد مولیر[1] روشی ترسیمی برای نمایش خواص مخلوط‌های مختلف هوا و بخار آب ایجاد کرد. این راهکار در کشورهای مختلف اسامی متفاوتی چون نمودار i-x، نمودار مولیر و یا نمودار سایکرومتری دارد، اما همه این اسامی به نموداری واحد اشاره دارد.

در نگاه اول این نمودار گیج کننده به نظر می‌رسد. چرا که اطلاعات زیادی را در فضایی کوچک نمایش می‌دهد. اما هنگامی‌که اصول پایه فهمیده شود، این نمودار ابزار مرجع ضروری جهت طراحی سامانه‌های کنترل رطوبت و دما خواهد بود.

این فصل به توضیح خواص هوای مرطوب می‌پردازد و سپس نشان می‌دهد که چگونه می‌توان این خواص را به سرعت با استفاده از نمودار سایکرومتری یافت. این نمودار هم به دلیل اطلاعاتی که در بر دارد و هم به دلیل روابطی که برای هوا در شرایط مختلف ارائه می‌دهد، مفید است. همچنین این نمودار نه تنها جزئیات، بلکه کلیات فرآیندها را نیز نشان می‌دهد و بنابراین یک مهندس می‌تواند درک واضحی از سهولت یا سختی تغییر حالت هوا از یک حالت به حالتی دیگر را به دست آورد.



شکل ۲-۱

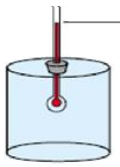
نمودار مولیر که اغلب نمودار سایکرومتری نامیده می‌شود، تصویر جامعی در مورد خواص ترمودینامیکی مخلوط آب و هوا فراهم می‌کند. اگر دو خاصیت مخلوط هوا مشخص باشد، به کمک این نمودار می‌توان تمام خواص دیگر را تعیین کرد. روابط نشان داده شده در این نمودار، با تغییر فشار هوا تغییر می‌کنند. در هنگام کار کردن با هوا در ارتفاع بیشتر از ۲۵۰۰ft و یا هوای فشرده، برای دستیابی به بهترین نتایج باید از نمودار مخصوص آن‌ها استفاده کرد.

برای کمک به فهم بهتر ویژگی‌های انتزاعی هوا، فرض می‌شود محفظه‌ای حاوی یک پوند هوای گرفته شده از سطح دریا با دمای ۷۰°F و رطوبت نسبی ۵۰٪ موجود می‌باشد. با داشتن این دو خاصیت هوا دیگر خواص آن با استفاده از نمودار سایکرومتری به دست می‌آیند. اما در اینجا به تعریف آنچه می‌دانیم می‌پردازیم.

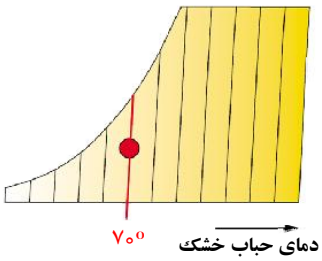
[1] Richard Mollier

۲-۱ دمای حباب خشک (درجه فارنهایت)

شکل ۲-۲



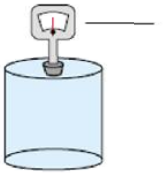
دمای هوا $70^{\circ}F$ است. وقتی مردم دمای هوا را بیان می‌کنند، عموما به دمای حباب خشک هوا اشاره می‌کنند که با دماسنجی که هیچ آبی بر روی سطح آن نیست، اندازه‌گیری می‌شود. این دما با عنوان دمای محسوس هوا نیز نامیده می‌شود (دمای حباب تر هوا همانگونه که در ادامه توضیح داده خواهد شد، با یک دماسنج خیس اندازه‌گیری می‌شود).



بر روی نمودار سایکرومتری دمای حباب خشک هوا در پایین نمودار نمایش داده می‌شود و از چپ به راست افزایش می‌یابد.

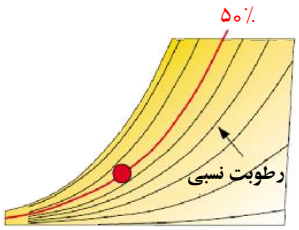
۲-۲ رطوبت نسبی (درصد اشباع)

شکل ۲-۴



در مثال ما رطوبت نسبی ٪۵۰ است. در اصل، رطوبت نسبی محتوای رطوبت را به صورت درصد رطوبتی که هوای اشباع می‌تواند داشته باشد، بیان می‌کند.[۱] همانطور که از اسم آن نیز مشخص است، رطوبت نسبی مقدار مطلق رطوبت موجود در هوا را نشان نمی‌دهد، بلکه رطوبت موجود در هوا را نسبت به بیشترین مقدار رطوبت ممکن در دمای حباب خشک هوا اندازه می‌گیرد. از آنجایی که این مقدار بیشینه با افزایش دما افزایش می‌یابد، عبارت رطوبت نسبی ابهام زیادی ایجاد می‌کند. به همین دلیل هنگامی که مقداری برای رطوبت نسبی بیان می‌شود، لازم است که دمای حباب خشک مربوطه نیز مشخص گردد.

شکل ۲-۳



البته این موارد حاکی از مفید نبودن رطوب نسبی نمی‌باشد. کاملا برعکس است؛ چرا که اغلب مواد رطوبت را متناسب با رطوبت نسبی موجود در هوای اطراف جذب می‌کنند. متناسب با این، بیشتر دستگاه‌های کنترل رطوبت بر اساس حسگرهایی که رطوبت نسبی هوا را می‌سنجند، عمل می‌کنند. اما برای طراحی سامانه‌های کنترل رطوبت هوا دانستن مقادیر رطوبت نسبی و دمای حباب خشک هوا ضروری است.

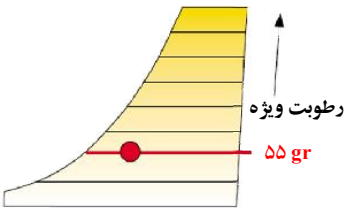
بر روی نمودار سایکرومتری رطوبت نسبی به صورت مجموعه‌ای از منحنی‌ها نمایش داده می‌شود که این منحنی‌ها از پایین نمودار شروع می‌شوند و در نهایت به منحنی اشباع می‌رسند. منحنی اشباع مرز سمت چپ نمودار سایکرومتری را تشکیل می‌دهد و نشان دهنده رطوبت نسبی صد در صد است.

---

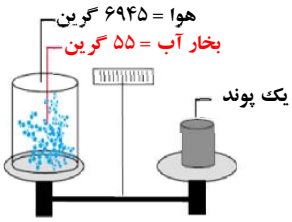
[۱] البته این تعریف از لحاظ مفهومی درست است، اما زیاد بکار نمی‌رود. معمولا رطوبت نسبی به صورت کسر مولی بخار آب به کسر مولی بخار آب هوای اشباع در همان دما و فشار اتمسفری بیان می‌شود. تفاوت بین این تعریف و آنچه در بالا ذکر شد، تنها در شرایط خارج محدوده آسایش انسان قابل توجه است.

۲-۳ نسبت رطوبت (گرین[1] بخار آب بر پوند هوا)

شکل ۲-۵



شکل ۲-۶



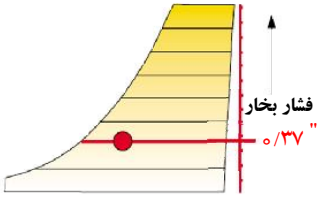
برای تعریف مقدار مطلق رطوبت موجود در هوا، از وزن رطوبت نسبت به وزن هوا استفاده می‌کنیم. این کار شبیه به شمارش مولکول‌های آب و جمع کردن وزن آن‌هاست. وزن رطوبت به "گرین" محاسبه می‌شود و هر پوند برابر با ۷۰۰۰ گرین است. در مثال ما، زمانی‌که دمای هوا $70^{o}F$ و رطوبت نسبی آن ٪۵۰ است، رطوبت ویژه آن ۵۵ گرین آب در یک پوند هوای خشک خواهد بود. به عبارت دیگر در نمونه یک پوندی ما ۵۵ گرین بخار آب و ۶۹۴۵ گرین هوای خشک موجود است.

نمودار سایکرومتری به ما امکان اندازه‌گیری درصد رطوبت را نیز می‌دهد. با شروع از نقطه $70^{o}F$ و ٪۵۰ ما می‌توانیم نسبت رطوبت را با دنبال کردن یک خط افقی به سمت لبه راست نمودار بخوانیم. در آنجا مقیاس نشان دهنده وزن رطوبت بر حسب گرین بر پوند است[2].

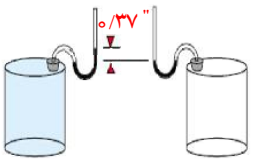
بعضی از نمودارهای سایکرومتری نسبت رطوبت را به صورت کسر اعشاری کوچکی که نشان دهنده نسبت جرم آب به جرم هواست، نشان می‌دهند. البته اگر این مقدار اعشاری در ۷۰۰۰ ضرب شود، این نسبت تبدیل به تعداد گرین‌های آب در هر پوند هوا می‌شود؛ چرا که در هر پوند ۷۰۰۰ گرین وجود دارد. همچنین برای بیان آن به گرم در هر کیلوگرم کافیست این نسبت در ۱۰۰۰ ضرب شود. در همه نمودارها محور قائم سمت راست نشان دهنده مقدار مطلق رطوبت است، نه مقدار نسبی آن.

۲-۴ فشار بخار (اینچ جیوه)

شکل ۲-۷



شکل ۲-۹



مثل مولکول‌های همه گازها مولکول‌های آب نیز بر دیواره ظرف فشار وارد می‌کنند. مقدار فشار بخار در یک محتوای رطوبت خاص برابر با مجموع فشارهای همه مولکول‌های آب است.

واحد اندازه‌گیری اینچ جیوه است. به عبارت دیگر، بخار آب تا چه اندازه می‌تواند ستون جیوه را فقط به واسطه فشار خودش بالا ببرد. در این مثال بخار ستون جیوه را به اندازه ۰/۳۷ اینچ بالا می‌برد.

در سرمایش و گرمایش متعارف، مهندسان معمولا فشار بخار را به اینچ آب اندازه‌گیری می‌کنند. با توجه به اینکه وزن جیوه ۱۳/۶ برابر آب است، آشکار است که مقدار زیادی بخار آب می‌تواند نیروی قابل توجهی اعمال کند. برای مثال اختلاف فشار می‌تواند موجب جدا شدن رنگ

---

[1] Grain

[2] در حقیقت نمودار سایکرومتری نشان‌دهنده گرین‌های آب در هر پوند هوای خشک است. در یک مورد متفاوت دیگر، از آنجا که نمودار برای هر نمونه‌ای قابل استفاده می‌باشد، وزن کلی اهمیتی ندارد. وزن کلی نمونه ما ثابت است. وزن آن یک پوند است که ۵۵ گرین آن بخار آب می‌باشد .

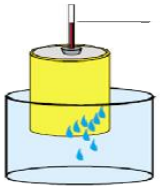
سطوح چوبی در زمستان شود. چون رطوبت درون چوب بیشتر از رطوبت اطراف است، بنابراین اختلاف فشار موجب جدا شدن رنگ از سطحش می‌شود. همانگونه که در فصل سوم تشریح شده است، رطوبت‌گیرهای دسیکنت [1] از اختلاف فشار بخار برای جذب مولکول‌های آب از هوا به سطح دسیکنت استفاده می‌کنند.

مقیاس مقدار فشار بخار مشابه رطوبت ویژه، در سمت راست نمودار سایکرومتری به طور خطی افزایش می‌یابد. نسبت رطوبت لزوما نشان دهنده تعداد مولکول‌ها است و فشار بخار مجموع فشارهای اعمال شده توسط این مولکول‌ها می‌باشد.

۲-۵ دمای نقطه شبنم (درجه فارنهایت)

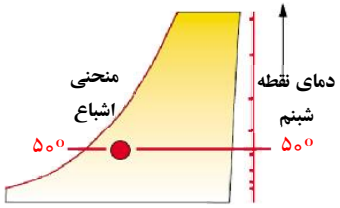
اگر هوای مرطوب سرد شود، نمی‌تواند همان مقدار رطوبت را نگه دارد. در یک نقطه، رطوبت از هوا بر روی هر سطح نزدیک چگالیده خواهد شد. این دما که دمای نقطه شبنم نامیده می‌شود، به مقدار رطوبت موجود در هوا بستگی دارد. هر چه مقدار رطوبت هوا بیشتر باشد، دمای نقطه شبنم نیز بالاتر خواهد بود.

شکل ۲-۱۰



در مثال ما محتوای رطوبت هوا ۵۵ گرین است. اگر دمای هوا به $50^{o}F$ برسد، این مقدار رطوبت چگالیده می‌شود. برای مثال اگر یک قوطی نوشیدنی خنک که در دمای $50^{o}F$ در یخچال نگهداری می‌شود، درون نمونه هوای ما قرار داده شود، سطح قوطی هوای اطراف خود را از دمای $70^{o}F$ به $50^{o}F$ کاهش می‌دهد و در نتیجه رطوبت موجود در هوای مجاور قوطی شروع به چگالش می‌کند.

شکل ۲-۱۱



به عبارت دیگر، نمونه هوای ما با سرد شدن تا $50^{o}F$ اشباع می‌شود؛ یعنی به شرایط رطوبت نسبی صد در صد رسیده است.

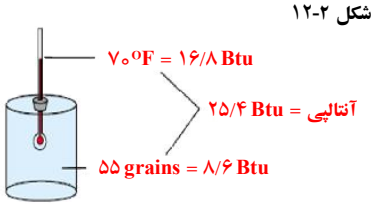
لبه سمت چپ نمودار سایکرومتری منحنی اشباع نیز نامیده می‌شود. اگر از نطقه‌ای با شرایط $70^{o}F$ و رطوبت نسبی ٪۵۰ خطی افقی به سمت چپ رسم شود، منحنی اشباع را در دمای $50^{o}F$ قطع می‌کند. در این نمودار خاص مقدار نقطه شبنم روی خط عمودی نیز در سمت راست نمودار نشان داده شده است.

سامانه‌های رطوبت‌گیری سرمایشی با سرد کردن هوا تا زیر نقطه شبنم رطوبت را از آن جدا می‌کنند. اگر دمای اجسام سرد کمتر از دمای نقطه شبنم هوای اطراف باشد، رطوبت هوا بر سطوح آن‌ها چگالیده می‌شود؛ مشابه قوطی نوشیدنی در مثال ما. اهمیت این موضوع در فصل‌های بعد آشکار خواهد شد.

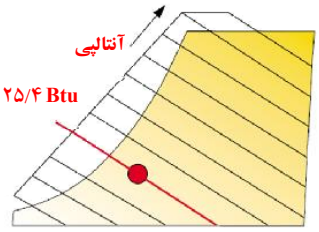
[1] Desiccant dehumidifiers

۲-۶ آنتالپی (Btu در یک پوند هوا)

شکل ۲-۱۲



شکل ۲-۱۳



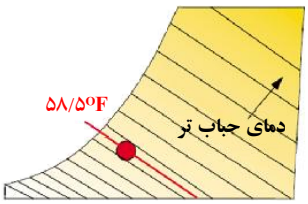
آنتالپی یک مفهوم مفید و گاهی گیج کننده است که به معنای اندازه کل انرژی موجود در هواست. وقتی هوا گرم باشد آنتالپی آن بالاست. وقتی هوا مرطوب باشد نیز آنتالپی آن بالاست؛ این بدین دلیل است که برای بخار شدن رطوبت باید به هوا گرما داده شود و هر چه مقدار رطوبت هوا بیشتر باشد، مقدار گرمای بیشتری برای تبخیر آن لازم است. هر پوند آب تقریبا به ۱۰۶۱Btu برای تبخیر نیاز دارد (البته با افزایش دما مقدار واقعی گرمای مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. مقدار ۱۰۶۱Btu مقدار مربوط به صفر درجه فارنهایت است). بنابراین آنتالپی به عنوان انرژی کل هوا تابعی از دمای محسوس، مقدار مطلق رطوبت و فشار هوا است.

در مراجع دیگر، آنتالپی به عنوان مجموع گرمای نهان و گرمای محسوس هوا تعریف می‌شود. واژه "گرمای نهان" راه دیگری برای بیان مقدار رطوبت موجود در هواست. رطوبت نشان دهنده مقدار گرمای مورد نیاز برای تبخیر آن است، اما این گرما نهان است یعنی به وسیله یک دماسنج حباب خشک قابل تشخیص نیست. در نمودار سایکرومتری مقدار آنتالپی در سمت چپ منحنی اشباع قرار دارد. در مثال ما در دمای ۷۰°F و رطوبت نسبی ٪۵۰ مقدار آنتالپی ۲۵/۴ Btu در هر پوند هواست.

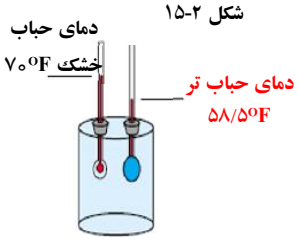
مفهوم آنتالپی و نمودار سایکرومتری به مهندس کمک می‌کند تا با سرعت و سهولت حداقل انرژی مورد نیاز برای جابه جایی از یک وضعیت به وضعیت دیگر را محاسبه کند. این کار در طراحی سامانه‌های کنترل رطوبت و دما بسیار سودمند است. برای مثال اگر نیاز باشد که مخلوط هوا در ظرف ما به شرایط اشباع (رطوب نسبی ٪۱۰۰) در دمای ۷۰°F برسد، باید رطوبت به هوا اضافه شود و در نتیجه گرمای مورد نیاز برای تبخیر رطوبت اضافی به اندازه حداقل ۸/۶۷Btu در هر پوند هوای اشباع است. این مقدار برابر با تفاوت بین مقدار آنتالپی جدید و آنتالپی شرایط اولیه می‌باشد.

۲-۷ دمای حباب تر (درجه فارنهایت)

شکل ۲-۱۴



شکل ۲-۱۵



در حالی که دمای حباب خشک هوا با استفاده از یک دماسنج خشک اندازه‌گیری می‌شود، دمای حباب تر با استفاده از یک دماسنج که با فتیله خیس پوشانده شده است، اندازه‌گیری می‌شود. آب موجود در فتیله خیس با گرفتن گرما از حباب دماسنج تبخیر می‌شود و متناسب با مقدار تبخیر، دماسنج را سرد می‌کند. در مثال ما دمای دماسنج خیس از ۷۰°F به وسیله تبخیر به ۵۸/۵°F کاهش می‌یابد.

اگر هوا بیش از ٪۵۰ اشباع شده بود، دما به این اندازه کاهش نمی‌یافت. اگر هوا خشک‌تر بود، دمای حباب تر از ۵۸/۵°F نیز کمتر می‌شد.

روی نمودار سایکرومتری خطوط دمای حباب تر تقریبا موازی خطوط آنتالپی هستند. اگر

دمای حباب تر و دمای حباب خشک هوا هر دو مشخص باشند، رطوبت مطلق آن به راحتی با استفاده از نمودار به دست می‌آید. این کار مبنای بسیاری از دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت مشابه رطوبت‌سنج زنجیره‌ای[1] است.

مفهوم دمای حباب تر به این دلیل که راهی نسبتا ساده و مقرون به صرفه برای اندازه‌گیری رطوبت هواست، سودمند و کاربردی است. همچنین تفاوت بین دمای حباب خشک و دمای حباب تر، میزانی از توانایی خشک‌کنندگی هوا را به دست می‌دهد. اگر دمای حباب خشک بالا و دمای حباب تر پایین باشد، هوا می‌تواند مقدار رطوبت زیادی جذب کند و حاوی گرمای محسوس کافی برای تبخیر این رطوبت جذب شده می‌باشد. اگر دمای حباب خشک و حباب تر برابر باشد، هوا اشباع است و نمی‌تواند رطوبت بیشتری جذب کند.

۲-۸ مراجع بیشتر

تفاوت‌های ظریفی بین تعاریفی که ما در اینجا استفاده کرده‌ایم و تعاریف کاملا دقیق دماها و فشارها وجود دارد. برای مثال رطوبت نسبی هوا در واقع به صورت نسبت کسر مولی آب در نمونه مورد نظر به کسر مولی آن در هوای اشباع در همان فشار و دما بیان می‌شود. در بیشتر موارد اختلاف بین این مقدار و مقدار حاصل از تقسیم گرین رطوبت نمونه بر رطوبت هوای اشباع ناچیز است. اما در محاسبات برای رطوبت‌های بسیار کم و یا موادی که در دما و رطوبت بالا خشک می‌شوند، خطا بزرگ‌تر است و ممکن است حائز اهمیت باشد. اگر مهندسان نیاز به شناخت دقیق عبارات سایکرومتری داشته باشند، باید به مراجعی رجوع کنند که موضوع را عمیق‌تر از آنچه در این مجال می‌گنجد، آورده‌اند. در زیر برخی از این مراجع آمده است:

Handbook of Fundamentals. 2001. American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329

Hyland, Richard W. and Wexler, Arnold. 1983. Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 K to 473.15 K and of saturated moist air from 173.15 K to 473.15 K, at pressures to 5 MPa. ASHRAE Transactions 89(2A): pp 520-535. American Society of Heating, Air conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329

[1] Sling schrometer

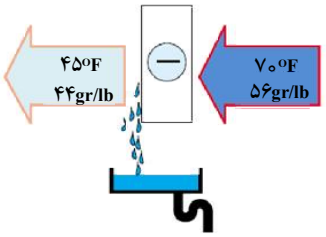
۳ روش‌های رطوبت‌گیری

سه راه برای رطوبت‌گیری هوا وجود دارد: با سردکردن آن تا بخار آب چگالیده شود، با افزایش فشار کلی آن که همانند روش قبل موجب چگالش می‌شود و یا با عبور دادن هوا از یک دسیکنت که به دلیل اختلاف فشار بخار رطوبت را از هوا جدا می‌کند.

رطوبت‌گیرهایی که بر پایه فشار کار می‌کنند، در مورد هوای فشرده کاربرد دارند. اما از آنجایی که این کتاب راهنما بیشتر با کنترل رطوبت در هوای محیط سروکار دارد، فصل سوم به بحث و بررسی روش‌های رطوبت‌گیری با استفاده از سرمایش و دسیکنت می‌پردازد و طرز کار، تفاوت‌ها و مزیت هر کدام را در شرایط مختلف ذکر می‌کند.

۳-۱ رطوبت‌گیری سرمایشی[1]

اغلب مردم با قاعده کلی چگالش آشنا هستند. هنگامی‌که هوا تا زیر نقطه شبنم سرد شود، رطوبت بر نزدیک‌ترین سطوح چگالیده می‌شود. با فرآیند سرمایش و چگالش هوا رطوبت‌گیری می‌شود. میزان رطوبت گرفته شده بستگی به این دارد که هوا چقدر می‌تواند خنک شود؛ هرچه دما کمتر شود، هوا خشک‌تر می‌شود.

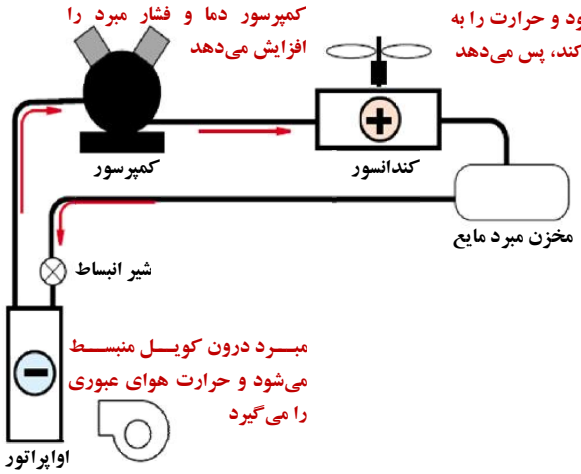


شکل ۳-۱

رطوبت‌گیری سرمایشی

با سرد کردن هوا تا زیر نقطه شبنم، بخار آب چگالیده شده و هوا رطوبت‌گیری می‌شود.

قاعده ذکر شده اساس عملکرد بسیاری از سامانه‌های تهویه مطبوع مسکونی و تجاری است. یک سامانه تبرید هوا را سرد می‌کند و مقداری از رطوبت آن را با چگالش گرفته و سپس هوای سرد و خشک را به فضا باز می‌گرداند. به تعبیر ساده این سامانه با استفاده از یک گاز مبرد که گرما را حمل می‌کند، گرما را از هوای رطوبت‌گیری شده به مکانی دیگر پمپ می‌کند.



شکل ۳-۲

سامانه‌های سرمایش مکانیکی

سامانه‌های تبرید حرارت را به صورت خیلی کارآمد از یک جریان هوا به یک جریان هوای دیگر منتقل می‌کنند که در نتیجه یک جریان هوا خنک و دیگری گرم می‌شود. این عمل، پایه و اساس اغلب سامانه‌های رطوبت‌گیری سرمایشی است.

گرما از هوای رطوبت‌گیری شده به یک گاز در حال انبساط (مبرد) که در کویل سرمایش قرار دارد، منتقل می‌شود. این کویل اواپراتور نامیده می‌شود، زیرا مبرد درون کویل بخار شده و از حالت مایع به گاز تبدیل می‌شود. گاز درون کویل گرمای هوای گذرنده از کویل را گرفته و منبسط می‌شود و بدین طریق هوا را سرد می‌کند.

از کویل سرمایش گاز مبرد به کمپرسور فرستاده می‌شود و فشار آن به طور قابل توجهی (۵ تا ۱۰ برابر فشار خروجی از اواپراتور) افزایش می‌یابد. در این حالت گاز به دلیل تراکم حجم بسیار کمتری اشغال می‌کند، اما دمای آن افزایش می‌یابد. برای مثال ممکن است دمای گاز پس از گرفتن گرما از هوا $60^{\circ}F$ باشد، اما پس از تراکم دمای آن به $200^{\circ}F$ یا بیشتر برسد. این گرما و گرمای حاصل از فرآیند تراکم با عبور از یک کویل دیگر از مبرد گرفته می‌شود.

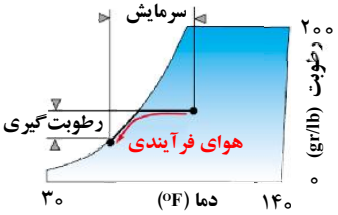
این کویل که کندانسور نامیده می‌شود، بیرون از فضای در حال تهویه قرار داده می‌شود تا بدون هیچ مشکلی گرمای مبرد را به هوای بیرون پس دهد. کندانسورها اغلب در بیرون از ساختمان و یا روی سقف قرار داده می‌شوند. مبرد گرم و فشرده در کویل کندانسور دوباره به مایع چگالیده شده و گرمای آن که منشا آن هوای رطوبت‌گیری شده بود، به هوای بیرون کندانسور منتقل می‌شود. سپس مایع مبرد خنک‌شده حالا می‌تواند به کویل سرمایش جریان هوای اصلی باز

[1] Cooling-based Dehumidification

گردد و دوباره با تبخیر در کویل اواپراتور گرمای هوای داخل اتاق را می‌گیرد و چرخه تکرار می‌شود.

فرآیند می‌تواند بازده بالایی داشته باشد. معیار معمول بازده ضریب عملکرد یک است که عبارت است از مقدار انرژی گرفته شده از جریان هوای رطوبت گیری شده به انرژی مصرفی برای انتقال این مقدار گرما به جریان هوای روی کندانسور. انرژی مصرفی برابر با مجموع انرژی کمپرسور و انرژی فنی که هوا را بر روی کویل‌ها می‌دمد، است. بیشتر سامانه‌های تبرید الکتریکی از ضریب عملکردی بین ۲٫۰ تا ۴٫۵ بهره می‌برند که یعنی این سامانه‌ها می‌توانند انرژی گرمایی معادل ۲٫۰ تا ۴٫۵ برابر انرژی الکتریسیته مصرفی خود را منتقل کنند؛ یک نسبت بسیار مطلوب!

رطوبت‌گیری با استفاده از سرمایش هوا را می‌توان بر روی نمودار سایکرومتری نشان داد. در زیر این فرآیند برای مثال فصل دو (شرایط دمای $70^{o}F$ و رطوبت نسبی ۵۰٪) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳

مسیر هوای رطوبت‌گیری شده

سامانه‌های سرمایشی هوا را تا دمای نقطه شبنم و رطوبت نسبی ۱۰۰٪ سرد می‌کنند. بعد از این نقطه، سرمایش بیشتر موجب چگالش بخار آب و در نتیجه رطوبت‌گیری می‌شود. هر چه هوا بیشتر سرد شود، رطوبت‌گیری بیشتری انجام می‌شود.

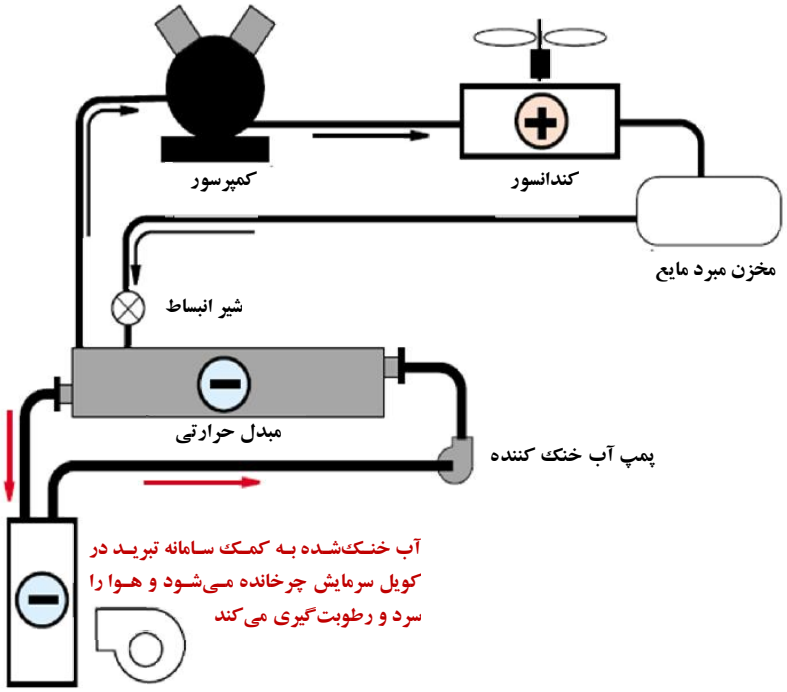
طی سرمایش هوا از $70^{o}F$ تا $51^{o}F$ هیچ رطوبتی گرفته نمی‌شود. اما هنگامی که هوا در $51^{o}F$ قرار می‌گیرد، اشباع می‌شود و اگر سرمایش ادامه یابد، رطوبت شروع به چگالش می‌کند. اگر هوا از $51^{o}F$ تا $45^{o}F$ سرد شود، ۱۱ گرین رطوبت از طریق چگالش از هوا گرفته می‌شود و بدین ترتیب هوا رطوبت‌گیری می‌شود.

تجهیزات واقعی که رطوبت‌گیری سرمایشی انجام می‌دهند، بسیار متنوع هستند. در واقع هزاران نوع ترکیب از کمپرسورها، اواپراتورها و کندانسورها در سراسر دنیا استفاده می‌شود، اما سه نوع ترکیب اصلی مورد علاقه طراحان سامانه کنترل رطوبت قرار گرفته است که عبارتند از:

- سرمایش انبساط مستقیم[1]
- سرمایش مایع خنک‌کننده[2]
- رطوبت‌گیری + گرمایش‌مجدد[3]

سامانه‌های **انبساط مستقیم** از آرایش مطرح شده در مثال قبل استفاده می‌کنند. گاز مبرد مستقیما در کویل سرمایش منبسط می‌شود و بدین ترتیب گرمای هوا را می‌گیرد. سامانه‌های تهویه خانگی، همانگونه که اجزای آن در شکل ۳-۲ آمده است، از جمله سامانه‌های انبساط مستقیم‌اند که گاهی اوقات DX نیز نامیده می‌شوند.

[1] Direct expansion cooling
[2] Chilled liquid cooling
[3] Reheat

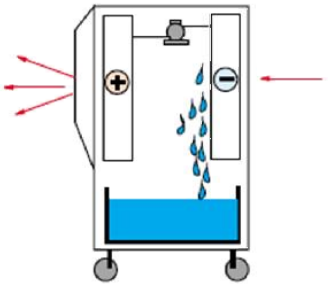


شکل ۳-٤

سامانه‌های سرمایشی مایع خنک‌کننده

مبردهای تبخیری یک مایع را خنک می‌کنند و سپس این مایع برای خنک کردن هوا بکار می‌رود. این طرح، می‌تواند هوا را تا نزدیک ۳۲°F بدون یخ زدن آب چگالیده شده، خنک کند و مزیتش این است که هنگامی که یک سامانه تبرید باید چندین جریان هوای متفاوت را سرد کند، بار کندانسور و کمپرسور را متعادل می‌کند.

سامانه‌های مایع خنک‌کننده از گاز مبرد برای سرد کردن یک مایع استفاده کرده و سپس از آن مایع برای خنک کردن هوا و رطوبت‌گیری استفاده می‌کنند. چنین تجهیزاتی با توجه به سیالی که توسط گاز مبرد سرد می‌شود، اغلب چیلر آب، چیلر – گلیکول یا چیلر آب نمک نامیده می‌شوند. آرایش این سامانه‌ها همانند آبسردکن‌های رایج خانگی و اداری است. اگر چه صدها هزار چیلر کوچک همانند آبسردکن‌ها در کاربردهای تهویه مطبوع وجود دارد، اما این سامانه‌های خنک‌کننده بسیار پیچیده‌تر و گران‌تر از دیگر نمونه‌ها هستند. در نتیجه در اغلب موارد سامانه‌های مایع خنک‌کننده در تاسیسات بزرگ استفاده می‌شوند و در هزینه نصب و بازده نسبت به سامانه‌های DX مزیت دارند.



شکل ۳-۵

سامانه رطوبت‌گیری-گرمایش‌مجدد

اغلب رطوبت‌گیرهای کوچک مسکونی، هوا را به روش سرمایش-گرمایش‌مجدد رطوبت‌گیری می‌کنند. این روش در دما و رطوبت بالا بسیار کارآمد است، زیرا در این حالت کندانسور در پایین دست اواپراتور نصب می‌شود. کندانسور در هوای با دمای پایین خروجی از کویل‌های اواپراتور بسیار کارآمدتر است.

سامانه‌های رطوبت‌گیری-گرمایش‌مجدد می‌توانند هم از انبساط مستقیم و هم از مایع خنک‌کننده برای سرمایش هوا استفاده کنند، اما هوا پس از سرمایش و قبل از آنکه به فضا بازگردد، مجددا گرم می‌شود. اکثر رطوبت‌گیرهای مسکونی چنین آرایشی دارند. این سامانه‌ها برای استفاده در زیرزمین‌ها و خانه‌های مرطوب فرخته می‌شوند. نمونه‌های صنعتی و تجاری سامانه‌های رطوبت‌گیری-گرمایش مجدد در محیط‌های با دما و رطوبت بالا همچون استخر شنا، چوب خشک کنی و رختکن‌ها بکار می‌روند.

سامانه‌های رطوبت‌گیری–گرمایش‌مجدد از اصول پایه سامانه‌های خنک‌کننده برای دستیابی به بازده بالا استفاده می‌کنند. اگر همه متغیرهای دیگر ثابت باشند، فرآیند سرمایش مکانیکی وقتی کارآمدتر است که:

- دمای هوای کندانسور پایین باشد.
- دمای هوای کویل سرمایشی بالا باشد.

در یک آرایش معمول سامانه‌های رطوبت‌گیری-گرمایش‌مجدد کندانسور بلافاصله در

پایین‌دست کویل سرمایش قرار می‌گیرد. این آرایش ایده‌آل است، زیرا از آنجا که دمای هوای بعد از کویل سرد کم است، کندانسور بسیار کارآمدتر می‌شود. انرژی گرمایش مجدد نیز اساسا رایگان است، زیرا از گرمای دفع شده از فرآیند سرمایش حاصل می‌شود. انرژی اضافی گران‌قیمت از خارج فرآیند کمینه می‌گردد.

هنگامی‌که هوای ورودی هم گرم و هم مرطوب باشد و دمای نقطه شبنم هوای خروجی مورد نیاز نیز بالا باشد، سامانه‌های رطوبت‌گیری-گرمایش‌مجدد کارآمدترین و کم‌هزینه‌ترین روش رطوبت‌گیری از هوا هستند. پیشنهاد می‌شود که طراح در صورت امکان از این روش استفاده کند. هر چند از محدودیت‌های این روش این است که امکان دارد فرآیند سرمایش، به جای چگالش، موجب یخ‌زدگی رطوبت هوا شود.

یخ‌زدگی دو مشکل در سامانه‌های سرمایش ایجاد می‌کند. اول اینکه یخ، گاز مبرد را از هوای عبورکننده از کویل عایق می‌کند که موجب کاهش انتقال حرارت می‌شود. دوم اینکه یخ روی کویل می‌چسبد و جریان هوا را کاهش می‌دهد. سرانجام نیز موجب مسدودشدن جریان هوا شده و رطوبت‌گیری متوقف می‌شود. سامانه‌هایی که هوا را تا زیر $۳۲^{o}F$ سرد می‌کنند، دارای سامانه برفک‌زدایی برای ذوب کردن یخ‌های تولید شده هستند. رطوبت‌گیری و سرمایش در حین برفک‌زدایی متوقف می‌شود.

سامانه‌های رطوبت‌گیری DX با طراحی ویژه هوا را تا دمایی بین $۴۳^{o}F$ تا $۴۵^{o}F$ سرد می‌کنند. در کمتر از این دما برفک روی بخش‌هایی از کویل تشکیل می‌شود و به آرامی گسترش یافته و جریان هوا را محدود می‌کند. با استفاده از برخی تکنیک‌های طراحی می‌توان به دمای کمتر از $۴۳^{o}F$ بدون ایجاد برفک نیز رسید، اما کنترل این سامانه در شرایط نیمه‌بار بسیار دشوار خواهد بود. این دشواری از تمایل سامانه برای ادامه سرمایش هوا به یک میزان ثابت ناشی می‌شود. برای مثال ممکن است هوا با دمای $۷۵^{o}F$ وارد شده و تا $۵۵^{o}F$ به اندازه ۲۰ درجه سرد شود. اما اگر سامانه با دقت کنترل نشود، بخشی از هوای ورودی با دمای $۵۰^{o}F$ ممکن است تا $۳۰^{o}F$ سرد شود که موجب یخ‌زدگی داخل کویل می‌شود.

در دماهای پایین کنترل سامانه‌های رطوبت‌گیری مایع خنک‌کننده از سامانه‌های سرمایش DX راحت‌تر است، زیرا اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی کویل سرمایش کمتر است. برای مثال ممکن است سیال در دمای $۳۲^{o}F$ باشد و پس از خروج از کویل سرمایش به دمای $۴۰^{o}F$ برسد. در این صورت دمای هوای میانگین خروجی $۳۵^{o}F$ خواهد بود. در مقابل، در یک سامانه انبساط مستقیم برای رسیدن به دمای هوای میانگین خروجی $۳۵^{o}F$، مبرد باید تا دمای $۲۰^{o}F$ منبسط شود. این بدین معنی است که دمای بخشی از سطح کویل کمتر از $۳۲^{o}F$ است و در نتیجه در آن نقطه برفک تشکیل می‌شود.

ظرفیت‌های ویژه رطوبت‌گیری سامانه‌های سرمایشی بسیار به دستگاه‌های مورد استفاده بستگی دارد و تعمیم آن موجب اشتباه می‌شود. مهندس کافیست به یاد داشته باشد با آنکه سامانه‌های سرمایشی در دماهای بالا به خوبی رطوبت‌گیری می‌کنند، برای استفاده از این سامانه‌ها جهت خشک‌کردن هوا در دمای نقطه شبنم کمتر از $۴۰^{o}F$ نیاز است تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.

۳-۲ رطوبت‌گیرهای دسیکنت

رطوبت‌گیرهای دسیکنت کاملا با رطوبت‌گیرهای سرمایشی متفاوت‌اند. دسیکنت‌ها به جای سردکردن هوا برای چگالش رطوبت آن، رطوبت هوا را با ایجاد یک ناحیه فشار بخار کم بر روی سطح دسیکنت جذب می‌کنند. فشار اعمالی توسط آب موجود در هوا بیشتر است و در نتیجه مولکول‌های آب از هوا به دسیکنت انتقال می‌یابند و هوا رطوبت‌گیری می‌شود.

در حقیقت بیشتر مواد جامد می‌توانند رطوبت جذب کنند. برای مثال پلاستیک‌هایی چون نایلون می‌توانند تا ۶٪ وزن خشک خود رطوبت جذب کنند. صفحات ساختمانی گچی نیز می‌تواند مقدار قابل توجهی رطوبت در خود ذخیره کند. همچنین در شرایط مناسب لایه اکسیدی روی فلزات نیز مقدار اندکی بخار آب جذب و ذخیره می‌کند. تفاوت این مواد و دسیکنت‌های تجاری در ظرفیت آن‌هاست. دسیکنت‌های طراحی شده برای جذب بخار آب می‌توانند از ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ درصد وزن خشک خود رطوبت جذب و ذخیره کنند، در حالی که مواد دیگر ظرفیت بسیار کمتری دارند.

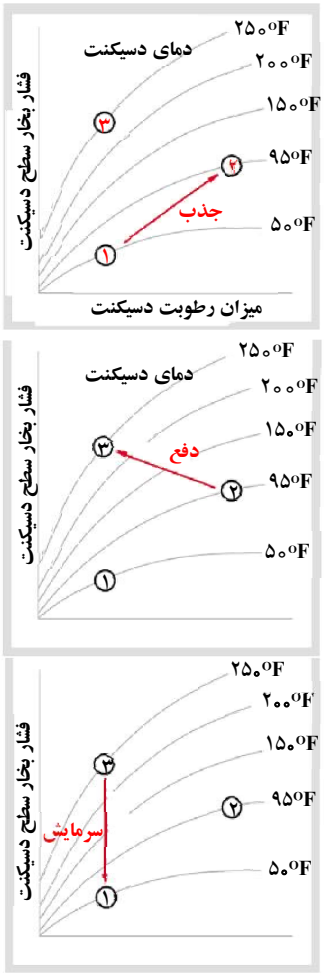
ویژگی اصلی دسیکنت‌ها پایین بودن فشار بخار سطح آن‌هاست. اگر دسیکنت سرد و خشک باشد، فشار بخار سطح آن پایین است و می‌تواند رطوبت هوا را که وقتی مرطوب است فشار بخار بالایی دارد، جذب کند. پس از آن که دسیکنت گرم و مرطوب شد، فشار بخار سطح آن زیاد می‌شود و بنابراین رطوبت خود را به هوای بیرون می‌دهد. بخار از هوا به دسیکنت و بالعکس، با توجه به اختلاف فشار بخار آن‌ها، منتقل می‌شود.

رطوبت‌گیرهای دسیکنت با استفاده از اختلاف فشار بخار در یک چرخه تکراری دایمی که در نمودار تعادل کنار صفحه نشان داده شده است، هوا را خشک می‌کنند. دسیکنت چرخه را از نقطه یک شروع می‌کند. به دلیل اینکه سرد و خشک است، فشار بخار سطح آن پایین است. هنگامیکه دسیکنت رطوبت هوای اطرافش را می‌گیرد، شرایط دسیکنت به شرایط دو نشان داده شده در نمودار تغییر می‌کند. در نقطه دو دسیکنت نمی‌تواند رطوبت بیشتری جذب کند، زیرا اختلاف فشاری بین سطح دسیکنت و بخار موجود در هوا وجود ندارد.

سپس دسیکنت از هوای مرطوب خارج شده، به آن گرما داده می‌شود و در جریان هوای دیگری قرار داده می‌شود. اکنون فشار بخار سطح دسیکنت از هوای بیرون نیز بیشتر است و در نتیجه رطوبت از سطح دسیکنت به هوای بیرون منتقل می‌شود تا اختلاف فشار تعدیل گردد. در نقطه سه دسیکنت خشک شده است، اما همچنان گرم است و فشار بخار آن برای گرفتن رطوبت از هوا بسیار بالاست. برای بازگرداندن فشار بخار پایین، دسیکنت سرد شده و به نقطه یک در نمودار می‌رسد و چرخه کامل شده و می‌تواند دوباره رطوبت‌گیری کند.

نیروی محرکه این چرخه انرژی حرارتی است. به دسیکنت حرارت داده می‌شود تا رطوبت خود را از دست دهد (نقطه دو به نقطه سه). سپس دسیکنت سرد می شود تا فشار بخار سطح آن کاهش یابد (نقطه سه به نقطه یک). زمانی بازده این فرآیند افزایش می یابد که ظرفیت دسیکنت برای جذب رطوبت زیاد و جرم آن کم باشد. دسیکنت ایده‌آل دسیکنتی است که مساحت سطح بینهایت بزرگ برای جذب رطوبت و جرم بینهایت کوچکی داشته باشد، زیرا انرژی مورد نیاز

شکل ۳-۶

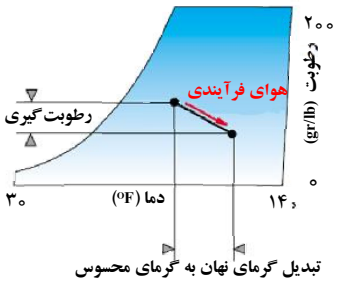


برای گرمایش و سرمایش دسیکنت مستقیما متناسب با جرم دسیکنت و جرم تجهیزاتی است که دسیکنت را در معرض جریان هوا قرار می‌دهند. هر چه جرم دسیکنت نسبت به ظرفیتش بیشتر باشد، به انرژی بیشتری برای تغییر دمای آن (دمایی که رطوبت‌گیری انجام می‌شود) نیاز است.

دسیکنت‌ها هم می‌توانند جامد باشند و هم مایع؛ در هر دو حالت رطوبت را جذب می‌کنند. برای مثال در دوربین‌ها و قطعات الکترونیکی بسته‌های کوچکی حاوی سیلیکاژل که یک دسیکنت جامد است، وجود دارد. همچنین تری‌اتیلن گلیکول که مایعی شبیه به ضدیخ خودرو است نیز یک دسیکنت قدرتمند برای جذب رطوبت است. دسیکنت‌های جامد و مایع رفتاری مشابه دارند و فشار بخار سطح آن‌ها تابعی از دما و مقدار رطوبتشان است.

تفاوت دقیق دسیکنت‌ها در واکنش آن‌ها به رطوبت است. بعضی از آن‌ها رطوبت را به راحتی همانطور که اسفنج آب را جذب می‌کند، می‌گیرند. اسفنج آب را روی سطح و در مسیرهای باریک درون خود نگه می‌دارد. این دسیکنت‌ها جاذب سطحی[1] نامیده می‌شوند و اکثرا مواد جامدند. سیلیکاژل مثالی از جاذب‌های سطحی جامد است. دیگر دسیکنت‌ها با جذب رطوبت، فرآیندی فیزیکی یا شیمیایی طی می‌کنند. این دسیکنت‌ها عامل جاذب[2] نامیده می‌شوند و اغلب مایع هستند و اگر هم جامد باشند، با جذب رطوبت مایع می‌شوند. لیتیم‌کلرید یک نمک رطوبت‌گیر است که بخار آب را جذب می‌کند. سدیم کلرید (نمک خوراکی) نیز مثالی دیگر است.

اینکه دسیکنت از نوع جاذب سطحی یا از نوع عامل جاذب باشد معمولا برای طراح سامانه اهمیتی ندارد، اما تفاوت ذکر شده وجود دارد و مهندسان باید از تفاوت این دو واژه آگاهی داشته باشند.



تبدیل گرمای نهان به گرمای محسوس
شکل ۳-۷

مسیر هوای رطوبت‌گیری شده

با گرفتن رطوبت از هوا آنتالپی آن ثابت می‌ماند و در نتیجه دمای محسوس آن افزایش می‌یابد. در حقیقت آنتالپی هوای فرآیندی، هوایی که رطوبت‌گیری می‌شود، اندکی افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که در بسیاری از رطوبت‌گیرها مقدار کمی از حرارت باقیمانده از فرآیند احیا دسیکنت به جریان هوای خشک منتقل می‌شود.

تا اینجا طرز کار دسیکنت را شرح دادیم. اکنون به بررسی هوایی که بدین طریق رطوبت‌گیری می‌شود، می‌پردازیم. هنگام رطوبت‌گیری از هوا گرما آزاد می‌شود. این عمل عکس فرآیند تبخیر که فرآیندی گرماگیر است، می‌باشد. در یک سامانه رطوبت‌گیری سرمایشی، چون‌که تاثیر این گرما به سرعت در کویل سرمایش گرفته می‌شود، اثر گرما کمتر مشهود است. در یک سامانه رطوبت‌گیری دسیکنت گرما به هوا و دسیکنت داده می‌شود و در نتیجه هوای خروجی از رطوبت‌گیر گرم‌تر از زمان ورود خواهد بود.

افزایش دمای هوای خروجی مستقیما متناسب با مقدار رطوبت گرفته شده است؛ هر چه هوای خروجی خشک‌تر باشد، گرم‌تر نیز خواهد بود.

با توجه به فرآیند رطوبت‌گیری بر روی نمودار سایکرومتری، تفاوت میان رطوبت‌گیری سرمایشی و دسیکنت آشکار می‌شود. با استفاده از مثال قبلی ما، هوای ورودی در دمای $۷۰^{o}F$ و رطوبت نسبی ٪۵۰ وارد رطوبت‌گیر می‌شود و با کاهش رطوبت دمای حباب خشک آن افزایش می‌یابد و در نتیجه انرژی کل(آنتالپی) هوا ثابت می‌ماند. در حقیقت انرژی کل با توجه به انتقال گرمای تلف شده از فرآیند احیا به جریان هوا مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. در بسیاری از

[1] Adsorbent
[2] Absorbent

کاربردها، مخصوصا صنایع خشک‌کن محصولات و انبارهای بدون سامانه گرمایش، این افزایش دمای هوای خشک مطلوب است. اما در کاربردهای دیگری که این افزایش دما نامطلوب است، هوای خشک قبل از انتقال به محل مورد استفاده ابتدا باید سرد شود.

پنج نوع آرایش تجهیزات رایج برای رطوبت‌گیرهای دسیکنت وجود دارد:

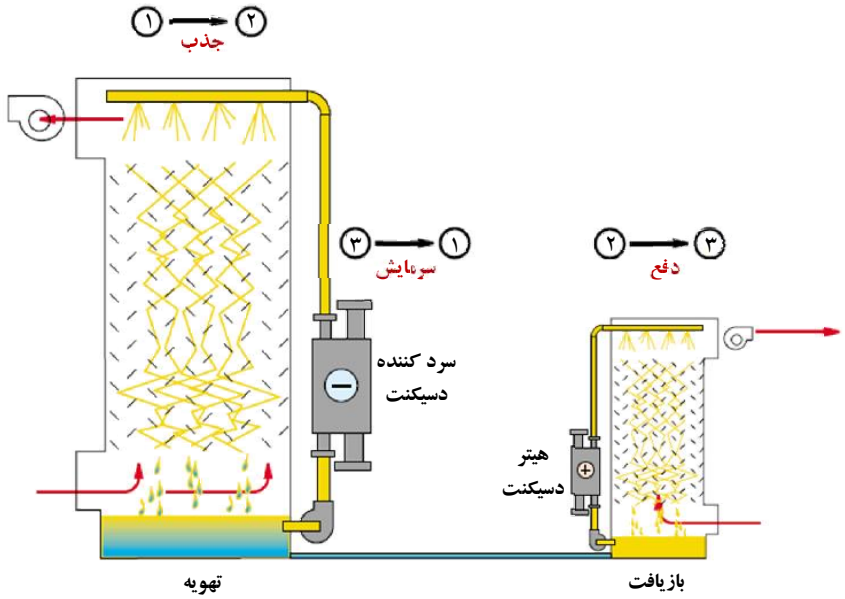
- برج اسپری مایع[۱]
- برج جامد فشرده[۲]
- بستر افقی چرخان[۳]
- بستر قائم چندگانه[۴]
- شانه زنبوری[۵] چرخان

هر یک از آرایش‌های بالا مزایا و معایبی دارند، اما از همه انواع رطوبت‌گیرهای دسیکنت به طور گسترده استفاده می‌شود.

[1] Liquid spray-tower
[2] Solid packed tower
[3] Rotating horizontal bed
[4] Multiple vertical bed
[5] Honeycombe

۳-۲-۱ برج اسپری مایع

رطوبت‌گیرهای اسپری مایع بسیار شبیه به هواشو عمل می‌کنند، اما به جای آب، دسیکنت مایع درون جریان هوایی که خشک می‌شود و به آن هوای فرآیندی[1] گفته می‌شود، اسپری می‌گردد. دسیکنت رطوبت هوا را جذب می‌کند و سپس به یک تشتک[2] سقوط می‌کند. مایع دوباره به هوا اسپری می‌شود و تا زمانی که یک کنترل کننده سطح تعیین کند که دسیکنت باید خشک شود و دوباره غلیظ گردد، به جذب رطوبت ادامه می‌دهد. سپس بخشی از محلول تخلیه می‌شود و از یک هیتر عبور داده می‌شود. دسیکنت گرم به جریان هوای دیگری که هوای احیا[3] نامیده می‌شود، اسپری می‌گردد. بدین طریق رطوبت از دسیکنت خارج شده و به هوای خارج داده می‌شود.

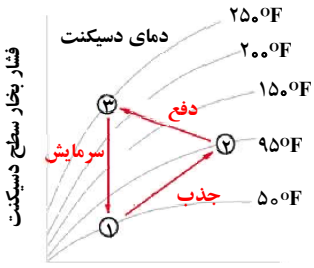


شکل ۳-۸

رطوبت‌گیرهای برج اسپری مایع

این رطوبت‌گیرها شبیه به هواشو هستند، با این تفاوت که به جای آب معمولی، دسیکنت مایع به جریان هوای فرآیندی اسپری می‌شود. حرارت و رطوبت ناشی از فرآیند رطوبت‌گیری به دسیکنت منتقل می‌شود. حرارت از طریق سامانه سرمایشی و رطوبت در قسمت بازیافت دسیکنت، که محلول رقیق دسیکنت را دوباره غلیظ می‌کند، دفع می‌شود.

در شکل ۳-۹، اعداد نمایانگر این هستند که دستگاه چگونه از خصوصیات تعادل دسیکنت برای حذف بخار آب ابتدا از هوای فرآیندی و سپس از دسیکنت استفاده می‌کند. در قسمت تهویه، دسیکنت بخار آب را جذب می‌کند، دما و فشار بخار آن افزایش می‌یابد و از نقطه ۱ به نقطه ۲ روی نمودار تعادل جابجا می‌شود. در نقطه ۲ روی نمودار، دسیکنت در تشتک قرار دارد و در این حالت مقدار قابل توجهی آب جذب کرده است و دما و فشار بخارش بسیار بیشتر از آن است که بخار آب بیشتری جذب کند. با عبور دسیکنت رقیق‌شده از هیتر، فشار بخارش افزایش می‌یابد و هنگامی‌که به هوای احیا اسپری می‌شود، فشار بالا موجب انتقال رطوبت از دسیکنت به هوا می‌شود. این فرآیند بین نقطه ۲ و ۳ روی نمودار تعادل انجام می‌شود.



شکل ۳-۹

هنگامی‌که دسیکنت از قسمت بازیافت به تشتک باز می‌گردد، غلیظ و خشک است، اما چون دمای بالایی دارد، همچنان فشار بخار سطح آن بالاست. برای سرد کردن دسیکنت، بخشی از مایع از تشتک بیرون آورده می‌شود و در یک مبدل حرارتی متصل به یک آب سردکن یا

[1] Process air
[2] Sumb
[3] Reactivation air

برج‌خنک‌کن چرخانده می‌شود. طی این فرآیند، دسیکنت از نقطه ۳ به نقطه ۱ بر روی نمودار تعادل جابجا می‌شود. اکنون فشار بخار آن پایین است، چون هم خشک و هم سرد است و در نتیجه برای جذب مقدار بیشتری رطوبت مجددا به قسمت تهویه بازگردانده می‌شود.

رطوبت‌گیرهای برج اسپری مایع ویژگی‌های مطلوب منحصر به فردی دارند. رطوبت‌گیری از نظر ترمودینامیکی بسیار جالب است، زیرا دسیکنت به اندازه حداقل لازم برای دستیابی به رطوبت‌گیری مورد نیاز، گرم و سرد می‌شود. همچنین هنگامی‌که فرآیند رطوبت-ثابت و هوای ورودی خشک باشد، می‌توان به محلول دسیکنت آب اضافه کرد و سامانه به جای رطوبت‌گیری، رطوبت‌زنی می‌کند. افزون بر این، مایع اضافی را می‌توان بازیافت کرد و به مخزن ذخیره‌سازی فرستاد که در این صورت انرژی ذخیره شده حاصل در کمتر از ۲۰ درصد فضای اتاق با سامانه ذخیره-یخ معادل آن برابر است. با توجه به اینکه دسیکنت مایع با هوا در ارتباط است، مواد ریز موجود در هوا نیز همانند بخار آب جدا می‌شوند.

رطوبت‌گیرهای اسپری مایع اغلب به صورت سامانه‌های بزرگ مرکزی نصب می‌شوند تا اینکه به صورت سامانه‌های کوچک مستقل برای فضاهای کوچک استفاده شوند. این تاحدی بدین خاطر است که این سامانه‌ها کمی از سامانه‌های دسیکنت جامد پیچیده‌تر هستند و افزون بر این بدین خاطر است که می‌توان سامانه‌های بزرگ را با چندین قسمت تهویه متصل به یک بازیافت طراحی کرد. این آرایش همانند آرایش سامانه‌های تبرید مکانیکی است که چندین اواپراتور به یک کندانسور متصل می‌شوند. در ساختمان‌های بزرگی که چندین سامانه رطوبت‌گیری دارند، این روش هزینه اولیه کمتری برای سامانه کنترل خواهد داشت.

از جمله معایب بالقوه سامانه‌های اسپری مایع می‌توان به زمان پاسخ، هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه اولیه برای سامانه‌های کوچک‌تر اشاره کرد. به دلیل آنکه محلول دسیکنت در یک سامانه لوله‌کشی طولانی و تشتک بزرگ چرخانده می‌شود، کمی زمان می‌برد تا سامانه به تغییرات سریع بارهای رطوبی فضای داخلی و یا شرایط خروجی مورد نیاز پاسخ دهد؛ همانند آنچه در محفظه‌های شبیه‌سازی محیطی اتفاق می‌افتد. اما پاسخ آهسته به شرایط خروجی به معنای پاسخ آهسته به تغییرات ورودی است که یک مزیت محسوب می‌شود. مقدار زیادی دسیکنت چرخان فضای داخل را در برابر تغییرات ناگهانی هوای محیط حفظ می‌کند.

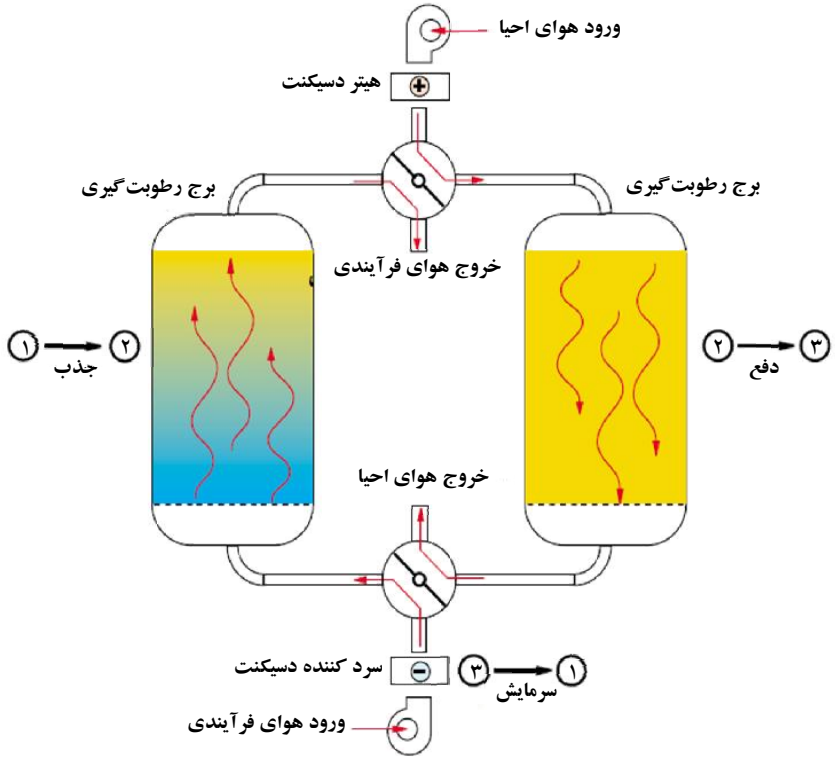
نگهداری این سامانه‌ها متفاوت است، اما برخی از دسیکنت‌های مایع خورنده هستند و بنابراین به مراقبت بیشتری احتیاج دارند. همچنین در سطح رطوبی پایین برخی از دسیکنت‌های مایع سریعا خشک می‌شوند که بدین معنی است که سطح مایع مرتبا باید بررسی شود تا از انجماد دسیکنت جلوگیری گردد.

۳-۲-۲ برج جامد فشرده[1]

در رطوبت‌گیر برج فشرده دسیکنت‌های جامدی چون سیلیکاژل یا غربال‌های مولکولی[2] به یک برج قائم فرستاده می‌شود. هوای فرآیندی در برج جریان یافته و رطوبت خود را به دسیکنت

[1] Solid packed tower
[2] Molecular sieve

خشک می‌دهد. پس از آنکه دسیکنت از رطوبت اشباع شد، هوای فرآیندی به برج دیگری فرستاده می‌شود و در این حال به برج اول گرمادهی می‌شود و رطوبت آن با یک جریان هوای احیا کوچک زدوده می‌شود.

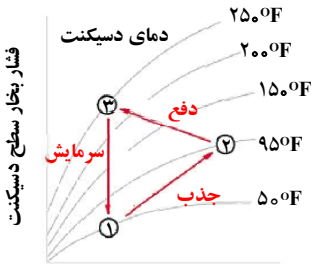


شکل ۳-۱۰

رطوبت‌گیر برج جامد

هوا در محفظه‌های بزرگ حاوی دسیکنت جامد بسیار ریز جریان می‌یابد. پس از آنکه دسیکنت اشباع شد، به کمک یک جریان هوای گرم دیگر خشک می‌شود. از این سامانه اغلب برای رطوبت‌گیری جریان هوای فشرده، گازهای فرآیندهای پرفشار و گاهی نیز مایعاتی که نیاز به رطوبت‌گیری دارند، استفاده می‌شود. این سامانه در فشارهای محیطی کاربرد زیادی ندارد.

انرژی گرمایی مورد نیاز دسیکنت در برج دسیکنت جامد با سرد و گرم کردن هوای فرآیندی و هوای احیا به دست می‌آید. به عبارت دیگر، هنگامی‌که برای افزایش فشار بخار سطح دسیکنت اشباع شده باید به آن گرما داده شود (نقطه ۲ به ۳ روی نمودار تعادل)، این گرما از هوای گرم احیا به دسیکنت داده می‌شود. همچنین هنگامی‌که برای کاهش فشار بخار، دسیکنت باید سرد شود، هوای سرد فرآیندی گرمای دسیکنت را از آن می‌گیرد.



شکل ۳-۱۱

از آنجایی که خشک‌کردن و احیا در دو قسمت کاملا مجزا انجام می‌شود، رطوبت‌گیر برج فشرده اغلب برای رطوبت‌گیری گازهای فرآیندهای پر فشار استفاده می‌شود. البته این آرایش علاوه بر گازها برای رطوبت‌گیری مایع های شیمیایی نیز بکار برده می‌شود. اگر مقدار زیادی دسیکنت در برج استفاده شود، می‌توان به نقطه شبنم پایین، در بسیاری از موارد کمتر از ۴۰°F، دست یافت. رطوبت‌گیرهای دسیکنت برای هوای فشرده اغلب از نوع برج فشرده هستند.

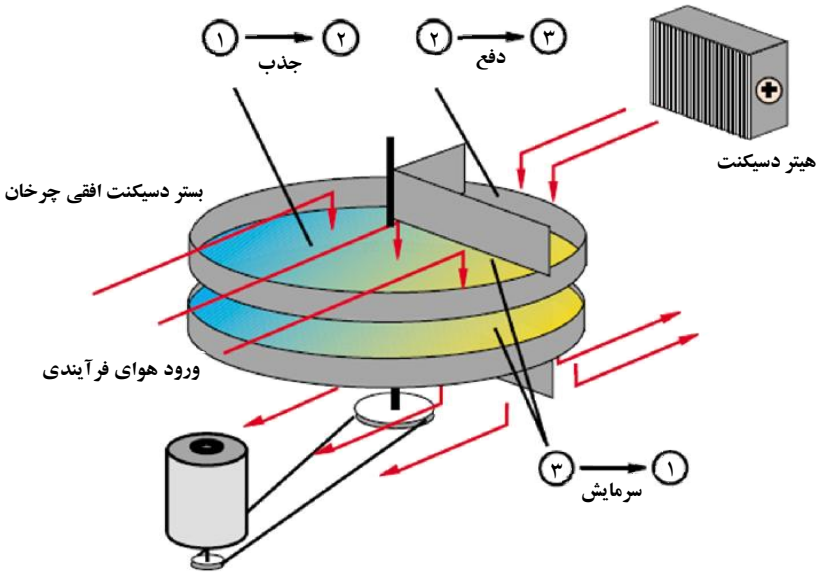
با اینکه این آرایش امکان دستیابی به دمای نقطه شبنم پایین را فراهم می‌کند، اما ممکن است شرایط خروجی این طراحی متغیر گردد. زمانی‌که دسیکنت برای اولین بار در معرض جریان هوای فرآیندی قرار می‌گیرد، می‌تواند هوا را به میزان زیادی خشک کند. پس از آن، هنگامی‌که ظرفیت رطوبت‌گیری آن تکمیل شد، نمی‌تواند رطوبت زیادی از هوا بگیرد. اگر تغییر شرایط خروجی موجب ایجاد مشکلاتی در فرآیند شود، قبل از آنکه هوای فرآیندی بیش از حد مرطوب شود، باید کنترل‌هایی برای حصول اطمینان از تغییر برج اعمال شود.

هنگامی‌که به هوای فرآیندی بیشتری نیاز است، رطوبت‌گیرهای برج فشرده بسیار بزرگ می‌شوند، زیرا عموما سرعت هوا بسیار کم نگه داشته می‌شود. سرعت هوا به دو دلیل کم است؛ سرعت‌های بالا موجب پخش غیر یکنواخت هوا در بستر دسیکنت می‌شود، زیرا هوای مرطوب ممکن است از دسیکنت عبور کند. همچنین سرعت هوا نباید زیاد شود تا از بلند شدن دسیکنت که موجب ضربه به دیگر قطعات و دیواره رطوبت‌گیر می‌شود، جلوگیری گردد. در اثر این ضربات ممکن است دسیکنت از هم گسیخته شود و به صورت گرد و غبار ریز از رطوبت‌گیر خارج شود.

مهندسان باید بدانند که این نوع رطوبت‌گیرها اغلب برای جریان هوای کوچک با دمای نقطه شبنم پایین و خشک‌کردن گازها کاربرد دارد. در این شرایط این روش مزایای زیادی دارد که معایب سایز بزرگ و مصرف انرژی زیاد را که در جریان هوای بزرگ، دمای نقطه شبنم بالاتر و یا در کاربردهای فشارهای محیطی ظاهر می‌شوند، جبران می‌کند.

۳-۲-۳ بستر افقی چرخان[1]

در این دستگاه بلورهای خشک دسیکنت در مجموعه‌ای از سینی[2]های کم‌عمق و متخلخل قرار دارند که دائما بین هوای فرآیندی و هوای احیا چرخانده می‌شوند. هنگامی که سینی‌ها در هوای فرآیندی می‌چرخند، دسیکنت رطوبت هوا را جذب می‌کند. پس از آن سینی‌ها در جریان هوای احیا می‌چرخند که این کار باعث گرم شدن و بالا رفتن فشار بخار سطح دسیکنت شده و رطوبت از آن به هوا منتقل می‌شود.

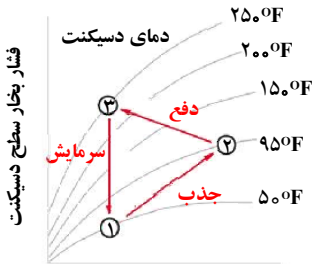


شکل ۳-۱۲

بسترهای افقی چرخان

سینی‌های حاوی دسیکنت خشک به آرامی در جریان هوای فرآیندی و هوای احیا چرخانده می‌شوند. اگرچه باید از نشت هوا بین جریان هوای خشک و هوای مرطوب جلوگیری شود، اما این روش هزینه تولید بسیار کمی دارد.

همانند روش برج فشرده در این روش نیز هوای فرآیندی و هوای احیا موجب سرد و گرم شدن دسیکنت و انجام چرخه جذب و دفع می‌شوند. در سمت هوای فرآیندی دسیکنت خشک است، زیرا به تازگی هوای احیا را ترک کرده است. اما دسیکنت به دلیل فرآیند احیا همچنان گرم است. دسیکنت به کمک هوای فرآیندی طی چند درجه اول چرخش سرد می‌شود. این فرآیند مطابق تغییر از نقطه ۳ به نقطه ۱ بر روی نمودار تعادل است. سپس دسیکنت باقیمانده هوای فرآیندی را خشک می‌کند و رطوبت آن را می‌گیرد؛ که از نقطه ۱ به نقطه ۲ بر روی نمودار است. با چرخش سینی‌ها درون هوای گرم احیا، به دسیکنت گرما داده می‌شود و دسیکنت رطوبت خود را از دست می‌دهد که مطابق نقطه ۱ به نقطه ۲ بر روی نموار تعادل است.



شکل ۳-۱۳

طراحی سامانه مدولار است. برای افزایش ظرفیت، سازندگان هم می‌توانند قطر سینی‌های چرخان را افزایش دهند که در نتیجه می‌توانند دسیکنت بیشتری را در خود نگه دارند و هم می‌توانند تعداد سینی‌هایی که بر روی یکدیگر قرار داده شده‌اند را زیاد کنند. اگر بار رطوبی یکنواختی به دسیکنت‌های درون سینی‌ها داده شود، رطوبت‌گیرهای بستر افقی چرخان سطح رطوبت خروجی تقریبا ثابتی را فراهم می‌آورند و جریان هوای خروجی آن نیز نسبت به رطوبت‌گیرهای برج دوگانه بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، از آنجا که سینی‌ها هیچ‌گاه به طور کامل پر نمی‌شوند، در حالی که دسیکنت در حال کار است، از جریان هوای مرطوب احیا به

[1] Rotating horizontal bed
[2] Tray

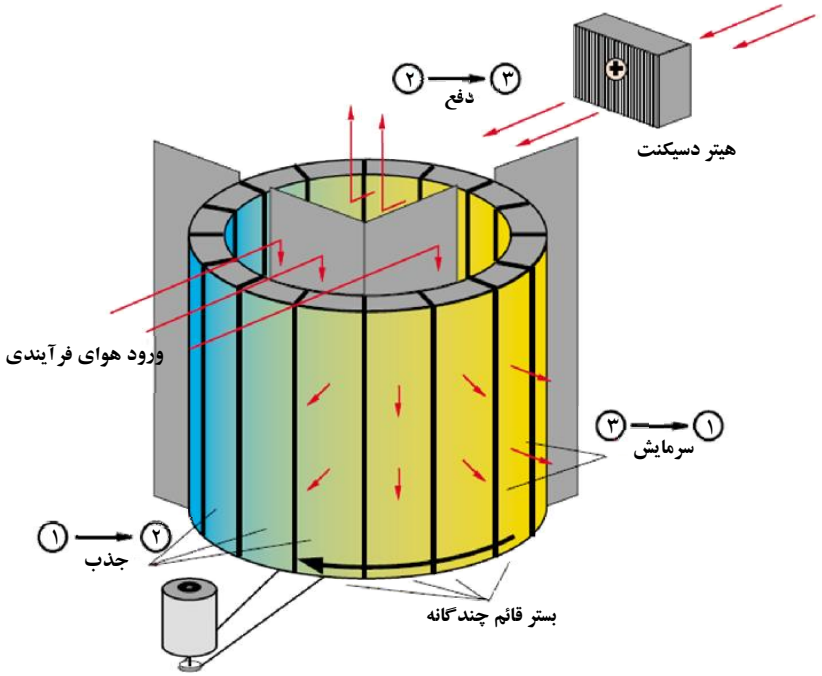
جریان هوای خشک فرآیندی در هر سینی از بالای دسیکنت مقداری هوا نشت می‌کند.

برای جلوگیری از این نشت هوا، در طراحی بستر چرخان عموما جریان هوای فرآیندی و هوای احیا را به صورت موازی، نه بر عکس، قرار می‌دهند. این عمل باعث می‌شود فشار بین هوای فرآیندی و احیا برابر شود که موجب کاهش نشت و بهبود عملکرد رطوبت‌گیر می‌شود. البته این تکنیک محدودیت دارد و چنین رطوبت‌گیرهایی به شرایط رطوبی ورودی به بخش احیا نسبت به طراحی‌های دیگر بسیار حساس‌تر هستند. همچنین آرایش موازی جریان‌های هوای فرآیندی و احیا نسبت به آرایش معکوس آن‌ها انرژی بیشتری صرف می‌کند. در نتیجه مصرف انرژی احیا برای این رطوبت‌گیرها می‌تواند از دیگر روش‌ها بسیار بیشتر باشد.

بر خلاف این محدودیت‌ها، رطوبت‌گیر بستر افقی چرخان هزینه اولیه کمی دارد. طراحی آن ساده و قابل بهبود است و به راحتی تولید می‌شود. اگرچه ممکن است دسیکنت از هم گسیخته شده و وارد جریان هوا شود، اما می‌توان به راحتی بسترها را بیرون آورده و مجددا آن‌ها را با دسیکنت پر کرد. در شرایطی که هزینه انرژی بالا نیست و یا جایی که هزینه آن زیاد نمی‌شود، به عنوان مثال برای رطوبت‌گیرهای کوچک، هزینه اولیه این رطوبت‌گیرها ممکن است هزینه‌های بهره‌برداری زیادشان را جبران کند.

۳-۲-۴ بستر قائم چندگانه

در سال‌های اخیر سازندگان خصوصیات خوب رطوبت‌گیرهای برج فشرده و بستر افقی چرخان را در یک آرایش ترکیب کرده‌اند که این طراحی هم در فشارهای محیطی به خوبی کار می‌کند و هم با استفاده از آن می‌توان به دمای نقطه شبنم پایین دست یافت. به جای یک یا دو برج از چرخ مدوری دارای هشت برج یا بیشتر که به وسیله یک سامانه کشنده بین هوای فرآیندی و هوای احیا می‌چرخد، استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۴

بسترهای قائم چندگانه

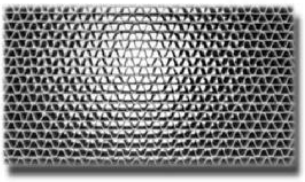
با قرار دادن بسترهای دسیکنت ریز به صورت افقی به جای قرار دادن آن‌ها در سینی‌های تخت، می‌توان از مزایای رطوبت‌گیرهای برج جامد و سینی‌های چرخان استفاده کرد. با اینکه این روش قطعات پیچیده‌تری دارد و هزینه اولیه بیشتری نسبت به رطوبت‌گیرهای بستر قائم چرخان و برج جامد دارد، اما هزینه بهره‌برداری آن بسیار کمتر است و هزینه اولیه را جبران می‌کند.

به دلیل به حداقل رسیدن نشت هوا بین هوای فرآیندی و احیا، در این روش نیز همانند روش برج فشرده می‌توان به دمای نقطه شبنم پایین دست یافت. همچنین چون بسترها کاملا از یکدیگر جدا و درزگیری‌شده هستند، اختلاف فشار بین قسمت فرآیندی و احیا بحرانی نیست و به همین دلیل جریان‌های هوا برای انتقال بهتر حرارت و جرم می‌توانند به صورت برعکس قرار داده شوند. همانند بستر چرخان، با احیای مداوم دسیکنت شرایط رطوبی تقریبا ثابتی در هوای خروجی از قسمت فرآیندی فراهم می‌شود که در نتیجه اثرات دندانه‌ای شدن[1] که در روش برج فشرده اتفاق می‌افتد، کاهش می‌یابد.

با افزایش قابلیت‌ها، هزینه و پیچیدگی این روش نیز بیشتر می‌شود. بنابراین در مقایسه با روش بستر افقی چرخان، بسترهای قائم چندگانه گران‌تر هستند و به نگهداری بیشتری نیاز دارند. هر چند عموما این محدودیت‌ها در مقایسه با صرفه زیاد انرژی و کارایی خوب آن‌ها در نقاط شبنم پایین قابل چشمپوشی است.

۳-۲-۵ شانه زنبوری چرخان

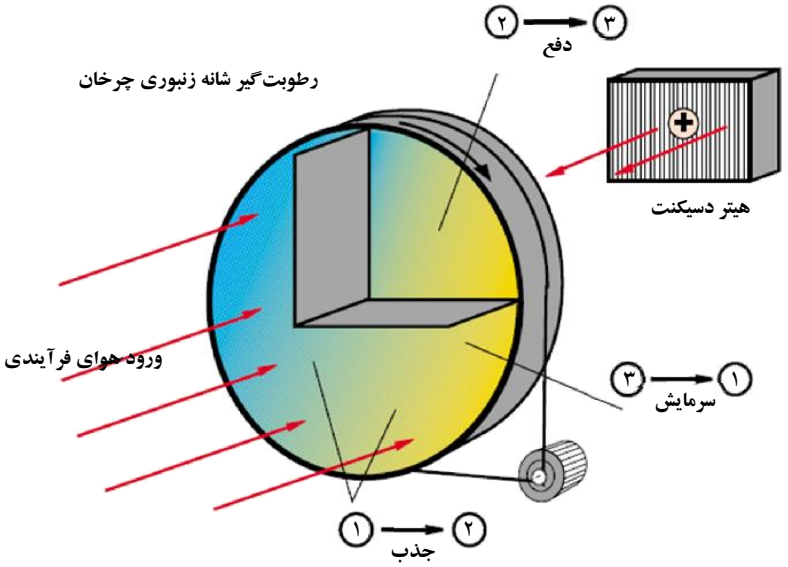
در یک روش دیگر از یک چرخ شانه زنبوری برای چرخاندن دسیکنت بین هوای فرآیندی و هوای احیا استفاده می‌شود. این روش اغلب رطوبت‌گیر DEW نامیده می‌شود. بخش‌های بسیار ریز دسیکنت بر ساختاری شبه-سرامیک که ظاهر آن شبیه کاغذ نازک موج داری که به صورت یک چرخ پیچیده شده است، آغشته می‌شود. چرخ بین هوای فرآیندی و هوای احیا می‌چرخد.



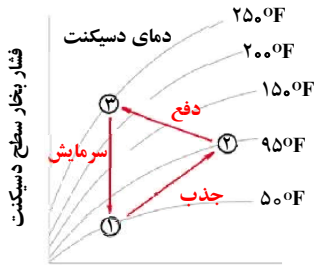
شکل ۳-۱۵

شانه زنبوری چرخان

دسیکنت بر روی یک سازه سبک و سر باز قرار داده می‌شود. در این روش سطح مقطع دسیکنت زیاد و وزن آن کم است که در نتیجه این سامانه بسیار کارآمد است. تعداد کم قطعات مورد نیاز نگهداری را به حداقل می‌رساند.



هوای فرآیندی از شیارهای تعبیه شده عبور کرده و دسیکنت موجود در ساختار، رطوبت آن را جذب می‌کند. با گرفتن رطوبت، دسیکنت اشباع می‌شود و فشار بخار سطح آن افزایش می‌یابد که این فرآیند در نمودار تعادل از نقطه ۱ به نقطه ۲ انجام می‌شود. پس از آن با چرخش چرخ در جریان هوای احیا از هوای گرم احیا به دسیکنت گرما داده می‌شود و فشار بخار سطح آن افزایش می‌یابد و در نتیجه دسیکنت رطوبت خود را به هوای احیا می‌دهد. این فرآیند نیز از نقطه ۲ به نقطه



شکل ۳-۱۶

[1] Sawtooth

۳ بر روی نمودار تعادل اتفاق می‌افتد.

پس از احیا، دسیکنت گرم مجددا وارد هوای فرآیندی می‌شود که بخش کوچکی از هوای فرآیندی دسیکنت را سرد می‌کند و در نتیجه می‌تواند مقدار بیشتری رطوبت از جریان هوای فرآیندی بگیرد. این فرآیند با تغییر از نقطه ۳ به نقطه ۱ بر روی نمودار تعادل نشان داده شده است.

روش شانه زنبوری چرخان مزایای متعددی دارد. ساختار آن بسیار سبک و متخلخل است. هر دو دسیکنت جامد و مایع می‌توانند در این روش استفاده شوند که در نتیجه برای کاربردهای خاص مناسب خواهد بود. با توجه به اینکه برای عبور هوا شیارهایی تعبیه شده است، حتی هنگامی‌که سرعت هوا کم است نیز حداکثر سطح مقطع دسیکنت در معرض هوا قرار می‌گیرد که موجب کاهش مقاومت هوا در مقایسه با روش بسترهای فشرده می‌شود. با ترکیب دسیکنت‌های مختلف در یک چرخ می‌توان همزمان به ظرفیت بالا و دمای نقطه شبنم پایین که دو هدف مهم متقابل بهم هستند، دست یافت. همچنین از آنجایی که جرم دسیکنت چرخان در مقایسه با ظرفیت دفع رطوبت کم است، این روش از لحاظ مصرف انرژی مقرون به صرفه است. این روش بسیار ساده، قابل اعتماد و به راحتی قابل نگهداری است.

یکی از دغدغه‌های طراحی در رطوبت‌گیرهای چرخان هزینه چرخ چرخان است. این ساختار از لحاظ مصرف انرژی مقرون به صرفه است، اما هزینه تولید آن از دسیکنت‌های خشک ریز بیشتر است. همچنین باید دقت شود که چرخ آسیب نبیند. هزینه اولیه این نوع رطوبت‌گیرها مسلما با مزایای عملکردی آن‌ها جبران می‌شود و در کاربردهای در فشار محیطی در بین تمام رطوبت‌گیرها از این روش بیشترین استفاده می‌شود.

۳-۳ مقایسه رطوبت‌گیرهای دسیکنت

همه رطوبت‌گیرهای دسیکنت می‌توانند در کاربردهای مناسب دسیکنت‌ها عمل کنند. محدودیت هر کدام از آرایش‌ها را می‌توان کاهش داد و مزایای هر یک از طراحی‌ها را با روش‌های محتاطانه مهندسی کاربردی بهینه کرد. در مورد محدودیت عملکرد یا مقدار انرژی مصرفی یا قابلیت اطمینان مکانیکی انواع مختلف رطوبت‌گیرها نمی‌توان بدون توجه به شرایط بهره‌برداری به طور قطعی اظهار نظر کرد. تاثیر مهندسی کاربردی در قابلیت اطمینان، کارآمدی و کاهش هزینه اولیه در بهره‌برداری از رطوبت‌گیر از تاثیر انتخاب نوع رطوبت‌گیر بیشتر است.

البته چند سوال اساسی وجود دارد که مهندس باید از تولیدکنندگان سامانه سوال کند که عبارتند از:

۳-۳-۱ هزینه نصب و راه‌اندازی

هزینه رطوبت‌گیر تنها بخش کوچکی از هزینه‌های نصب و راه‌اندازی است. از آنجایی که رطوبت‌گیرهای مختلف به تجهیزات، وسایل و ماشین آلات اضافی متفاوتی همچون آب خنک، فضا و شرایط نگهداری مختلفی نیاز دارند، هزینه رطوبت‌گیر اهمیت کمتری نسبت به هزینه کل نصب و راه‌اندازی دارد.

۳-۳-۲ هزینه بهره‌برداری

هزینه نصب و راه‌اندازی سامانه‌های مکانیکی اغلب در مقایسه با هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری آن‌ها کم است. هزینه عمده و اصلی سامانه‌های رطوبت‌گیری مربوط به گرمایش هوای احیا و سرمایش هوای فرآیندی و دسیکنت است. اگر از منابع ارزان برای این تجهیزات استفاده شود، هزینه نصب آن‌ها حتی در مدت یک ماه جبران می‌شود و بدین ترتیب طی ۱۵ تا ۳۰ سال عمر این دستگاه‌ها منفعت بسیار زیادی حاصل می‌شود.

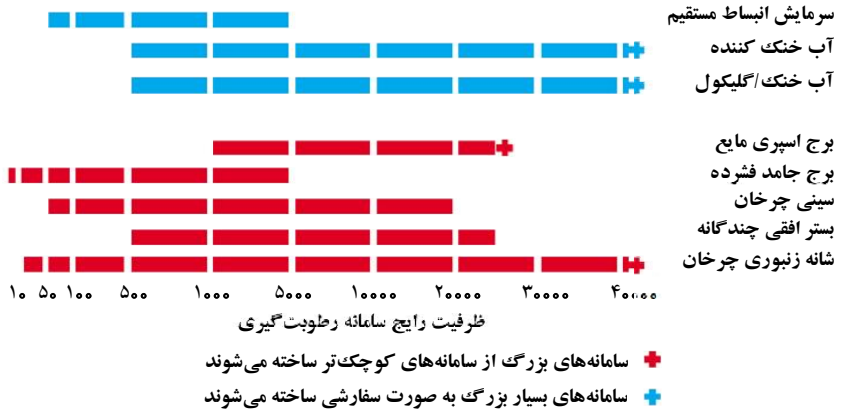
۳-۳-۳ قابلیت اطمینان عملیاتی موجود

هر یک از رطوبت‌گیرها در کاربردهای مختلف عملکرد متفاوتی دارد. اگر نصب‌کننده یا سازنده درک مناسبی از عملکرد هر نوع رطوبت‌گیر در شرایط خاص مورد نظر داشته باشد، مشکلات احتمالی مصرف‌کننده نهایی کمتر خواهد شد. با اینکه شرایط در هر نصب و راه‌اندازی متفاوت است، اما مهندس باید به خوبی عمل کند تا تعداد "مجهولات" پروژه او محدود شود.

۳-۳-۴ فرض‌های طراحی

مهندسان و سازندگان مختلف فرضیات متفاوتی در مورد یک کاربرد خاص در نظر می‌گیرند. انتخاب تجهیزات و ابعاد آن‌ها کاملا به این فرضیات بستگی دارد. اغلب، این انتخاب‌های مختلف نتیجه ارائه اطلاعات ناقص یا غلط به طراح سامانه است.

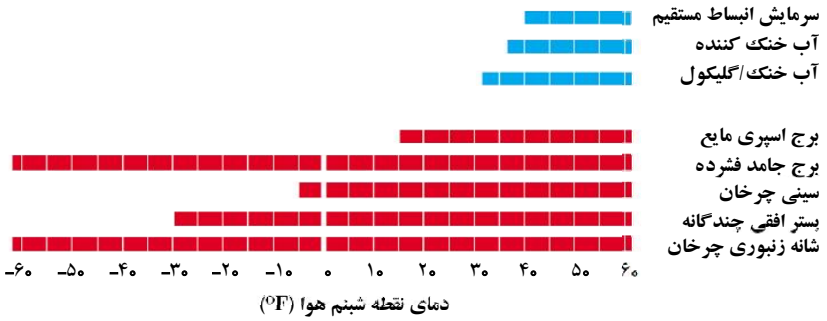
بررسی انواع مختلف رطوبت‌گیر از یک منظر بسیار دشوار است، زیرا در برخی شرایط خاص اظهار نظر جامع در مورد مقایسه دقیق رطوبت‌گیرها غیر ممکن است. با توجه به این موضوع تصاویر زیر برای نشان دادن ارتباط کلی انواع رطوبت‌گیرها آمده است.



شکل ۳-۱۷

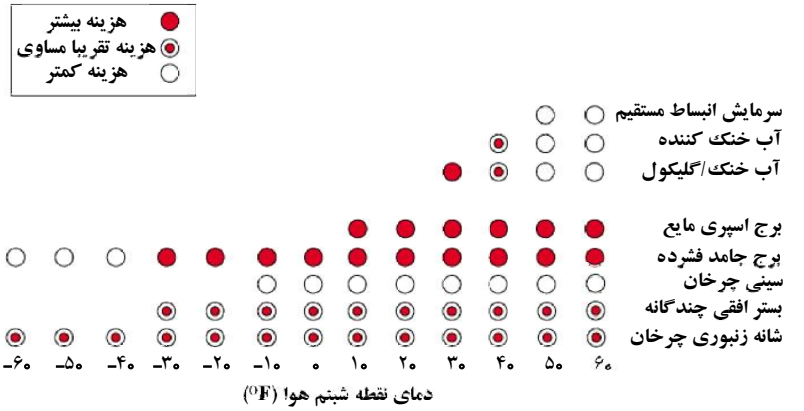
در میان رطوبت‌گیرهای سرمایشی، سامانه‌های DX عموما در اندازه‌های کوچک موجود هستند، در صورتی که رطوبت‌گیرهای آب خنک بیشتر برای زمانی که جریان هوای بسیار بزرگ باید رطوبت‌گیری شود، رایج هستند. در میان رطوبت‌گیرهای دسیکنت، از روش اسپری مایع عموما در اندازه‌های بزرگ و از رطوبت‌گیر برج فشرده در اندازه‌های کوچک استفاده می‌شود. همچنین روش شانه زنبوری در تمام اندازه‌ها قابل استفاده است. برای اندازه‌های بزرگ‌تر از شکل نشان داده شده، سازندگان ترکیبی از رطوبت‌گیرها را بکار می‌برند. سامانه‌های رطوبت‌گیری برای

رطوبت‌گیری از ۲۵۰۰۰۰cfm هوا کاملا رایج هستند.



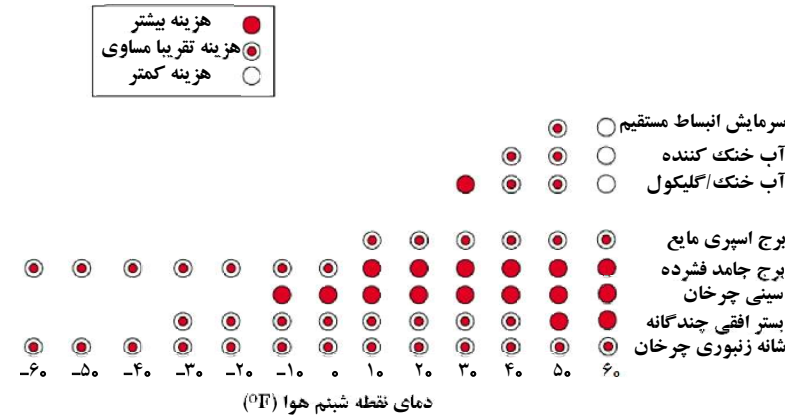
شکل ۳-۱۸

همانطور که شکل بالا نشان می‌دهد، رطوبت‌گیرهای سرمایشی اغلب برای رطوبت‌گیری در سطح رطوبت بالا و سامانه‌های دسیکنت در سطح رطوبت پایین استفاده می‌شوند. شکل‌های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ رابطه کلی میان هزینه روش‌های رطوبت‌گیری نسبت به رطوبت‌گیر شانه زنبوری نشان می‌دهند. هر چند در هر مورد خاص ممکن است رابطه میان هزینه‌ها با الگوهای زیر کاملا متفاوت باشد.



شکل ۳-۱۹

هزینه نصب و راه‌اندازی سامانه در مقایسه با رطوبت‌گیر شانه زنبوری



شکل ۳-۲۰

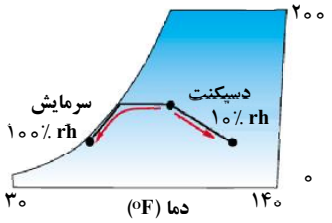
هزینه بهره‌برداری برای دفع بخار آب در مقایسه با رطوبت‌گیر شانه زنبوری

۳-۴ انتخاب بین رطوبت‌گیرهای سرمایشی و دسیکنت

در بسیاری از شرایط هر دو روش رطوبت‌گیری سرمایشی و دسیکنت می‌توانند رطوبت‌گیری انجام دهند، اما این سوال پیش می‌آید که از کدام نوع رطوبت‌گیر استفاده شود؟ همانند انتخاب میان رطوبت‌گیرهای دسیکنت، برای این سوال نیز جواب‌های ساده‌ای وجود ندارد، اما چندین

دستورالعمل در این مورد وجود دارد:

- سامانه‌های رطوبت‌گیری سرمایشی و دسیکنت هنگامی‌که با هم استفاده شوند، بیشترین صرفه اقتصادی را در پی خواهند داشت. زیرا این دو روش مکمل یکدیگرند و نقاط قوت هر کدام نقاط ضعف دیگری را پوشش می‌دهد.
- تفاوت هزینه برق و هزینه گرمای مصرفی تعیین‌کننده ترکیب بهینه سامانه‌های رطوبت‌گیری سرمایشی و در یک شرایط خاص خواهد بود. در صورتی که انرژی گرمایی ارزان و هزینه برق زیاد باشد، روش رطوبت‌گیری دسیکنت برای گرفتن بخش بیشتر رطوبت مقرون به صرفه است. اگر انرژی گرمایی پرهزینه‌تر از برق باشد، استفاده از رطوبت‌گیرهای سرمایشی ارجحیت دارد.
- در دما و رطوبت بالا رطوبت‌گیرهای سرمایشی بسیار به صرفه‌تر از رطوبت‌گیرهای دسیکنت هستند. در دمای نقطه شبنم کمتر از $40^{o}F$، به ندرت از رطوبت‌گیرهای سرمایشی استفاده می‌شود، زیرا آب چگالیده‌شده بر روی کویل‌ها یخ می‌زند و موجب کاهش ظرفیت رطوبت‌گیری می‌شود.
- وقتی از دسیکنت‌ها برای تنظیم هوای تهویه در سامانه‌های HVAC ساختمان دارای مخزن یخ استفاده شود، مزایای چشمگیری می‌تواند داشته باشد. با توجه به اینکه این سامانه‌ها هوایی با نقطه شبنم پایین (۴۰ تا $45^{o}F$) ایجاد می‌کنند، رطوبت‌گیری هوای تازه به کمک رطوبت‌گیر دسیکنت هزینه نصب سامانه سرمایشی را کاهش می‌دهد و افت فشار بخش مایع را برطرف می‌کند. این عمل موجب کاهش چشگیر هزینه فن و پمپ می‌شود.
- رطوبت‌گیرهای دسیکنت به طور ویژه برای رطوبت‌گیری و ایجاد رطوبت نسبی کم و رطوبت‌گیرهای سرمایشی برای رطوبت‌گیری تا شرایط اشباع مناسب هستند. اگر نیاز است هوای خروجی از هوای ورودی خشک‌تر ولی همچنان به شرایط اشباع نزدیک باشد، رطوبت‌گیری سرمایشی مناسب‌تر خواهد بود. اما اگر هوای خروجی با شرایط دور از حالت اشباع (رطوبت نسبی کم) مورد نیاز است، رطوبت‌گیر دسیکنت مطلوب خواهد بود.



شکل ۳-۲۱

مقایسه رطوبت‌گیری سرمایشی و دسیکنت

شرایط هوای خروجی از کویل سرمایشی نزدیک به شرایط اشباع (رطوبت نسبی ۱۰۰٪) است. دسیکنت هوای کاملا خشک با رطوبت نسبی بسیار کم تولید می‌کند. با توجه به اینکه هوای خروجی چقدر باید به شرایط اشباع نزدیک باشد، هر یک از سامانه‌های بالا مزایای خود را دارند.

این دو فناوری در کنار هم بسیار کارآمدتر عمل می‌کنند و در این صورت مزایای یکی از آن‌ها معایب دیگری را پوشش می‌دهد.

۴ کاربردها

رطوبت‌گیرهای دسیکنت کاربردهای بسیار متنوعی دارند. این تجهیزات می‌توانند تاثیرات بسیار مثبتی داشته باشند:

- هنگامی‌که هوای خشک در معرض قالب‌های ریخته‌گری قرار گیرد، می‌توان سرعت تولید بطری‌های پلاستیکی را تا دو برابر افزایش داد. بدین معنی است که یک کارخانه می‌تواند به اندازه دو کارخانه تولید کند که نتیجه آن صرفه‌جویی میلیون‌ها دلاری برای ساخت کارخانه و ماشین‌آلات جدید است.
- رطوبت‌گیرهای دسیکنت امکان حفظ نقاشی ارزشمند لئوناردو داوینچی، شام آخر، را از آلودگی‌های شهری و رطوبت هوا و نگهداری آن برای نسل‌های آینده فراهم آوردند.
- کابل‌های پل‌های معلق در تماس با قسمت‌های بتونی نگهدارنده خورده می‌شوند. بدون استفاده از رطوبت‌گیرها کابل‌های اصلی را باید تعویض کرد که میلیون‌ها دلار هزینه و ترافیک زیادی بر روی برخی از شلوغ‌ترین پل‌های رودخانه‌ای جهان در پی خواهد داشت.
- بدون رطوبت‌گیرها امکان تولید باتری‌های لیتیمی که انرژی بسیاری از تجهیزات همچون وسایل تنظیم کننده ضربان قلب که صدها هزار نفر از مردم را زنده نگه می‌دارند، نخواهد بود.

در این فصل با هدف تحریک افکار مهندسان خلاق و اطمینان بخشیدن به کسانی که فکر می‌کنند آن‌ها برای اولین بار چنین کاربردهایی را تجربه می‌کنند، به بررسی شش دسته عمده و اصلی از کاربردهای رطوبت‌گیری می‌پردازیم. جدا کردن رطوبت اضافی از هوا می‌تواند نتایج بسیار جالب و سودمندی داشته باشد.



۴-۱ جلوگیری از خوردگی

همه مواد خورده می‌شوند که می‌توان گفت هر ماده‌ای در نهایت از یک شکل به شکل دیگری طی واکنش شیمیایی تغییر می‌کند. بسیاری از این واکنش‌ها، خصوصا واکنش‌هایی که به اکسیژن بستگی دارند، در صورت وجود رطوبت با سرعت بیشتری انجام می‌شوند.

فلزاتی همچون آهن و فولاد به علت خوردگیشان در معرض رطوبت شناخته‌شده هستند. واقعیت ناشناخته این است که شیشه با نرخی متناسب با رطوبت موجود بر روی سطح آن خورده شده و ترک برمی‌دارد. کریستال‌های خالصی مانند سدیم یدید و لیتیم فلورایـد نیز با رطوبت موجود در هوای اطراف خورده شده و تشکیل اکسید و هیدروکسید می‌دهند. در گذشته ده‌ها هزار نوع رطوبت‌گیر دسیکنت برای پوشاندن تجهیزات و ایجاد هوای خشک به منظور جلوگیری از خوردگی زیاد مواد آهنی استفاده شده است.

در حال حاضر رطوبت‌گیرها برای محافظت از مواد در برابر شکل‌های ظریف‌تر و پرهزینه‌تر خوردگی استفاده می‌شوند. جامعه پیشرفته امروزی به تجهیزاتی مانند کامپیوترها، ارتباط از راه دور، مواد کامپوزیتی سبک وزن و باتری‌های پر انرژی بسیار وابسته است. با این‌که این تجهیزات کمتر در معرض زنگ زدن قرار دارند، اما بسیار به خوردگی در سطح میکروسکوپی حساس هستند. در مدارهای این تجهیزات مواد زیادی بکار نرفته است و به همین دلیل خوردگی بسیار کم نیز مشکلات زیادی ایجاد می‌کند. سامانه‌های دسیکنت با جلوگیری از زنگ زدن و خوردگی تجهیزات موجب صرفه‌جویی صدها میلیون دلاری برای مالکان در هر سال خواهند شد.

کاربردهای رایج

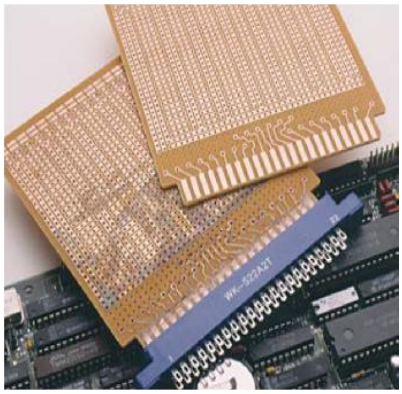
- لی‌آپ دکل حفاری دریایی
- لی‌آپ کارخانه صنعتی
- ذخیره‌سازی آهن گالوانیزه
- حفاظت از تیرهای پل‌ها
- ذخیره‌سازی بلبرینگ
- مراکز کنترل موتور SCR
- ذخیره‌سازی روتور ژنراتور
- اندود کریستالی سدیم یدید
- لی‌آپ مخزن نفت
- حفاظت از قالب‌های خودروها
- حفاظت از قطعات الکترونیکی هواپیمای نظامی
- حفاظت از خوردگی هواپیمای غیر نظامی
- ساخت فلزات کلسیمی
- ذخیره‌سازی رایانه
- سالن کارخانه تولید لوله
- حفاظت از قایق‌های بادبانی
- حفاظت از مکانیزم قفل کانال
- ایستگاه پمپاژ
- حفاظت از بویلر
- تانک‌های نظامی
- ذخیره‌سازی بالگرد
- ذخیره‌سازی زباله‌های هسته‌ای
- ذخیره‌سازی ابزار دقیق
- ذخیره‌سازی مهمات
- ذخیره‌سازی سیم و تورهای ماهیگیری
- تولید تیغه صورت تراشی
- مهار تریتیم

۴-۱-۱ انبار تجهیزات نظامی



در دهه ۱۹۵۰ پس از جنگ کره، ارتش ایالات متحده آمریکا از انبارهای هوای خشک برای حفاظت طولانی مدت از کشتی‌ها، ماشین‌آلات و سلاح‌های غیر فعال استفاده کرد. این روش موجب جلوگیری از هزینه‌های میلیون‌ها دلاری برای حفاظت از این تجهیزات شد. در دهه ۱۹۷۰ گروه نظامی اروپا، به ویژه در سوئد و دانمارک، برای حفاظت و نگهداری از تجهیزات نظامی فعال با استفاده از تجهیزات دسیکنت پیشقدم شدند. در حال حاضر ده‌ها هزار رطوبت‌گیر در سراسر دنیا از تجهیزات نظامی گران‌قیمت محافظت می‌کنند و موجب کاهش شدید هزینه‌های نگهداری و افزایش آمادگی نظامی هواپیماها، تانک‌ها، کشتی‌ها و تدارکات می‌شوند.

۴-۱-۲ حفاظت از قطعات الکترونیکی



رایانه‌ها و دیگر تجهیزات الکترونیکی برای انجام وظایف خود به ولتاژها و جریان‌های کم نیاز دارند. تشکیل لایه کوچکی از خوردگی بر روی مدارهای الکترونیکی این تجهیزات موجب افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش ظرفیت خازن می‌شود که بر عملکرد و تنظیمات آن‌ها به شدت تاثیر می‌گذارد. همچنین، هنگامی که تجهیزات الکترونیکی به سرعت سرد و گرم می‌شوند، مانند زمانی که هواپیمای سرد وارد هوای گرم و مرطوب فرودگاه می‌شود، امکان چگالش و خوردگی وجود دارد. رطوبت‌گیرها از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری می‌کنند و زمان لازم برای کالیبراسیون و فاصله متوسط بین خرابی‌های سامانه‌های الکترونیک را افزایش می‌دهند.

۴-۱-۳ لی‌آپ[1] نیروگاه‌ها



هنگامی که فعالیت نیروگاه برای تعمیرات و یا به دلیل ظرفیت بیش از حد ژنراتورها متوقف شده است، رطوبت‌گیرها برای دمیدن هوای خشک هم به بخش بخار و هم به سیم‌پیچ‌های ژنراتور راه‌اندازی می‌شوند. این کار نسبت به اندودکردن با نیتروژن بسیار امن‌تر و کم‌هزینه‌تر است و از لی‌آپ آن‌ها به کمک بازدارنده‌های خوردگی و یا با استفاده از گریس نیز به مراتب موثرتر خواهد بود. لی‌آپ با هوای خشک بسیار ساده است و نیروگاه می‌تواند به جای چند هفته طی چند روز به فعالیت بازگردد.

۴-۱-۴ تولید باتری‌های لیتیمی



لیتیم، پالادیم[2] و دیگر فلزات پر انرژی خطرناک هستند؛ زیرا هنگامی که آن‌ها با بخارآب هوای جو خورده می‌شوند، مشتعل می‌گردند. رطوبت‌گیرها امکان کار با چنین فلزاتی در هوای آزاد را فراهم می‌آورند. واحدهای دسیکنت می‌توانند فضاهای بزرگ تولیدی با تعداد افراد زیاد را تا رطوبت نسبی کمتر از یک درصد خشک کنند. این کار موجب دوام اقتصادی صنعت تولید باتری‌های لیتیمی در مقیاس بزرگ می‌شود. بدون استفاده از رطوبت‌گیرهای دسیکنت باتری‌های لیتیمی بسیار گران و کمیاب و با اهداف خاص می‌شدند.

---

[1] Layup

[۲] توضیح مترجم: نویسنده به جای پالادیم به اشتباه "پلوتونیم" نوشته است.



۲-۴ جلوگیری از چگالش

هنگامی‌که سطوح سرد با هوای مرطوب احاطه می‌شود، بخار آب بر روی سطوح چگالیده می‌شود؛ همانند آنچه در تابستان روی لیوان آب سرد اتفاق می‌افتد. این اتفاق موجب ایجاد مشکلات بسیاری می‌شود. برای مثال ممکن است مشتریان در یک سوپرمارکت قادر به دیدن مواد غذایی منجمد در یخچال‌هایی که درب شیشه‌ای دارند، نباشند. این موضوع ممکن است موجب از دست رفتن درآمد سوپرمارکت شود. همچنین با فرود هواپیما از هوای سرد بالا به هوای مرطوب پایین، چگالش می‌تواند بر روی قسمت‌های پنهان هواپیما رخ دهد که موجب تشدید تنش خوردگی و در نتیجه کاهش عمر بدنه می‌شود. در هر دو مورد از رطوبت‌گیرها برای پوشاندن سطوح سرد با هوای خشک استفاده می‌شود.

اغلب کنترل چگالش نه تنها از بروز مشکلات جلوگیری می‌کند، بلکه فرصت‌های اقتصادی نیز به وجود می‌آورد. برای مثال در بیشتر فرآیندهای تولیدی از غلتک‌های سرد برای سردکردن یا پوشاندن لایه‌های نازک استفاده می‌شود. با پوشاندن سطح غلتک‌ها با هوای خشک، دمای خنک‌کننده بدون ایجاد چگالش روی سطوح می‌تواند بسیار پایین‌تر باشد. این بدین معنی است که می‌توان محصول را سریع‌تر سرد کرد که در نتیجه شاید نیازی به ماشین دیگری نباشد.

کاربردهای رایج

- پرداخت نوری
- یخچال‌های ویترینی
- شبیه‌سازی محیطی
- جعبه دنده‌های بزرگ
- ایجاد خلاء زیاد
- غلتک تولید آدامس توپی
- غلتک‌های سرد برای ریخته‌گیری لایه‌ای
- کف انبارهای سرد
- سرمایش برای شبیه‌سازی ارتفاع
- اتاق دریافت محصولات سرد
- پوشش‌دهی نوار ماشین تحریر
- ذخیره‌سازی میوه و سبزی
- ذخیره‌سازی سنگ

۴-۲-۱ میدان‌های یخ‌بازی



دمای یخ از دمای نقطه شبنم هوای اطراف کمتر است و رطوبت بر روی سطوح یخی چگالش می‌کند. این موضوع موجب نرم و زبر شدن یخ می‌شود و در این صورت سامانه تبرید برای نگهداری یخ در شرایط مناسب برای اسکیت بازی باید به سختی کار کند. از رطوبت‌گیر برای جدا کردن رطوبت قبل از اینکه چگالیده شود، استفاده می‌شود. این کار هزینه بهره‌برداری سامانه‌های تبرید را به اندازه هزاران دلار در سال کاهش می‌دهد. هوای خشک از خطر یخ‌زدگی اطراف زمین جلوگیری می‌کند و خوردگی سازه‌ها نیز رفع می‌گردد. رطوبت‌گیرها موجب صرفه اقتصادی در هوای گرم می‌شوند و ایمنی ساختمان‌ها را در هوای سرد افزایش می‌دهند.

۴-۲-۲ ایستگاه‌های تصفیه آب



دمای آب‌های زیرزمینی و دریاچه ها اغلب از دمای نقطه شبنم هوای اطراف پایین‌تر است که موجب چگالش بر روی لوله‌ها، شیرها و کنترل کننده‌های ایستگاه تصفیه آب می‌شود. با فراهم کردن هوای خشک در این ایستگاه‌ها می‌توان از چگالش آب که موجب رشد قارچ و کپک می‌شود و همچنین از زنگ‌زدگی شیرها و کنترل کننده‌ها جلوگیری کرد. هزینه رطوبت‌گیر در مقابل هزینه‌های رنگ‌کردن کنترل کننده‌ها و شیرها و یا تعویض آن‌ها به مراتب کمتر است. افزون بر این، اهمیت مزایای بهداشتی این کار در از بین قارچ‌ها و کپک‌ها به دلیل حساسیت مصرف‌کنندگان به کیفیت آب مصرفی افزایش یافته است.

۴-۲-۳ آماده‌سازی و پوشش‌دهی سطح

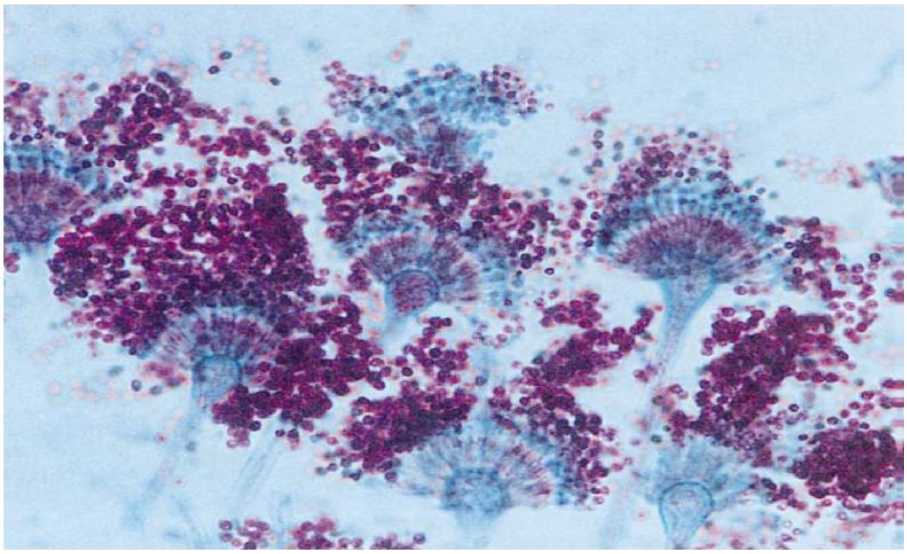


سطوح فلزی بزرگ و سرد، مانند فضاهای داخلی کشتی و مخازن ذخیره مواد شیمیایی، باید مرتب پوشش‌دهی شوند. سازندگان پوشش‌ها تا وقتی که پیمانکار اثبات نکرده است که سطوح در هنگام پوشش‌دهی کاملا تمیز و خشک بوده‌اند، عمر پوشش‌دهی را تضمین نخواهند کرد. پیمانکاران از رطوبت‌گیرهای دسیکنت استفاده می‌کنند تا بدون در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی بتوانند پوشش‌دهی سطوح را انجام دهند. هوای خشک به آن‌ها اجازه می‌دهد که سطوح تمیز را به طور نامحدود از چگالش حفظ کنند که به معنی این است که آن‌ها می‌توانند انجام پوشش‌دهی را به طوراقتصادی‌تری برنامه‌ریزی کنند. رطوبت‌گیرها امکان ایجاد پوشش‌های بهتر برای مصرف‌کنندگان نهایی و هزینه‌های کمتر برای پیمانکاران فراهم می‌آورند.

۴-۲-۴ قالب‌گیری تزریقی



اغلب قالب‌های تزریقی در معرض آب خنک قرار داده می‌شوند تا قسمت‌های پلاستیکی آن‌ها سریع سرد شوند. اما اگر بر روی سطح قالب سرد چگالش رخ دهد، سطح پلاستیک آسیب می‌بیند و مقاومت قطعه طی فرآیند حرارتی کاهش می‌یابد. رطوبت‌گیرها سطح قالب را با هوای خشک می پوشانند که چگالش را رفع می‌کنند. دمای آب خنک نیز کاهش می‌یابد که به معنی کاهش زمان چرخه تولید خواهد بود. از آنجا که زمان کار کردن ماشین‌ها هزینه اصلی در بازارهای رقابتی قالب‌گیری پلاستیک است، سرعت بیشتر به دلیل خشک بودن قالب‌ها مزایای رقابتی بسیار مهمی را برای تولیدکنندگان فراهم می‌آورد.



۳-۴ جلوگیری از رشد قارچ‌ها

قارچ‌ها و کپک‌ها تقریبا در تمام مواد وجود دارند. آن‌ها حتی در نبود رطوبت تا چندین دهه و حتی چندین قرن دوام می‌آورند. اما زمانی که مواد غذایی و رطوبت فراهم شود، آن‌ها به سرعت شروع به تکثیر کرده و چندین برابر می‌شوند. نیازی به رطوبت در شکل مایع نیست. موجودات زنده بسیار ریز از رطوبت بسیار کم موجود در مواد جامد نیز تغذیه می‌کنند، زیرا آن‌ها به مقدار رطوبت بسیار کمی نیاز دارند.

نقاشی‌های موجود در غار تاریخی لسکاکس[1] فرانسه و مصنوعات حفظ شده در اهرام مصر دو نمونه بارز از این پدیده هستند. نقاشی‌های موجود در غار بیش از ۱۶۰۰۰ سال تقریبا دست‌نخورده باقی مانده بود. سپس با حضور گردشگران در غار رطوبت موجود در لباس و حاصل از تنفس آن‌ها وارد غار شد. به نقاشی‌ها آسیب بسیار شدیدی به دلیل حملات میکروبی در کمتر از ۴۰ سال وارد شده است. برای مصنوعات مصری نیز مشکل مشابهی به وجود آمد که نتایج بسیار زیانباری را برای تاریخ به همراه آورده است.

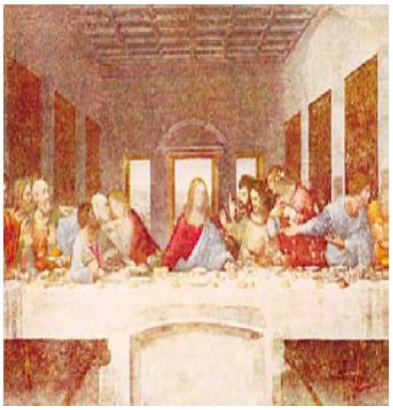
حتی فلزات نیز به طور غیر مستقیم مورد حمله برخی باکتری‌های خاص قرار می‌گیرند. نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا هزینه‌های صدها هزار دلاری جهت تعمیر خرابی کف کشتی‌ها ناشی از خوردگی حاصل از اسیدهای سوخت و ساز متابولیسمی این باکتری‌ها متحمل شده است.

کاربردهای رایج

- ذخیره‌سازی دانه‌ها
- ذخیره‌سازی پیاز گل لاله
- بهداشت کاخانه مواد غذایی
- ذخیره‌سازی رشته‌های طناب
- حفاظت ساختمان‌های تاریخی
- ذخیره‌سازی فیلم‌های عکاسی
- حفاظت از مجسمه‌های چوبی
- ذخیره‌سازی پوشاک خزدار
- ذخیره‌سازی دانه کاکائو
- ذخیره‌سازی ماهی‌های خشک
- حفاظت از ماده مومیایی شده
- ذخیره‌سازی شراب
- ذخیره‌سازی زیرزمینی غذا
- ذخیره‌سازی پودر شیر
- ذخیره‌سازی آبجو
- موزه‌ها
- حفاظت از کلبه تابستانی در زمستان
- حفاظت از کلبه زمستانی در تابستان
- ذخیره‌سازی پارچه و منسوجات

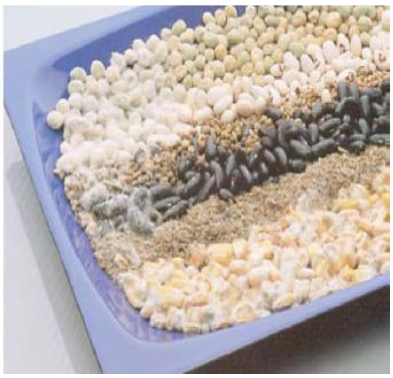
[1] Lascaux

۴-۳-۱ انبارهای بایگانی



اسناد تاریخی، عکس‌ها و کارهای هنری اغلب از مواد آلی ساخته شده‌اند و جاذب رطوبت هستند. هنگامی که این وسایل رطوبت را به خود جذب می‌کنند، موجودات زنده بسیار ریز شروع به تکثیر کرده و موجب آسیب آن‌ها می‌شوند. از رطوبت‌گیرها به منظور ایجاد شرایط رطوبت نسبی کم به منظور جلوگیری از حملات میکروبی استفاده می‌شود. افزون بر این، هوای خشک امکان ذخیره این اشیا را در بیرون از فضای کنترل‌شده دمایی فراهم می‌آورد که موجب کاهش هزینه‌های ساختمانی و گرمایشی می‌شود. بسیاری از کاخ‌ها در بریتانیا و کلیساهای دانمارک نیازی به گرمایش و سرمایش ندارند که موجب کاهش بسیار زیاد هزینه‌های بهره‌برداری و تجهیزات می‌شود.

۴-۳-۲ ذخیره‌سازی بذرها



همه مواد آلی در معرض آسیب باکتری‌ها قرار دارند، اما بذرها حساسیت بیشتری دارند. این مواد از لحاظ مکانیکی بسیار محکم هستند، اما هنگامی که رطوبت آن‌ها زیاد باشد، میکروب‌ها می‌توانند تکثیر شوند و از مواد مغذی آن‌ها تغذیه کنند. رطوبت‌گیرها از بذرهای نادر مورد استفاده در تحقیقات علمی و ارزش غذایی دانه‌ها در کاربردهای تجاری محافظت می‌کنند. در کشورهای در حال توسعه بالغ بر ۳۰ درصد از کل محصولات موجود در انبار از بین می‌رود. با جلوگیری از این میزان اتلاف غذایی تاثیر استفاده از رطوبت‌گیرها مشابه ۳۰ درصد افزایش میزان تولید است.

۴-۳-۳ حفاظت از محموله کشتی‌ها



روغن‌های روانکاری، محصولات چرمی، غذاهای کنسرو شده، دانه‌ها و کودها از رطوبت اقیانوس‌ها در هنگام حمل و نقل آسیب می‌بینند. محصولاتی مانند حبوبات، آرد، کاکائو توتون و تنباکو که به صورت فله‌ای بارگیری می‌شوند، بیشتر در معرض آسیب هستند، زیرا ممکن است در هنگام بارگیری میزان رطوبت کشتی بالا باشد. هوای مرطوب اقیانوس رطوبت بیشتری را برای رشد و تکثیر موجودات زنده ریز به همراه دارد. با خشک‌کردن هوای تهویه فراهم‌شده برای انبارها و کانتینرهای کشتی‌ها می‌توان از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری کرد. خشک‌کردن محموله‌ها موجب جلوگیری از اتلافاتی که هزینه‌های میلیون‌ها دلاری در پی دارند، می‌شود.

۴-۳-۴ تولید آبجو



در تولید آبجو به مقدار زیادی آب و حرارت نیاز است که برای رشد مخمر ضروری هستند. رشد مخمر مفید است، اما در این شرایط میکروب‌ها نیز ممکن است رشد کنند که در این صورت فرآیند مختل می‌شود. با استفاده از سامانه‌های رطوبت‌گیری می‌توان از آلودگی محصولات به وسیله موجودات بسیار ریز جلوگیری کرد.



۴-۴ جلوگیری از جذب مجدد رطوبت

تقریبا تمام مواد مقداری رطوبت به خود جذب می‌کنند. حتی رزین‌های پلاستیکی مانند نایلون می‌توانند به اندازه شش تا ده درصد وزن خشک خود رطوبت جذب کنند. در بسیاری از موارد مشکلی پیش نمی‌آید. اما در برخی موارد جذب مجدد رطوبت بر ابعاد بحرانی ماده درست مثل انبساط حرارتی تاثیر می‌گذارد و یا باعث چسبیدن محصولات به یکدیگر می‌شود. یک نمکدان معمولی بیان‌کننده این واقعیت است؛ جذب رطوبت در روزهای مرطوب باعث مسدود شدن سوراخ‌های نمکدان می‌شود. روی یک میز غذاخوری ممکن است این مشکل جزئی و ناچیز باشد. اما در ماشین‌آلات بسته‌بندی چسبندگی محصولات عواقب زیانبار اقتصادی در پی خواهد داشت.

محصولات جاذب رطوبت به رطوبت نسبی حساسیت بیشتری نسبت به رطوبت مطلق دارند و رطوبت نسبی ممکن است در هر موقع از سال بالا باشد؛ البته رطوبت نسبی اغلب در زمستان نسبت به تابستان بالاتر است. وقتی محصولات در دماهای پایین نگهداری می‌شوند، مشکلات بحرانی‌تر خواهد شد. رطوبت‌گیرهای دسیکنت برای کنترل رطوبت در دماهای پایین بسیار موثرند و به طور گسترده برای جلوگیری از جذب رطوبت استفاده می‌شوند.

کاربردهای رایج

- اتاق‌های خشک پزشکی
- بسته‌بندی و ذخیره‌سازی کود
- تولید قرص‌های دارویی
- انبار مرکزی ریخته‌گری
- بسته‌بندی پودرهای نوشیدنی
- ذخیره‌سازی پلاستیک‌های رزین
- تهیه قهوه فوری
- پر کردن باتری سربی-اسیدی آب‌بندی‌شده
- ذخیره‌سازی مواد پلیمری پیش آغشته
- ذخیره‌سازی کاغذ
- جابجایی آرد، پلاستیک و پودر
- بسته‌بندی و ذخیره‌سازی شکر
- تولید پودر اپوکسی
- بسته‌بندی مواد دارویی
- تولید و بسته‌بندی قرص ویتامین
- ماشینکاری و ذخیره‌سازی مدارهای الکتریکی
- عملیات لیتوگرافی نوری
- چاپ دقیق رنگ
- ذخیره‌سازی چوب پنبه
- تولید و بسته‌بندی قرص آب نبات
- ذخیره‌سازی سبزیجات خشک‌شده
- اختلاط سوخت و ریخته‌گری
- ذخیره‌سازی موتور موشک
- ماشینکاری لنزهای تماسی
- رشته‌های سیم‌پیچ
- پوشش لنز
- ذخیره‌سازی چوب‌های مخصوص روکش
- اتصال کابل‌های برق
- عایق‌های حرارتی مخازن سرد
- جابجایی پودرهای میوه
- فضاهای فرآوری آدامس



۴-۴-۱ بسته‌بندی آب‌نبات

آب‌نبات جامد حاوی قند و سوربیتول[1] است که هر دو بسیار جاذب رطوبت هستند. وقتی رطوبت بالا باشد، این محصولات می‌توانند رطوبت جذب کنند که در این صورت چسبناک می‌شوند. سپس به ماشین‌آلات و کاغذهای بسته‌بندی می چسبند که موجب کندشدن روند تولید و ایجاد مشکلات بهداشتی می‌شود. از رطوبت‌گیرهای دسیکنت برای خشک کردن فضاهای بسته‌بندی استفاده می‌شود که در این صورت تجهیزات به صورت کارآمد فعالیت می‌کنند و هزینه و زمان تمیز کردن تجهیزات کاهش می‌یابد.



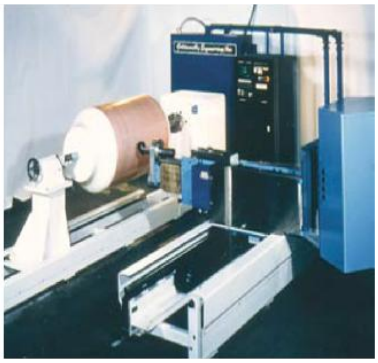
۴-۴-۲ اتاق‌های تمیز داروسازی و نیمه هادی‌ها

در هنگام تولید مدارهای الکترونیکی از پلیمرهای جاذب رطوبتی به نام فوتورسیست[2] برای حک‌کردن پوشش خطوط مدار استفاده می‌شود. این پلیمرها جاذب رطوبت هستند. اگر آن‌ها رطوبت جذب کنند، خطوط میکروسکوپی مدار قطع می‌شوند و یا اتصال می‌کنندکه موجب خرابی مدار می‌شود. در تولید مواد دارویی نیز بیشتر پودرها بسیار جاذب رطوبت هستند. در صورت مرطوب شدن، تولید دشوار شده و زمان نگهداری آن‌ها نیز محدود می‌شود. به این دلایل و چند دلیل دیگر فضاهای تولید این مواد مجهز به رطوبت‌گیرهای دسیکنت است که با جلوگیری از جذب رطوبت امکان تولید سریع‌تر محصولات با کیفیت بالاتر فراهم می‌شود.



۴-۴-۳ لایه‌بندی شیشه‌های ایمنی

لایه نازک و شفاف پلاستیکی که بین لایه‌های شیشه‌های ایمنی به عنوان چسب عمل می‌کند، جاذب رطوبت است. اگر این ماده رطوبت به خود جذب کند، رطوبت جذب شده طی فرآیند تولید، بخار می‌شود و حباب‌هایی تولید می‌شوند که در شیشه‌های چند لایه باقی می‌مانند. رطوبت‌گیرهای دسیکنت شرایط رطوبی پایینی را برای تولید، نگهداری و استفاده از این مواد فراهم می‌کنند.



۴-۴-۴ تولید مواد مرکب

بسیاری از رزین‌های اپوکسی عمل‌آوری‌نشده تمایل زیادی به جذب رطوبت دارند. با جذب بخار آب نواحی مولکولی که تشکیل پیوندهای قوی می‌دهند، با مولکول‌های آب مسدود می‌شوند. این فرآیند پخت را کندتر کرده تا آب تبخیر شود که باعث کاهش استحکام قطعات می‌شود. مدارهای الکترونیکی چاپی، قطعات صنعت هوافضا که به روش رشته‌پیچی تولید می‌شود و مواد ترکیبی آغشته شده همگی در شرایط رطوبی پایین تولید و نگهداری می‌شوند تا با جلوگیری از جذب مجدد رطوبت تولید را سریع‌تر کرده و کیفیت محصولات را ارتقا ببخشند.

---

[1] Sorbitol
[2] Photoresist



۵-۴ خشک کردن محصول

بیشتر محصولات با استفاده از هوای گرم خشک می‌شوند تا رطوبت بخار شده و آن را خارج کنند. با این حال، جریان هوای گرم هم بسیار کند است و هم موجب آسیب به محصولات می‌شود. برای مثال، آنزیم‌ها در اثر حرارت از بین می‌روند و مخمرها نیز در صورتی که با هوای بسیار گرم خشک شوند، عملکرد مناسبی نخواهد داشت.

در صورتی‌که خشک کردن در دمای کمتر از ۱۲۰°F به صرفه باشد، استفاده از جریان هوایی که رطوبت‌گیری شده است نسبت به هوایی که فقط گرم شده است، منفعت بیشتری دارد. هرچه دما کمتر باشد، استفاده از رطوبت‌گیرها منفعت اقتصادی بیشتری در پی خواهد داشت. برای مثال آنزیم‌های مورد استفاده در مواد شوینده تجاری با استفاده از خشک‌کن بستر سیال سان[1] خشک می‌شوند. با توجه به محدوده دمایی قابل استفاده، با کاهش دمای نقطه شبنم از ۶۵°F به ۲۰°F، ظرفیت خشک‌کنندگی بستر سیال سان دو برابر می‌شود. این بدین معنی است که می‌توان اندازه بستر سیال سان را نصف کرد.

محدوده کاربردهای خشک کردن محصولات با استفاده از رطوبت‌گیرها در سال‌های اخیر بسیار گسترش یافته است، زیرا مشتریان اثرات مثبت خشک‌کردن در دماهای پایین بر کیفیت محصولات را تایید کرده‌اند. رطوبت‌گیرها امکان بهبود کیفیت محصولات را بدون کاهش سرعت تولید فراهم می‌آورند.

کاربردهای رایج

- خشک کردن عسل‌های فاقد موم
- تولید فیلم‌های عکاسی
- ترانسفورماتور ولتاژ بالا
- پودرهای خطایابی
- پودر پنیر
- تهیه خامه قهوه فوری
- پودرهای دارویی
- مخمر
- سوربیتول (الکل سفید و بی‌بو)
- جایگزین‌های شکر
- مواد کروماتوگرافی
- میله‌های جوش کم رطوبت
- "شمع‌های" اکسیژن اضطراری
- رزین پلاستیکی PET
- رزین نایلون
- مهره قابل انبساط از جنس پلی‌استایرین
- پودر شیشه
- رنگدانه
- پودر گوجه‌فرنگی
- چوب پنبه
- ژامبون
- سوسیس سفت
- دانه‌های سیب‌زمینی
- پنیر رنده‌شده
- پاستا
- سیگار
- پنیر پوشش‌داده‌شده
- دانه‌ها
- چای
- ژلاتین
- کیک کاتا
- کبریت
- پیاز و سیر
- پودر شیر و پنیر
- دانه‌های ژله
- غذای تهیه شده از غلات برای صبحانه
- کپسول‌های ژلاتینی

[1] fluidized-bed

۴-۵-۱ ریخته‌گری دقیق



در این فرآیند بارها و بارها موم داخل دوغاب سرامیکی ریخته می‌شود. این لایه‌ها تشکیل یک قالب می‌دهند که پس از خروج موم با مذاب فلزات پر می‌شود. برای خشک‌کردن لایه‌های سرامیکی از هوای خشک به جای هوای گرم استفاده می‌شود، زیرا موم در اثر گرما تغییر شکل می‌یابد. با استفاده از رطوبت‌گیرها انجام فرآیند ریخته‌گری دقیق در تمام طول سال، بدون نیاز به کاهش تولید در ماه‌های مرطوب، برای کارخانه‌های ریخته‌گری امکان‌پذیر خواهد بود. در این صورت تولیدکنندگان می‌توانند برای رعایت قوانین هوای پاک، از آب به عنوان حلال استفاده کنند. همچنین در بسیاری از موارد زمان خشک‌کردن تا بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان تولید نیز به طور قابل توجهی بیشتر می‌شود.

۴-۵-۲ خشک‌کردن رزین‌های پلاستیکی



همه رزین‌های پلاستیکی تا حدودی جاذب رطوبت هستند. در هنگام تولید محصولات از گلوله‌های پلاستیکی و انجام فرآیندهای قالب‌گیری و اکستروژن[1]، پلاستیک گرم شده و رطوبت جذب شده بخار می‌شود. این بخار ناشی از جوشش موجب ایجاد عیوب ساختاری و ظاهری در محصولات می‌شود که ارزش آن‌ها را کاهش می‌دهد. از رطوبت‌گیرهای دسیکنت برای خشک کردن گلوله‌های پلاستیکی تا سطوح رطوبی بسیار پایین قبل از اینکه ذوب شوند، استفاده می‌شود که در این صورت کیفیت نهایی محصولات و سود نهایی تولیدکنندگان افزایش می‌یابد.

۴-۵-۳ پوشش‌دهی آب‌نبات‌ها



آب‌نبات‌های پوشش‌داده‌شده همچون اسمارتیس و آجیل با پوشش‌های شکلاتی با استفاده از هوای خشک سریع‌تر خشک می‌شوند. اما درجه حرارت بالا موجب ذوب شدن شکلات و خرابی محصولات می‌شود. با استفاده از هوای خشک درخشش پوشش اسمارتیس‌ها بهبود می‌یابد و محصولات در قست پوشش‌دهی کمتر به یکدیگر می‌چسبند. آب‌نبات‌های پوشش داده شده یا شکلات‌های با کیفیت بالا و سطح براق اغلب به کمک هوای خشک حاصل از رطوبت‌گیرهای دسیکنت تولید می‌شوند.

۴-۵-۴ خشک‌کردن ماهی



برخی مواد غذایی، مانند ماهی، به گرما بسیار حساس هستند. در حالت ایده‌آل این مواد باید در دماهای کم خشک شوند تا باکتری‌ها رشد نکنند و پروتئین آن‌ها از بین نرود. این مشکلات بر بافت، مزه و بهداشت تاثیر می‌گذارد. رطوبت‌گیرهای دسیکنت به همراه سامانه‌های سرمایشی برای خشک‌کردن ماهی به طور کارآمد در دماهای کم استفاده می‌شوند. بدون استفاده از رطوبت‌گیرها زمان خشک‌کردن در دماهای پایین بسیار طولانی‌تر از آن خواهد بود که از لحاظ اقتصادی عملی باشد.

[1] Extrusion



کاربردهای رایج

- ساختمان‌های عمومی و تالارهای کنفرانس
- خانه‌های پرستاری
- باشگاه‌های سلامت
- فروشگاه‌های خرده‌فروشی
- هتل‌ها و مهمان‌سراها
- مقاوم‌سازی ساختمان‌های اداری
- سوپرمارکت‌ها
- ساختمان‌های اداری پزشکی
- بیمارستان‌ها

۶-۴ سرمایش خشک

به طور کلی، سامانه‌های تهویه مطبوع از کویل‌های سرمایش برای کنترل رطوبت و دما استفاده می‌کنند. در بیشتر کاربردهای تهویه مطبوع برای شرایط آسایش انسان این روش برای کنترل رطوبت بسیار کارآمد است.

با این حال در برخی شرایط اضافه کردن یک رطوبت‌گیر دسیکنت جدای از سامانه سرمایش برای کنترل رطوبت به صورت جداگانه از کنترل دمای هوا سودمند خواهد بود. در شرایطی که بارهای رطوبی نسبت به بارهای حرارتی محسوس بسیار بیشتر است و یا زمانی‌که بار رطوبی ماکزیمم و بار حرارتی ماکزیمم همزمان اتفاق نمی‌افتند، استفاده از سامانه رطوبت‌گیری مجزا بیشترین صرفه را خواهد داشت. برای مثال، ممکن است بتوان درساختمانی از هوای محیط با دمای ۶۵°F برای سرمایش استفاده کرد، اما در این صورت هوا به میزان کافی رطوبت دارد که به رطوبت‌گیری نیاز خواهد بود.

همچنین در صورتی‌که انرژی احیا مجدد رطوبت‌گیر دسیکنت بسیار ارزان و انرژی الکتریکی بسیار گران باشد، اضافه کردن سامانه رطوبت‌گیری دسیکنت به سامانه تهویه مطبوع مفید است. این کار هزینه گرفتن بارهای رطوبی را به کمک انرژی الکتریکی به یک راه کم‌هزینه‌تر منتقل می‌کند. برای مثال می‌توان از گرمای اضافی سامانه‌های تولید همزمان[1] در رطوبت‌گیر دسیکنت برای گرفتن رطوبت از هوا استفاده کرد.

سامانه‌های تهویه مطبوع مجهز از ظرفیت دفع رطوبت دسیکنت استفاده می‌کنند. این می‌تواند برای بسیاری از مهندسان جذاب باشد، زیرا که نگرانی‌های زیست محیطی در مورد مبردهای فلوئوروکربن‌ها می‌تواند منجر به تغییرات بزرگی در سامانه‌های موجود برای حذف بارهای نهان شود.

[1] Cogeneration system

۴-۶-۱ سوپرمارکت‌ها



زمانی که سامانه‌های تبرید کار می‌کنند، هوای اطراف خود را سرد می‌کنند که به طور خودکار موجب چگالش مقدار زیادی آب می‌شود. یک رطوبت‌گیر دسیکنت بخار آب را بسیار ارزان‌تر از سامانه‌های سرمایشی جدا می‌کند. در صورتی‌که هوا قبلا خشک شده باشد، در اطراف سامانه‌های تبرید چگالشی رخ نمی‌دهد و این سامانه‌ها کارآمدتر عمل خواهند کرد. صرفه‌جویی در هزینه انرژی مصرفی نیز معادل سود صدها هزار دلاری در فروش محصولات خواهد بود. افزون بر این، چون هوای فروشگاه خشک است، بر روی مواد غذایی منجمد و بستنی‌ها یخ تشکیل نمی‌شود و باعث می‌شود این محصولات برای مشتریان جذاب‌تر باشند.

۴-۶-۲ هتل‌ها و متل‌ها



نوسان بارهای حرارتی محسوس در مکان‌های اقامت کوتاه‌مدت و سالن‌های کنفرانس بسیار زیاد است. با رفت و آمد افراد میزان این بارها به طور کامل تغییر می‌کند. از طرف دیگر، با توجه به اینکه به طور مداوم هوای تازه به داخل ساختمان آورده می‌شود که با خود بخار آب به همراه دارد، میزان بارهای رطوبی تقریبا ثابت است. سامانه‌های سرمایشی مرسوم دمای اتاق را سریعا کاهش می‌دهند و خاموش می‌شوند که در این صورت رطوبت باقی می‌ماند و موجب بوی نامطبوع اتاق و آسیب به ساختمان و لوازم می‌شود. از رطوبت‌گیرهای دسیکنت برای خشک کردن بسیار زیاد هوای جبرانی استفاده می‌شود که مانند یک "اسفنج" عمل کرده و رطوبت اضافی را دفع می‌کند. با این کار رضایت مشتریان بیشتر شده و هزینه نگهداری ساختمان و لوازم کاهش می‌یابد.

۴-۶-۳ ساختمان‌های بهداشتی-درمانی



هنگامی‌که هوا با استفاده از سامانه‌های سرمایشی تراکمی بخار خنک می‌شود، قطعا بر روی کویل سرمایش رطوبت تشکیل می‌شود. در برخی موارد کانال‌های پایین دست جریان و سینی تخلیه زیر کویل شرایط مناسب برای رشد قارچ‌ها و کپک‌ها را فراهم می‌کنند. رشد کپک‌ها و قارچ‌ها کیفیت هوای داخل ساختمان را کاهش داده و موجب بوی نامطبوع فضا می‌شود. با خشک‌کردن هوا به کمک یک رطوبت‌گیر دسیکنت در بالادست کویل‌های سرمایشی می‌توان از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری کرد که یک مشخصه مفید برای ساختمان‌های بهداشتی-درمانی و ساختمان‌های دیگری که در آن‌ها کیفیت هوای داخلی بسیار مهم است، خواهد بود.

۴-۶-۴ سامانه‌های HVAC پیشرفته



سامانه‌های گرمایش و تهویه مطبوع (HVAC) که برای انرژی الکتریکی خود از تولید همزمان استفاده می‌کنند، مقداری گرمای اضافی حاصل از خنک کردن ژنراتور تولید می‌کنند. می‌توان این گرمای اضافی را برای فرآیند احیا مجدد یک رطوبت‌گیر دسیکنت بکار برد که در این صورت بار رطوبی از سامانه سرمایش برداشته شده و موجب بهبود کارایی کل سامانه و صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. افزون بر این، سامانه‌هایی که برای استفاده از برق

ارزان[1] از مخزن‌های یخ استفاده می‌کنند نیز می‌توانند از رطوبت‌گیرهای دسیکنت برای تولید هوای بسیار خشک استفاده کنند. با ترکیب هوای بسیار خشک و هوای بسیار سرد، حجم هوای کل مورد نیاز کاهش می‌یابد که در نتیجه هزینه‌های کانال‌کشی و کار کردن فن کمتر می‌شود.

[1] در ساعات کم باری.

۵ محاسبات بارهای رطوبی

در طراحی سامانه‌های رطوبت‌گیری مهمترین وظیفه محاسبه بارهای رطوبی است که باید توسط سامانه جدا شوند. بدون داشتن درک عمیقی از ابعاد، تناوب و منابع بارهای رطوبی، طراحی یک سامانه رطوبت‌گیری امکان‌پذیر نیست.

با اینکه این وظیفه امری ضروری است، اما محاسبه بارهای رطوبی از گذشته تاکنون تا حدودی بحث برانگیز بوده است و روند شخصی داشته است. ممکن است عجیب به نظر برسد اما جزئیات محاسبات و جداول و نمودارهای معین برای کمک به مهندسان توسعه داده شده است. اما حقیقت ناخوشایند این است که ممکن است دو شخص با مهارت یکسان جواب متفاوتی برای بار رطوبی محاسبه شده برای یک فضا به دست آورند.

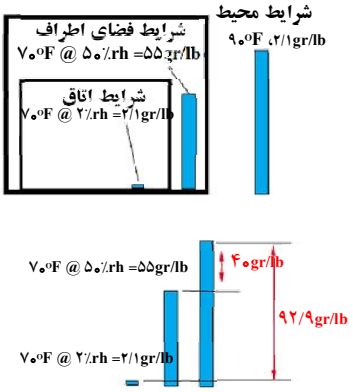
این تفاوت‌ها به دلیل در نظر گرفتن فرضیات متفاوت است. محاسبات نشت رطوبت از یک دیوار یکسان خواهد بود، اما آیا طراح می‌تواند اطمینان حاصل کند که پیمانکار اتصالات الکتریکی را به درستی درزگیری کرده است و یا عایق بخار به طور تعیین‌شده پیچیده شده است؟ آیا ناظر اتاق دسترسی به فضا را کنترل می‌کند یا درب‌ها به طور دائم باز هستند؟ قبل از محاسبه بارهای رطوبی و طراحی سامانه، مهندس باید فرضیات زیادی در نظر بگیرد و بهترین پیش‌بینی‌ها و تخمین‌ها را انجام دهد.

در تجزیه و تحلیل نهایی، برگه محاسبات بارهای رطوبی نشان دهنده توافق مشترک میان سازندگان تجهیزات، طراح سامانه، مالک و نصب‌کننده است. این برگه فرض‌هایی را تعریف می‌کند که اساس طراحی سامانه را تشکیل می‌دهند.

این فصل به بررسی عوامل اصلی بارهای رطوبی، نحوه محاسبه آن‌ها و مهم‌تر از همه اهمیت نسبی هر کدام در شرایط مختلف می‌پردازد.

۵-۱ انتخاب شرایط طراحی

هر چه اختلاف میزان رطوبت فضای کنترل شده و محیط اطراف بیشتر باشد، بار رطوبی هر یک از عوامل نیز بیشتر خواهد بود. برای مثال فرض کنید یک ساختمان در دمای ۷۰°F و رطوبت نسبی ٪۵۰ (۵۵gr/lb) نگهداری می‌شود، در حالی که دمای هوای محیط در یک روز تابستانی ۹۰°F و رطوبت آن ۹۵gr/lb است. در این حالت هر پوند هوایی که به اتاق نفوذ می‌کند حاوی ۴۰ گرین رطوبت است که باید توسط رطوبت‌گیر جدا شود. اما اگر ساختمان در دمای ۷۰°F و رطوبت نسبی ٪۲ (۲٫۱gr/lb) نگهداری می‌شود، هر پوند هوای نفوذی ۹۲٫۹ گرین رطوبت وارد فضا می‌کند. با توجه به این موضوع آشکار است که اولین و مهمترین گام در محاسبه بارهای رطوبی تعیین دما و شرایط رطوبی داخل و خارج از فضای کنترلی است.



شکل ۵-۱

مقدار بار به اختلاف رطوبت بستگی دارد

اگر همه چیز یکسان باشد، بار رطوبی با اختلاف رطوبت بین فضای کنترلی و محیط اطراف متناسب است. هرچه این اختلاف بیشتر باشد، بار رطوبی بیشتر خواهد بود.

شرایط فضای داخلی با توجه به محصولات و فرآیندهای در حال انجام در فضا تعیین می‌شود و ممکن است مشخصات زیادی به تعداد کاربردهای مختلف وجود داشته باشد. نکته مهم این است که قبل از شروع محاسبات سطح کنترلی خواسته شده به طور دقیق (گرین بر پوند) مشخص شود.

برای مثال "رطوبت نسبی٪۳۰" مشخصه سودمندی نیست، زیرا میزان رطوبت هوا در رطوبت نسبی ٪۳۰ با تغییرات دما تغییر می‌کند. هنگامی که طراح دما را ۷۰°F در نظر می‌گیرد، می‌توان مقدار رطوبت نسبی را با استفاده از نمودار سایکرومتری به مقدار مطلق تبدیل نمود. در این مورد دمای ۷۰°F و رطوبت نسبی ٪۳۰ حاوی ۳۲ گرین رطوبت در هر پوند هوای خشک است.

اگر در یک کاربرد خاص نیاز به کنترل رطوبت نسبی ٪۳۰ باشد، در حالی که دما متغیر است، طراح باید در رطوبت نسبی ٪۳۰ دمایی را انتخاب کند که موجب بیشترین اختلاف رطوبت بین داخل و خارج از فضای کنترلی می‌شود. هر چند اختلاف رطوبت بستگی به شرایط خارجی فضا در هنگام کنترل رطوبت و دمای داخل فضا دارد، اما در اغلب اوقات پایین‌ترین دما در یک محدوده دمایی موجب بیشترین اختلاف رطوبت خواهد شد.

در محاسبات مربوط به بارهای رطوبی دو حالت برای شرایط هوای خارج باید انتخاب شود. حالت اول شامل شرایط هوایی که بدون فاصله فضای کنترل شده را احاطه کرده است، می‌شود. از این شرایط برای محاسبه بارهای نفوذ از دیوارها، ورودی درب‌ها و نشت هوا استفاده می‌شود. حالت دوم نیز شامل دما و رطوبت هوای تازه‌ای است که برای تهویه یا برای جایگزینی هوای خروجی به فضای کنترلی آورده می‌شود.

در روش استاندارد طراحی تهویه مطبوع، مهندسان اغلب از اطلاعات جوی تهیه شده توسط ASHREA (جامعه مهندسی گرمایش، تهویه مطبوع و تبرید آمریکا) که در جدول B۱ فصل ۲۷ اصول پایه ASHREA ویرایش سال ۲۰۰۱ موجود است، استفاده می‌کنند. البته این جدول شامل سه حالت برای طراحی است که هر کدام مقادیر خاصی برای رطوبت دارند. برای طراحی سامانه‌های رطوبت‌گیری از مقدار ماکزیمم دمای نقطه شبنم، نه مقدار ماکزیمم دمای حباب خشک یا مقدار ماکزیمم دمای حباب تر، استفاده کنید. یک مقدار از ستون‌های b۴، c۴ یا

h۴ از جدول B۱ انتخاب کنید. از مقادیر ستون‌های ۲ یا ۳ استفاده نکنید، زیرا این مقادیر برای محاسبات سرمایش یا سرمایش تبخیری هستند. بارهای سرمایشی ماکزیمم در شرایطی اتفاق می‌افتد که نسبت به شرایط نقطه شبنم ماکزیمم، خشک‌تر باشد. در بیشتر موارد رطوبت مطلق در ماکزیمم دمای نقطه شبنم بین ۲۰ تا ۴۰ درصد بیشتر از رطوبت مطلق ماکزیمم دمای حباب خشک است.

مالک نیز باید برای انتخاب شرایط خارجی طراحی تصمیم‌گیری کند. با استفاده از ستون‌های b۴، c۴ و h۴، مالک می‌تواند مقدار رطوبت مجاز را تعیین کند که در این صورت شرایط فضا فقط در ۰/۴٪، ۱٪ یا ۲٪ از طول سال نوعی از شرایط کنترلی خارج می‌شود. به عبارت دیگر میزان رطوبت محیط فقط در ۳۵، ۸۸ یا ۱۷۵ ساعت در یک سال نوعی از مقادیر تعیین‌شده بیشتر می‌شود. اگر مهندس از شرایط طراحی ۲٪ استفاده کند، مالک باید بداند که با انتخاب این مقادیر، بار رطوبی حداقل در ۱۷۵ ساعت از سال از مقدار تعیین‌شده بیشتر می‌شود. در این صورت در هفت روز و یا بخش‌هایی از تعداد روزهای بیشتری از سال شرایط رطوبی در شرایط کنترلی نخواهد بود که این وضعیت در برخی از شرایط قابل قبول است ولی در برخی شرایط دیگر اینگونه نخواهد بود. مشتری باید تصمیم بگیرد که طراحی سامانه چقدر محتاطانه انجام شود.

شرایط جوی و مقادیر رطوبت موجود در پیوست این کتاب، برگرفته از کتاب راهنمای اصول پایه ASHREA سال ۲۰۰۱ است (با کسب اجازه از ASHREA). اگر شما بر روی پروژه‌ای در مکانی متفاوت با مکان‌های ذکر شده سروکار دارید، پیشنهاد می‌شود که از خود کتاب راهنمای ASHREA و یا کتاب راهنمای طراحی کنترل رطوبت ASHREA را که شامل اطلاعات کاملی از داده‌های دمای نقطه شبنم ماکزیمم برای ۱۴۵۳ مکان دنیا است، مطالعه کنید.

پس از اینکه مهندس شرایط داخلی و خارجی طراحی را انتخاب کرد، محاسبات بارهای رطوبی برای هر کدام از عوامل رطوبت شروع می‌شود.

۵-۲ منابع بارهای رطوبی

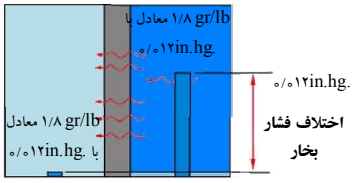
رطوبت هفت منبع اصلی دارد که عبارتند از:

- نفوذ از دیوارها، سقف و کف
- تبخیر از لباس‌ها و همچنین به واسطه تعرق و تنفس افراد
- تراوش از فرآورده‌های مرطوب، مانند مواد بسته‌بندی
- تبخیر از سطوح خیس و مخازن باز
- تولید رطوبت حاصل از احتراق، مانند شعله موجود در فضا
- نفوذ از طریق سوراخ‌ها، حفره‌ها و در ب‌های بازشو
- ورود هوای تازه از خارج برای تهویه ساختمان

اهمیت هر کدام از منابع بالا به مقدار آن‌ها در مقایسه با دیگر منابع بستگی دارد که در شرایط مختلف متفاوت است. در ادامه این فصل مثال‌هایی را بررسی خواهیم کرد که این موضوع را با

اعداد و ارقام مشخص نشان می‌دهد. در اینجا کافیست به خاطر داشته باشید که هر چه مقدار منبع رطوبت بیشتر باشد، به دقت بیشتری نیاز دارد. بالعکس، اگر مقدار منبع رطوبت کم باشد محاسبات بارهای رطوبی آن منبع در نتیجه پروژه کم‌اهمیت می‌شود.

۵-۲-۱ نفوذ رطوبت



شکل ۵-۲

نفوذ

رطوبت از مواد جامد متناسب با اختلاف فشار بخار دو طرف ماده و بر عکس میزان تخلخل آن نفوذ می‌کند.

بخار آب در اجسام جامد با سرعتی متناسب با اختلاف فشار بخار دو طرف جسم جابجا می‌شود. اگر یک طرف جسم خیلی خشک‌تر از طرف دیگر باشد، رطوبت سریع‌تر از زمانی‌که هوای دو طرف جسم رطوبت مطلق یکسانی داشته باشد، جابجا می‌شود.

همچنین نرخ نفوذ از هر ماده با مقدار بخار آبی که در طول یک بازه زمانی از یک فوت مربع از ماده در یک اختلاف فشار بخار مشخص عبور می‌کند، متناسب است. از آنجایی که رطوبت در هوا با سرعت بیشتری نسبت به مواد جامد نفوذ می‌کند، ضریب نفوذ[1] بسیار به تخلخل مواد بستگی دارد.

برای مثال، یک ورقه پلی‌اتیلنی با ضخامت ۰/۰۰۶ اینچ رطوبت را با نرخ ۰/۰۶ گرین بر ساعت بر فوت مربع در اختلاف فشار یک اینچ ستون جیوه منتقل می‌کند. از سوی دیگر، یک بلوک بتنی با ضخامت ۸ اینچ، ۲/۴ گرین بر ساعت رطوبت از خود عبور می‌دهد که سرعت آن نسبت به ورقه پلی‌اتیلنی ۴۰ برابر است، هر چند ضخامت آن ۱۳۰۰ برابر ضخامت ورقه است.

اختلاف فشار بخار مستقیما متناسب با اختلاف رطوبت ویژه دو طرف جسم است. در حوزه‌های معمول مورد توجه مهندسی، هر gr/lb رطوبت برابر با ۰/۰۰۶۷ اینچ فشار بخار جیوه در نظر گرفته می‌شود. طراح می‌تواند از این تناسب هنگامی‌که اختلاف رطوبت به گرین در دو طرف جسم مشخص است، برای محاسبه اختلاف فشار بخار استفاده کند. در مکان‌های مرتفع چون نسبت رطوبت–فشار بخار متفاوت است، باید نمودار سایکرومتری مناسب استفاده شود.

[1] Permeance factor

جدول۵-۱ ضریب نفوذ مواد ساختمانی

ضرایب نفوذپذیری مواد ساختمانی grains/hr/sq ft/in hgΔV.P.		
ماده یا ساختمان	نفوذ	
	بدون عایق بخار	رنگ تاخیری بخار (نفوذ=۰/۴۵)
مواد ساختمانی		
آجر بنایی با ضخامت ۴ اینچ	۰/۸	۰/۲۹
آجر بنایی با ضخامت ۸ اینچ	۰/۳۸	۰/۲۱
بتون با ترکیب ۱:۲:۴ با ضخامت ۸ اینچ	۰/۴۰	۰/۲۱
بتون با ترکیب ۱:۲:۴ با ضخامت ۱ اینچ	۳/۲۰	–
بلوک بتنی با ضخامت ۸ اینچ	۲/۴۰	۰/۳۸
پلاستر بر روی آهن نبشی با ضخامت $\frac{3}{4}$ اینچ	۱۵	۰/۴۴
پلاستر بر روی دیوار گچی (با میلگرد)	۲۰	۰/۴۴
دیوار گچی ساده با ضخامت $\frac{3}{8}$ اینچ	۵۰	۰/۴۵
نوار عایق با مساحت ۱ اینچ مربع	۵۰	–
تخته فنری (استاندارد) با ضخامت $\frac{1}{2}$ اینچ	۱۱	۰/۴۳
تخته چند لایه با لایه خارجی آبی و ضخامت $\frac{1}{2}$ اینچ	۰/۳۵	۰/۲۰
تخته چند لایه با لایه داخلی آبی و ضخامت $\frac{1}{2}$ اینچ	۰/۹۴	۰/۳۰
چوب کاج با مساحت ۱ اینچ مربع	۵/۳	–
مواد عایق		
هوا (ساکن) با ضخامت ۱ اینچ	۱۲۰	
چوب پنبه با ضخامت ۱ اینچ	۹/۱	
الیاف عایق (محافظت نشده) با ضخامت ۱ اینچ	۱۱۶	
تخته پلی‌اورتان با ضخامت ۱ اینچ	۱/۶	
پلی‌اورتان اکسترود شده با ضخامت ۱ اینچ	۱/۲	
مواد مانع بخار		
فویل آلومینیمی با ضخامت ۰/۰۰۲ اینچ	۰/۰۲۵۳	
پلی اتیلن با ضخامت ۰/۰۰۲ اینچ	۰/۱۶	

ضریب نفوذ مواد ساختمانی

ضخامت ماده به اندازه میزان تخلخل آن موثر نیست. تاثیر یک نوار پلاستیکی با ضخامت ۰/۰۰۶ اینچ در جلوگیری از نفوذ بخار، ۴۰ برابر بیشتر از یک بلوک بتنی با ضخامت ۸ اینچ است.

پلی اتیلن با ضخامت ۰/۰۰۶ اینچ	۰/۰۶	
ورق فلزی	۰/۰	
ایزوگام		
ایزوگام پوشش داده شده، 65 lb/100 sq. ft	۰/۲۴	
کاغذ عایق با پوشش آسفالت	۴/۲	
کاغذ عایق بخار با پوشش آسفالت	۰/۶	
ایزوگام با پوشش آسفالت	۵/۶	
ایزوگام قیر اندود شده	۱۸/۲	
کاغذ دو لایه مخصوص بسته‌بندی	۴۲	
رنگ‌ها و پوشش‌ها		
رنگ لاتکس عایق بخار با ضخامت ۰/۰۰۳ اینچ	۰/۴۵	
لاتکس آب‌بند تجاری با ضخامت ۰/۰۰۱۲ اینچ	۶/۲۸	
انواع زیرکاری با یک پوشش رنگ روغنی روی پلاستر	۳/۰	
دو پوشش از رنگ آلومینیم، به طور تقریبی	۰/۸	
دو پوشش از رنگ آسفالت، به طور تقریبی	۰/۴	
دو بار رنگ‌آمیزی نوار عایق	۴	

تذکرات:

۱-مقادیر بالا به صورت تقریبی و بر اساس روش‌های آزمایشی متنوع به دست آمده است. زمانی که محدوده‌ای از مقادیر یا چند مقدار وجود داشته است، بیشترین مقدار نتایج در اینجا ارائه شده است. برای آگاهی از مقادیر دقیق با تولیدکنندگان مواد ساختمانی مشورت شود.

۲-نفوذ مواد با ضخامت (t) متفاوت را می‌توان با ضرب نفوذ برای ضخامت ۱in در $\frac{1}{t}$ محاسبه کرد.

۳-در مقادیر نفوذ ارائه شده امکان آسیب مواد در هنگام جابجایی نیز در نظر گرفته شده است.

این جدول از فصل ۲۱ کتاب راهنمای ASHREA چاپ سال ۱۹۸۱ گرفته شده است.

برای محاسبه بار رطوبی حاصل از نفوذ رطوبت، با یافتن ضریب نفوذ از جدول فوق می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$W_p = P \times A \times (\Delta VP) \qquad ۱-۵$$

که

Wp: نفوذ (gr/hr)

P: ضریب نفوذ ماده (gr/hr/sq.ft./in.Hg)

A: سطح مقطع (sq.ft)

VP: اختلاف فشار بخار دو طرف جسم (in.Hg)

اگر دیوار از چند لایه ماده ساخته شده باشد، ضریب نفوذ کل همانند ضریب انتقال حرارت به شکل زیر محاسبه می‌شود:

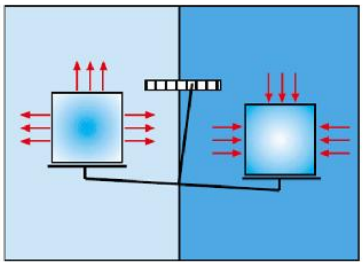
$$\frac{1}{P_T} = \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \cdots + \frac{1}{P_n} \qquad ۵-۲$$

که سمت چپ معادله نشان دهنده معکوس ضریب نفوذ کل و سمت راست نشان دهنده معکوس ضریب نفوذ هر یک از لایه‌ها می‌باشد.

۵-۲-۲ رطوبت محصولات و بسته‌بندی

اگر ماده جامدی با هوای محیط در تعادل باشد، محتوای رطوبت ماده متناسب با رطوبت نسبی هوای محیط است. بیشتر مواد جامد هنگامی که در محیط مرطوبی قرار می‌گیرند، رطوبت هوا را جذب می‌کنند و اگر در معرض هوای خشک قرار گیرند، رطوبت خود را از دست می‌دهند.

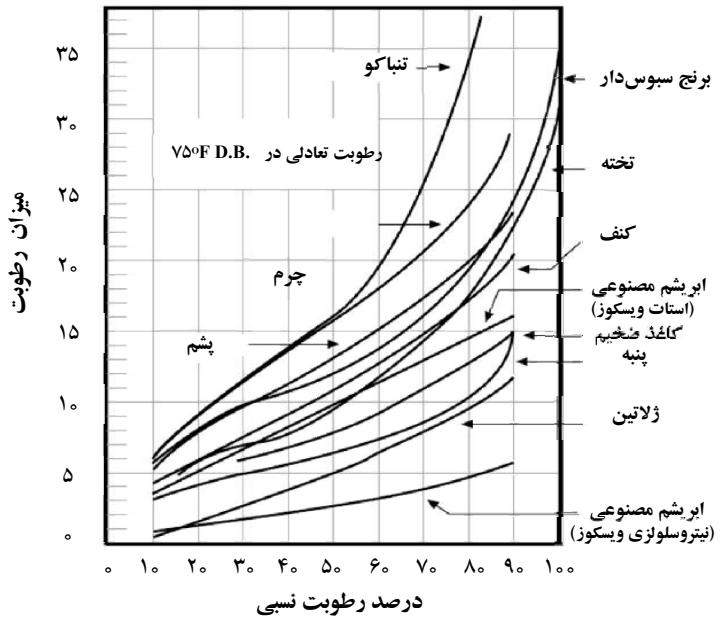
هنگامی که یک ماده مرطوب به یک محیط خشک آورده می‌شود، تا زمانی که فشار بخار سطح آن به فشار بخار محیط اطراف برسد، رطوبت خود را از دست می‌دهد. فشار بخار سطح یک ماده جامد به ساختار فیزیکی و شیمیایی آن بستگی دارد. بنابراین هر ماده‌ای خصوصیات تعادلی متفاوتی دارد. از این رو فشار بخار سطح هم به دما و هم به رطوبت جسم بستگی دارد، اما از آنجایی که بیشتر فضاهای کنترلی در دمای تقریبا ثابتی نگهداری می‌شوند، ظاهرا دفع و جذب رطوبت تابعی از رطوبت نسبی است. در واقع رابطه تعادلی دیگری بین رطوبت نسبی و مقدار رطوبت برای هوا و دماهای مختلف وجود دارد.



شکل ۵-۳

رطوبت محصولات

هنگامی‌که مواد در معرض هوای مرطوب قرار می‌گیرند، رطوبت هوا را جذب و ذخیره می‌کنند. وقتی این مواد به فضایی با رطوبت کمتر وارد شوند، رطوبت ذخیره شده را از دست می‌دهند. این بار رطوبی در مکان‌هایی همچون انبارها که مرتبا مواد با بسته‌بندی‌های مرطوب وارد آن‌ها می‌شوند، قابل توجه است.



شکل ۵-۴

شکل ۵-۴ مقدار رطوبت تعادلی چندین ماده مختلف در دمای $75^{o}F$ را نشان می‌دهد. برای محاسبه مقدار رطوبتی که این مواد در یک فضای خشک آزاد می‌کنند، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$W_{pp} = \frac{lbs}{hr} * (pw_1 - pw_2) \qquad ۳-۵$$

که

W_{pp}: بخار آب از محصولات و بسته‌بندی (lbs/hr)

lbs/hr: جرم کلی ماده وارد شده به اتاق در هر ساعت (lbs/hr)

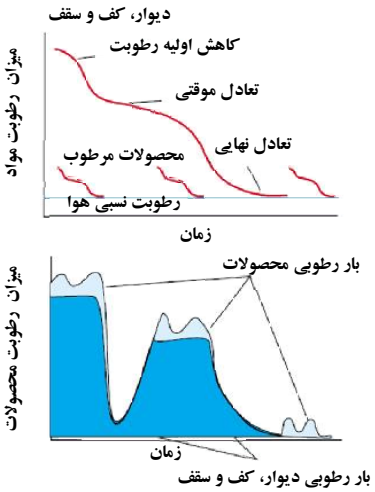
pw_1: مقدار رطوبت تعادلی ماده در شرایط کنترلی فضا (lbs/hr)

pw_2: مقدار رطوبت تعادلی ماده قبل از ورود به فضا (lbs/hr)

قابل ذکر است که این معادله با این فرض به دست آمده است که کل بخار آب یک ماده در طول یک ساعت از آن گرفته شود. اما در واقع این فرآیند بسیار بیشتر بطول می‌انجامد. نرخ واقعی دفع رطوبت عمدتا به مجموعه‌ای از متغیرها همچون سرعت هوای عبوری از سطح مرطوب، انرژی مورد نیاز برای تبخیر و ضخامت ماده بستگی دارد. برای مثال ورقه‌های نازک کاغذ که در معرض هوای گرم و خشک کانال خروجی قرار می‌گیرند، در عرض چند دقیقه خشک می‌شوند. اما جعبه‌های مقوایی حاوی کاغذ که بر روی هم قرار گرفته‌اند، ممکن است روزها و یا هفته‌ها بطول انجامد تا رطوبت دفع کنند و به یک تعادل جدید برسند.

هنگامی‌که سامانه رطوبت‌گیری برای خشک‌کردن محصولاتی چون فرآورده‌های ریخته‌گری دقیق، دانه‌ها و پودرها طراحی می‌شود، نمودار تعادلی نشان داده شده در اینجا سودمند نیست. دستگاه‌های خشک‌کن برای هر ماده‌ای یکتا هستند، زیرا مواد به گونه‌های متفاوتی در معرض هوا قرار می‌گیرند. همچنین هر یک از مواد محدودیت‌های دمایی، نرخ خشک شوندگی و دمای نقطه شبنم هوای خشک‌کن متفاوتی دارند. این ویژگی‌ها باید با انجام آزمایشات اندازه‌گیری شوند. اما مهندسان برای محاسبه آن‌ها از روش‌های تخمینی استفاده می‌کنند.

به عنوان مثال در یک عملیات ریخته‌گری دقیق، نرخ مصرف محلول ریخته‌گری باید مشخص شود، زیرا این مقدار بیان کننده هزینه اصلی فرآیند می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار آب موجود در محلول نیز مشخص است، مهندس می‌تواند با ضرب تعداد گالن‌های آب مصرفی در یک ساعت در ۸٫۳۴ (وزن آب به ازای هر گالن) تخمینی از مقدار بار بخار آب حاصل را بر حسب پوند بر ساعت به دست آورد. بارهای رطوبی ناشی از تبخیر از سبزیجات مرطوب در یک سوپرمارکت مثال رایج دیگری است. سازندگان سامانه‌های آب‌پاش سبزیجات، اطلاعات مورد نیاز در مورد نرخ پاشش این دستگاه‌ها در ساعت را ارائه می‌کنند که در این صورت می‌توان بار رطوبی ایجاد شده را بر حسب پوند بر ساعت با ضرب نرخ پاشش بر حسب GPH در ۸٫۳۴ محاسبه نمود.



شکل ۵-۵

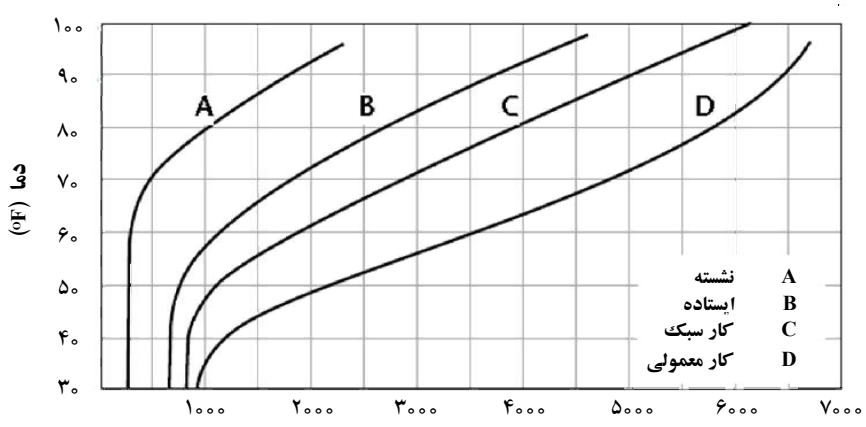
بارهای رطوبی محصولات

وقتی فضایی نوساز به رطوبت‌گیر مجهز می‌شود، مدت زمانی طول می‌کشد تا کل رطوبت محصولات از مواد به هوا منتقل شود. پس از آنکه رطوبت سطحی ماده گرفته شد، ماده موقتا به تعادل می‌رسد. با جابجا شدن رطوبت از مرکز ماده به لبه‌های آن، بخار آب بیشتری گرفته می‌شود و سرانجام ماده به تعادل واقعی می‌رسد.

اگر مجموعه‌ای از محصولات مرطوب در فواصل معین وارد فضا شوند، هر یک از آن‌ها همانند مواد ساختمانی عمل می‌کند و رطوبت خود را در دو مرحله از دست می‌دهد. نتیجه کلی این است که پس از ساخت و ساز اولیه بار رطوبی در هنگام رطوبت‌گیری تغییر می‌کند. حتی وقتی که رطوبت‌گیر کار می‌کند، انتظار می‌رود که سطح رطوبت فضا تا زمانی‌که هیچ رطوبتی به فضا داده نشود، نوسان کند.

۵-۲-۳ رطوبت افراد و کارکنان

بواسطه بازدم و همچنین تعریق، رطوبت و بخار آب از انسان خارج می‌شود. همچنین پوشش افراد نیز رطوبت را از فضای مرطوب به فضای خشک انتقال می‌دهد. در هر بازدم هوا با دمای $98^{o}F$ حاوی ۲۸۳ گرین رطوبت در هر پوند هوا، کاملا اشباع، خارج می‌شود. تعداد تنفس افراد نیز بستگی زیادی به فعالیت فیزیکی آن‌ها دارد. هرچه افراد فعالیت بیشتری داشته باشند، تنفس آن‌ها نیز بیشتر و عمیق‌تر می‌شود. شکل زیر نرخ دفع رطوبت نمونه افراد در فعالیت‌های فیزیکی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۷

$$W_n = (pa * fa) + (pb * fb) + (pc * fc) + (pd * fd) \qquad ۵-۴$$

که

W_n: بار رطوبی تنفس و تعریق (gr/hr)

(pa): تبخیر هر فرد (gr/hr)

(fa): تعداد افراد نشسته

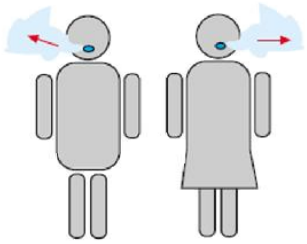
$(pa * fa)$: بار افراد در حالت نشسته (gr/hr)

$(pb * fb)$: بار افراد در حالت ایستاده (gr/hr)

$(pc * fc)$: بار افراد هنگام فعالیت سبک (gr/hr)

$(pd * fd)$: بار افراد هنگام فعالیت معمولی (gr/hr)

علاوه بر این رطوبت، اگر افراد زیادی به طور مرتب برای مدت زمان کوتاهی به محیط تهویه شده وارد و از آنجا خارج شوند، ممکن است طراح بخواهد رطوبت لباس افراد نیز باید مدنظر قرار داده شود. این رطوبت همانند رطوبت محصولات و بسته‌بندی محاسبه می‌شود. در بیشتر شرایط رطوبت لباس‌ها اغلب ناچیز است. اما هنگامی‌که شرایط کنترل رطوبت خیلی پایین است (رطوبت نسبی کمتر از ۵٪) و یا رفت‌وآمد افراد زیاد است، رطوبت لباس‌ها می‌تواند حائز اهمیت باشد.



شکل ۵-۶

افراد

با فعالیت افراد در یک فضای رطوبت‌گیری شده از طریق تنفس و تبخیر عرق از روی پوست آن‌ها رطوبت وارد فضا می‌شود. نرخ تولید رطوبت به سختی کار و تا حدودی به میزان رطوبت فضا بستگی دارد. برای مثال تولیدکنندگان باتری‌های لیتیمی و محصولات دارویی که در فضای بسیار خشک (رطوبت نسبی کمتر از ۲٪) کار می‌کنند، دریافته‌اند که نرخ تولید رطوبت ناشی از افراد در رطوبت نسبی کم بسیار کمتر است. در واقع افراد خود را با رطوبت کم وفق می‌دهند و در این شرایط رطوبت ناشی از افراد کمتر از نصف رطوبت نشان داده شده در شکل ۵-۷ است.

برای مثال ساختمان‌های تجاری همچون سوپرمارکت‌ها که مشتریان از محیط بارانی و مرطوب وارد آن می‌شوند، بار رطوبی ناشی از لباس‌ها قابل ملاحظه خواهد بود. برای سینماها و تئاترها نیز به دلیل ورود افراد از محیط مرطوب بیرون، این بار رطوبی اهمیت دارد.

۵-۲-۴ رطوبت ناشی از احتراق

در فضاهایی که از کوره و یا بخاری‌های گازی برای گرمایش استفاده می‌شود، رطوبت ناشی از احتراق اهمیت زیادی خواهد داشت. مقدار دقیق بخار آب تولید شده بستگی به ترکیب گاز مورد استفاده دارد، اما اگر این مقدار نامعلوم باشد، طراح می‌تواند تخمین بزند که هر فوت مکعب گاز ۶۵۰ گرین بخار آب تولید می‌کند.

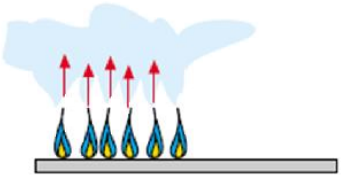
$$W_g = G * ۶۵۰ \qquad ۵-۵$$

که

W_g: بار رطوبی حاصل از احتراق (gr/hr)

G: نرخ اشتعال گاز (cu.ft./hr)

۶۵۰: رطوبت حاصل از سوختن هر فوت مربع از یک گاز (gr/hr)



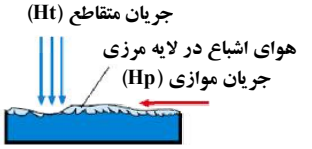
شکل ۵-۸

احتراق

با سوختن سوخت‌های فسیلی بخار آب یکی از محصولات اصلی احتراق است. اگر شعله روباز است و محصولات احتراق از فضا خارج نمی‌شوند، بار رطوبی ناشی از آن‌ها باید در محاسبات ملاحظه شود.

۵-۲-۵ رطوبت تبخیر شده از سطوح مرطوب

در بسیاری از کاربردهای صنایع غذایی، تجهیزات باید به طور مرتب شسته و کف فضا باید تمیز شود. همچنین در واحدهای تصفیه آب مخزن‌های سربازی قرار دارند که آب از آن‌ها تبخیر می‌شود. نرخ تبخیر مستقیما متناسب با اختلاف فشار بخار سطح و هوا و همچنین متناسب با گرمای منتقل‌شده به سطح آب خواهد بود. گرما انرژی مورد نیاز برای تبخیر و اختلاف فشار بخار نیروی محرکه مورد نیاز برای جدا کردن آب از سطح مایع به هوا را فراهم می‌کند.

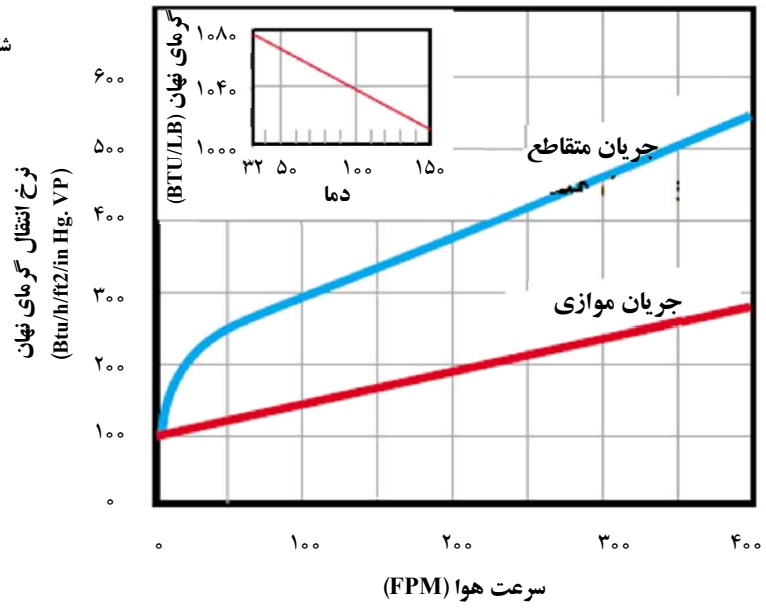


شکل ۵-۹

سطوح مرطوب

حتی زمانی‌که هوای فضا خیلی خشک باشد، رطوبت از سطوح سرد به آرامی تبخیر می‌شود. سرعت این فرآیند زمانی‌که هوا با سرعت زیاد و به صورت عمودی بر سطح دمیده شود و یا زمانی‌که سطح مرطوب گرم باشد، بسیار بیشتر می‌شود.

شکل ۵-۱۰



هنگامی که دمای آب بالاست، فشار بخار سطح آن نیز بالا خواهد بود، زیرا لایه مرزی هوا در دمای آب کاملا اشباع است. بنابراین بیشترین نرخ تبخیر هنگامی رخ می‌دهد که سطح آب گرم و هوا خشک باشد و هوا با سرعت و به صورت آشفته بالای سطح آب در جریان باشد. جریان هوای گرم و آشفته موجب بیشتر شدن نرخ انتقال حرارت از هوا به سطح آب و افزایش نرخ انتقال جرم از آب به هوا خواهد شد.

مقدار این رطوبت با فرمول زیر که توسط دکتر ویلیس کریر[1] در سال ۱۹۲۰ ارائه شد، قابل محاسبه است و نمودار آن نیز در بالا آمده است:

$$W_e = \frac{H * A * (Vps - Vpa) * ۷۰۰۰}{H_L} \qquad ۶-۵$$

که

W_e: رطوبت تبخیر شده از سطح مرطوب (gr/hr)

H: نرخ انتقال حرارت نهان (Btu/hr/sq.ft./in.Hg.)

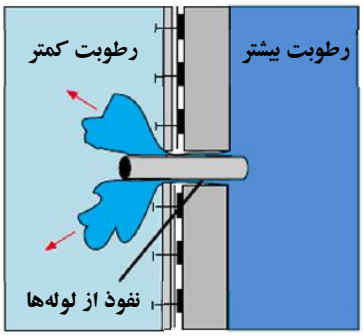
A: مساحت کل سطح مرطوب (sq.ft.)

Vps: فشار بخار هوای اشباع در دمای آب (in.Hg.)

Vpa: فشار بخار آب هوای بالای سطح (in.Hg.)

H_L: گرمای نهان تبخیر در دمای آب (Btu/lb)

[1] Dr. Willis Carrier



شکل ۵-۱۰

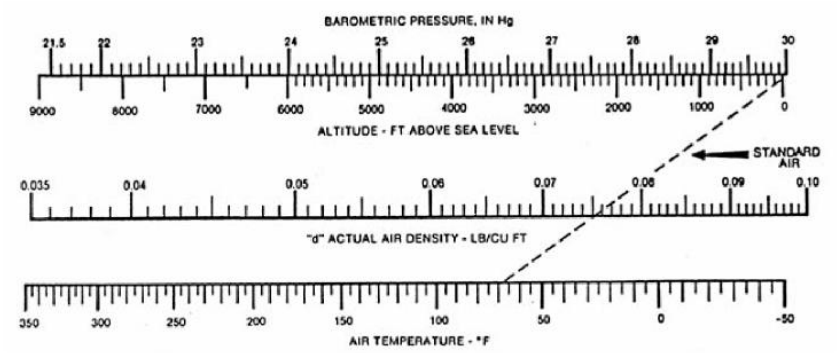
نفوذ هوا

بار رطوبی که از طریق نفوذ از شکاف‌ها و ترک‌های دیوار وارد فضا می‌شود، نسبت به بارهای رطوبی ناشی از نفوذ از مواد اهمیت بسیار بیشتری دارد. برای مثال در صورت وزیدن باد ملایم، از یک ترک به ضخامت $\frac{1}{16}$ اینچ و طول ۱ فوت ۱۴۸۰ گرین رطوبت در ساعت به فضا نفوذ می‌کند. در مقابل از یک دیوار بتنی رنگ‌آمیزی شده به طول ۵۰ft و عرض ۱۰ft فقط ۸۷ گرین رطوبت در هر ساعت وارد فضا می‌شود.

۵-۲-۶ رطوبت ناشی از نشت هوا از سوراخ‌ها و حفره‌ها

هیچ ساختمانی یا سامانه‌ای که با هوا سروکار دارد، به طور کامل درزگیری نمی‌شود. از همه مجراها و کانال‌ها مقدار مشخصی هوا که حاوی مقدار مشخصی رطوبت است، به فضای در حال تهویه نشت می‌کند. نشت هوا معمولا در بخش‌های زیر رخ می‌دهد:

- شکاف‌های محل اتصال کانال‌ها.
- درزهای نوار عایق بخار بین محل اتصال دیوار به سقف، دیوار به کف و دیوار به دیوار.
- درزهای بین دیوار و اتصالات الکتریکی نصب‌شده بر آن.
- مجراهایی که سیم‌های الکتریکی از میان آن‌ها عبور داده می‌شوند.
- شکاف‌های بزرگ‌تر از میزان مورد نیاز برای عبور لوله‌ها و کانال‌ها.
- درز موجود در مکان‌هایی که نوارهای عایق بخار به جای درزگیری، بر روی هم افتاده‌اند.
- شکاف‌های ورودی تجهیزات تهویه به ساختمان.
- شکاف‌های ایجاد شده در سقف یا دیوار برای ورود و خروج محصولات از فضا.
- شیارهای قدیمی تهویه بر روی دیوارها و درب‌ها.
- شکاف بین درب‌ها و چارچوب و پایه آن‌ها.
- فضای خالی بالای سقف کاذب ساختمان.
- راهروهای باز و محل‌های بارگیری یا راهروهای دارای پوشش پلاستیکی.



شکل ۵-۱۱

نمودار محاسباتی چگالی هوا

نفوذ هوا بر حسب فوت مکعب بر واحد زمان اندازه‌گیری می‌شود، اما وزن هوا و در نتیجه ضریب وزنی بخار آب به هوا (gr.lb.) به چگالی هوا برحسب فوت مکعب بستگی دارد. چگالی هوا با تغییر دما و فشار کل تغییر می‌کند. این نمودار محاسباتی به طراح کمک می‌کند تا مقدار صحیح چگالی را بر حسب فوت مکعب برای دماها و فشارهای مختلف هوا به دست آورد.

$$W_i = A * d * ۶۰ * Va * (Mo - Mi) \qquad ۵-۷$$

که

W_i: بار رطوبی ناشی از نفوذ هوا از یک حفره (gr/hr)

A: مساحت حفره (sq.ft.)

d: چگالی هوای نفوذی (lb/cu.ft.)

Va: سرعت هوای عبور کننده از حفره (ft/min)

Mo: رطوبت هوای داخل (gr/lb)

Mi: رطوبت هوای بیرون (gr/lb)

سادگی رابطه بالا تاحدودی فریبنده است. اما در حقیقت یافتن مساحت تعداد بیشمار حفره‌ها و همچنین سرعت هوای عبورکننده از آن‌ها بسیار دشوار است. فرض‌های متفاوت برای این مقادیر دلیل اصلی اختلاف نتایج محاسبات دو طراح سامانه با مهارت یکسان است. برخی از مباحث و راه‌های متفاوت در مورد این مسأله در زیر آمده است:

❖ نشت از دیوار خارجی:

ساختمان‌های سبک تجاری و صنعتی که با پنل‌های فولادی عمودی نورد شده ساخته شده‌اند، یک مسأله کلاسیک در ارزیابی نفوذ هوا هستند. در تئوری، دیوارهای فلزی به خوبی عایق رطوبت هستند، اما بین اتصالات دیوار به سقف، دیوار به کف و دیوار به دیوار شکاف‌های زیادی برای نفوذ رطوبت وجود دارد.

در هنگام کار با یک ساختمان موجود، طراح می‌تواند برای محاسبه دقیق نفوذ هوا یک پیمانکار آزمایش هوا و تعادل را برای انجام آزمایش بکار گیرد تا میزان توانایی ساختمان در نگهداری فشار هوای داخلی مثبت یا منفی تعیین گردد. هنگامی‌که ساختمان بسته است، یک پنل دارای فن بر روی درب قرار می‌گیرد و سپس اختلاف فشار دو طرف دیوار با جریان هوای فن مقایسه می‌شود. سپس جریان هوا برعکس شده و اندازه‌گیری دوباره انجام می‌شود.

این آزمایش هم برای فشارهای مثبت و هم فشارهای منفی اهمیت دارد؛ زیرا هوا از برخی حفره‌ها، شکاف‌ها و درزها از یک سمت خیلی راحت‌تر از سمت دیگر نشت می‌کند. برای مثال، درزگیرهای پنجره برای مقاومت در برابر نفوذ هوا از خارج از ساختمان طراحی شده‌اند، اما اگر ساختمان تحت فشار مثبت قرار گیرد، درزگیرها کارایی لازم را نخواهند داشت و در نتیجه موجب محاسبه غلط میزان نفوذ هوا می‌شود. اگر این آزمون به درستی انجام شود، نتایج حاصل بسیار دقیق‌تر از محاسبات تئوری خواهند بود.

برای فضاهای بزرگ‌تر، آزمایشگاه ملی بروک هاون آمریکا یک روش اندازه‌گیری نفوذ هوا با گاز ردیاب بنام آزمون AIMS توسعه داده است. بدین صورت که یک فرستنده و گیرنده گاز ردیاب به مدت دو تا چهار هفته در فضا قرار داده می‌شود. سپس دستگاه گیرنده را برای تحلیل به آزمایشگاه می‌فرستند. مقدار گاز جمع‌آوری‌شده توسط گیرنده به طور عکس متناسب با نفوذ هواست. به عبارت دیگر هر چه هوا بیشتر به داخل و خارج ساختمان نفوذ کند، با توجه به اینکه گاز با هوای تازه رقیق‌تر می‌شود،گیرنده گاز کمتری دریافت می‌کند. جزییات این روش در بخش تحقیقات مسکن موسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا موجود است.

فصل ۲۳ کتاب راهنمای اصول پایه ۸۹ ASHREA به تفصیل به موضوع نفوذ هوا به ساختمان پرداخته است. اطلاعات موجود در جداول زیر نیز از این کتاب راهنما گرفته شده است که

تخمینی از نشت هوا از دیوار خارجی ساختمانی که هنوز ساخته نشده است را فراهم می‌کند.

در استفاده از جداول، توجه داشته باشید که اگر هر چهار طرف فضای کنترلی در معرض هوای محیط قرار گیرد، در این صورت همه آن‌ها به طور همزمان در معرض باد نخواهند بود. پس از محاسبه نرخ نفوذ هوا طراح می‌تواند با استفاده از رابطه زیر بار رطوبی دیوار خارجی را به دست آورد:

$$W_i = Q * d * (Mo - Mi) * A \qquad ۸-۵$$

که

W_i: بار رطوبی ناشی از نفوذ هوا از حفره دیوار خارجی (gr/hr)

Q: نرخ نشت هوا (cu.ft./hr/sq.ft.)

d: چگالی هوای نفوذی (lb/cu.ft.)

Mo: رطوبت هوای داخل (gr/lb)

Mi: رطوبت هوای بیرون (gr/lb)

A: مساحت حفره (sq.ft.)

جدول ۵-۲ نشت هوا

	mph	۱	۲/۵	۵	۱۰	۱۵	۲۰
	اختلاف فشار fpm	۸۸	۲۲۰	۴۴۰	۸۸۰	۱۳۵۰	۱۷۵۰
	in.wc.	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۴۸	۰/۱۱	۰/۱۹۳
پنجره‌های قدیمی							
چوبی	کیپ‌نشده	۳	۸	۲۰	۴۹	۸۱	۱۲۲
	تقریبا کیپ‌شده، بدون نوار محافظ	۱	۳	۷	۱۷	۲۸	۴۳
	تقریبا کیپ‌شده، با نوار محافظ	۰/۵	۱/۵	۴	۹	۱۵	۲۳
	پنجره لولادار	۰/۲	۰/۶	۱/۵	۴	۶	۹
فلزی	پنجره لولادار	۶	۱۸	۴۳	۱۰۸	۱۷۶	۲۶۲
	پنجره دو لنگه بدون نوار محافظ	۲/۵	۸	۱۹	۴۷	۷۷	۱۱۴
	پنجره دو لنگه با نوار محافظ	۱	۳	۸	۱۹	۳۲	۴۷
پنجره‌های نو	چوبی و فلزی	۰/۵	۱/۵	۳/۶	۹	۱۵	۲۲
درب‌ها							
کشویی	آلومینیمی	۱/۵	۴	۱۰	۲۶	۴۳	۶۴
	چوبی	۰/۷	۲	۵	۱۳	۲۱	۳۱
مفصلی	کاملا کیپ‌شده	۰/۵	۱/۳	۳	۸	۱۳	۱۹
	کاملا کیپ‌شده با نوار محافظ	۰/۳	۱/۳	۳	۸	۷	۱۱
	کیپ‌نشده (شیار $\frac{1}{16}''$)	۵	۱۶	۴۰	۱۰۰	۱۵۸	۲۴۰

درب و قاب							
پنجره	دیوار بنایی درزگیری شده	۰/۵	۲	۴	۱۰	۱۸	۲۶
	دیوار بنایی درزگیری نشده	۰/۱	۰/۴	۰/۸	۱/۵	۳	۵
	دیوار چوبی	۰/۵	۱/۵	۳/۵	۹	۱۴	۲۱
آجر							
	ساده، ″۸/۵	۰/۳۵	۱	۲/۶	۵	۹	۰/۱۶
	″۸/۵ با دو پوشش پلاستر	n/a	۰/۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۵۰	۰/۸۰	۰/۱۴۰
	ساده، ″۱۳	۰/۳	۰/۹۵	۲/۳	۵	۸	۱۴
	″۱۳ با دو پوشش پلاستر	n/a	n/a	n/a	۰/۰۱۰	۰/۰۴۰	۰/۰۵۰
	″۱۳ با تخته کوبی و پلاستر	۰/۰۱	۰/۳	۰/۰۸	۰/۳	۰/۳۸	۰/۴۶
دیوار پیش‌ساخته	سه پوشش پلاستر	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۲۲
دیوار فلزی							
	اتصالات محکم	n/a	n/a	۰/۰۱۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸
	اتصالات متوسط	n/a	۰/۰۱۵	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۲۳
	اتصالات ضعیف	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۴۶
شیارها							
	شیار $\frac{1}{16}$″	۷	۲۳	۵۳	۱۳۰	۲۱۷	۳۱۵
	شیار $\frac{1}{8}$″	۱۳	۴۵	۱۰۵	۲۵۵	۴۳۵	۶۳۰
	شیار $\frac{1}{4}$″	۲۵	۹۰	۲۱۰	۵۱۵	۸۶۵	۱۲۶۰

این مقادیر نشان دهنده میزان فوت مکعب نشت هوا در هر ساعت در یک فوت از ترک هستند. همچنان می‌توان از فرمول ۵-۸ نیز استفاده کرد.

❖ نشت هوا از شکاف‌های ورودی نوار نقاله

محصولاتی که روی نقاله قرار دارند، هوای اتاق را تقریبا با سرعت نوار نقاله به هوای بیرون می‌رانند. هوای اتاق با جریان هوای مرطوب که از کنار و زیر نوار نقاله وارد اتاق می‌شود، جایگزین خواهد شد. به طور محافظه‌کارانه فرض می‌شود که از کل سطح آزاد شکاف‌های دیوار هوای مرطوب با سرعت تسمه نوار نقاله وارد فضا می‌شود. البته طراحان می‌توانند در مورد شرایط مختلف بررسی کنند و اگر از نوارهای پلاستیکی در شکاف‌ها استفاده می‌شود یا محصول عریضی بر روی نقاله است، می‌توان سطح آزاد را کمتر در نظر گرفت.

$$W_i = V * A * d * ۶۰ * (Mo - Mi) \qquad ۵-۹$$

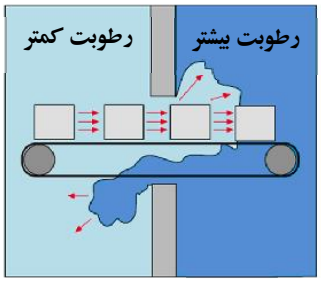
که

W_i: بار رطوبی ناشی از نشت هوا از شکاف‌های ورودی نقاله (gr/hr)

V: سرعت نوار (ft/min)

A: مساحت شکاف ورودی (sq.ft.)

d: چگالی هوا (lb/cu.ft.)



شکل ۵-۱۲

نقاله‌ها

محصولات روی نقاله هوا را به بیرون فضا می‌رانند که در نتیجه یک ناحیه کم فشار در ورودی نقاله به فضا ایجاد می‌شود. رطوبت از هوای محیط به فضا وارد می‌شود تا این اختلاف فشار را جبران کند.

Mo: رطوبت هوای داخل (gr/lb)

Mi: رطوبت هوای بیرون (gr/lb)

❖ نفوذ رطوبت در مقابل جریان هوای خروجی

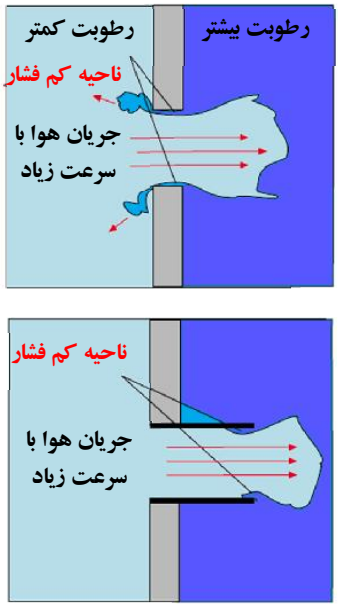
برای جلوگیری از ورود رطوبت به وسیله جریان هوا به فضا طراحان سامانه اغلب مقدار هوای تازه زیادی را از سامانه رطوبت‌گیری به فضا وارد می‌کنند تا فشار فضا نسبت به محیط تاحدودی مثبت شود. در این صورت به جای اینکه هوا از رخنه‌ها، شکاف‌ها و درب‌ها وارد اتاق شود، همواره به بیرون از فضا جریان می‌یابد. این روش برای شکاف‌ها و رخنه‌های کوچک همچون ترک‌ها بسیار موثر است، اما تجربه نشان داده است که فشار مثبت اتاق از ورود کل رطوبت از طریق شکاف‌های بزرگ‌تری همچون درب‌ها و شکاف‌های ورودی نقاله جلوگیری نمی‌کند.

در سال‌های گذشته طراحان سامانه عقیده داشتند که نفوذ جریان معکوس به دلیل اختلاف زیاد فشار بخار هوای مرطوب بیرون و هوای خشک داخل اتاق صورت می‌گیرد. چون اختلاف فشار بخار به اینچ جیوه و فشار هوا به اینچ آب اندازه‌گیری می‌شود، مهندسان استدلال می‌کردند که اختلاف فشار بخار می‌تواند بر اختلاف فشار هوا غلبه کند و در نتیجه جریان رطوبت در مقابل جریان هوا ایجاد می‌شود. در حقیقت تحقیقات اخیر نشان داده است که با اینکه این موضوع درست است، مقدار رطوبتی که با مکانیزم پخش انتقال می‌یابد در مقایسه با دو مکانیزم اختلاف دما در طول شکاف‌های بزرگ و نواحی کم فشار در لبه‌های شکاف‌های کوچک، بسیار اندک و حتی قابل چشمپوشی است.

آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که اگر اقدامات لازم انجام شود، هوای خروجی با سرعت ۱۵۰ فوت در دقیقه، نفوذ هوا به اتاق را بسیار کاهش می‌دهد. در شکاف‌های بزرگ و بلند مانند ورودی انبارها، برای جلوگیری از ایجاد جریان هوا به دلیل اختلاف فشار ناشی از اختلاف دما، می‌توان از پوشش‌های پلاستیکی استفاده کرد. جریان هوای مورد نیاز برای ایجاد سرعت ۱۵۰ فوت در دقیقه با استفاده از سطح مقطع باقیمانده پس از نصب پوشش‌ها محاسبه می‌شود، اما باید در ذهن داشت که پس از نصب پوشش پلاستیکی نیز همچنان شکاف‌هایی وجود دارد که با گردش هوا و فعالیت درب‌ها، باز و بسته می‌شوند.

در شکاف‌های کوچک‌تر می‌توان نفوذ هوا را با نصب تونل‌های کوتاه (با طول دو فوت) در اطراف شکاف کاهش داد. با این کار،نواحی کم فشار لبه‌های شکاف به خارج از فضا می‌رود و در سرعت ۱۵۰ فوت در دقیقه نفوذ هوا را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

این تجربه برای اطلاع طراحان ارائه شده است، اما باید در ذهن داشت که پایه‌های تئوری این دلایل تجربی ضعیف است و همه مکانیزم‌های انتقال رطوبت در این شرایط مشخص نشده است. استفاده از جریان هوای خروجی با سرعت ۱۵۰fpm، تونل‌ها و پوشش‌های پلاستیکی در کاهش نفوذ هوای معکوس در سطح کنترل رطوبت بالا نتایج خوبی در پی دارد، اما وقتی اختلاف رطوبت زیاد است، مثلا وقتی یک فضا در رطوبت نسبی کمتر از ٪۱۵ و در دمای $70^{o}F$ کنترل می‌شود، این روش‌ها موثر نیستند. در این شرایط، طراح باید فرض کند که علی‌رغم این اقدامات



شکل ۵-۱۳

بازشوهای کانال‌دار

رطوبت نفوذی از بازشوهای کانادار کوچک را می‌توان با فراهم کردن هوای کافی به فضا برای ایجاد جریان هوای خروجی از فضا با سرعت ۱۵۰ فوت بر دقیقه به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. اما تاثیر این کار در صورتی‌که بازشوها کانال‌کشی‌شده نباشند محدود است، ولی با کانال‌کشی بازشوها نواحی کم فشار ایجاد شده به دلیل سرعت زیاد هوا، به خارج از دیوار فضا منتقل می‌شود.

احتیاطی، رطوبت وارد فضا می‌شود. به طور محافظه‌کارانه فرض می‌شود که جریان هوا با سرعت ۵۰fpm از کل مساحت شکاف وارد فضا می‌شود.

❖ نفوذ هوا هنگامی‌که درب‌ها باز هستند

باز شدن درب‌های فضا موجب ایجاد اختلاف فشار محلی کوتاه مدت و آشفتگی هوا می‌شود که در نتیجه حتی اگر فضا تحت فشار مثبت باشد، هوای محیط وارد آن می‌شود. اگر دربی از فضا به هوای محیط باز شود، باید فرض کرد که تا زمانیکه درب باز است جریان هوا با سرعت میانگین باد محلی وارد فضا می‌شود. اگر دربی به فضای دیگری باز می‌شود، باید فرض کرد که تا زمانیکه درب باز است جریان هوا با سرعت ۵۰ فوت بر دقیقه وارد فضا می‌شود، مگر اینکه اطلاعات بهتری در دسترس باشد.

❖ نفوذ هوا از دالان هوابند

بسیاری از فضاهای کم‌رطوبت معمولا دارای دالان‌های هوابند با دو-درب هستند. از لحاظ اقتصادی وجود راهرو برای فضاهای سرد و فضاهای خشک با دمای نقطه شبنم زیر ۱۰°F ضروری است. به طور محافظه‌کارانه در محاسبات فرض می‌شود که با هر بار باز شدن ورودی راهرو شرایط رطوبی هوای راهرو مقدار متوسطی بین رطوبت هوای داخل و خارج فضا خواهد بود:

$$W_i = (h * l * w) * d * \left(\frac{Mo - Mi}{۲}\right) \qquad ۵-۱۰$$

که

W_i: بار رطوبی ناشی از هر بار باز شدن راهرو (gr/hr/opening)

$(h * l * w)$: طول، عرض و ارتفاع راهرو (cu.ft.)

d: چگالی هوا (lb/cu.ft.)

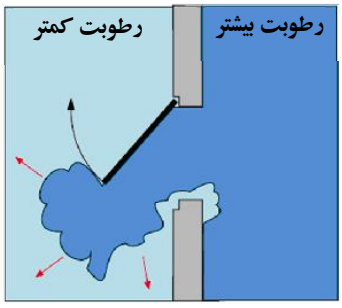
Mo: رطوبت هوای داخل (gr/lb)

Mi: رطوبت هوای بیرون (gr/lb)

❖ دفعات باز و بسته شدن درب‌ها در ساعت

ضعیف‌ترین تخمین در طراحی، تخمین تعداد دفعات باز شدن یک درب در هر ساعت است. اگر فضا ساخته شده است و از آن استفاده می‌شود، طراح می‌تواند فعالیت درب‌ها را به طور عملی ببیند و یا یک مکانیزم شمارشگر نصب کند. تعداد دفعات باز شدن درب‌ها به طور شگفت‌آوری زیاد خواهد بود. درب‌ها به ندرت کمتر از دو بار برای هر نفر در هر ساعت باز می‌شوند و اغلب دفعات باز شدن بیشتر از این مقدار است.

بار رطوبی ناشی از باز شدن درب‌ها می‌تواند ناامیدکننده باشد. این بار رطوبی زیاد، طراح را وادار می‌کند تا با ناظرهای ساختمان گفت‌وگوی صمیمانه‌ای در مورد دفعات باز شدن درب‌ها داشته باشد و آنگاه تعداد باز و بسته شدن کمتر و خوش بینانه‌تری در محاسبات بکار گیرد. اما



شکل ۵-۱۴

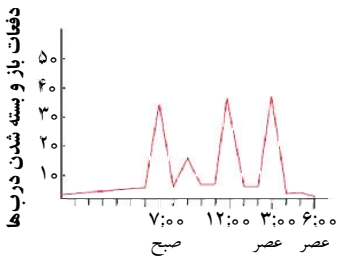
باز و بسته شدن درب‌ها

هر بار که درب فضا باز می‌شود، هوای مرطوب از طریق "جریان‌های ادی" که به دلیل حرکت درب ایجاد می‌شوند، وارد فضا می‌شود. برای ایجاد فضای بسیار خشک یک راه برای کاهش بار رطوبی ناشی از این منبع رطوبی استفاده از دالان هوابند برای هر کدام از درب‌ها است.

طراح باید در ذهن داشته باشد که ممکن است ناظرها و پرسنل ساختمان تغییر کنند و اگر ظرفیت سامانه کمتر از حد مورد نیاز باشد، افراد صحبت‌هایی را که قبلا انجام شده است، به خاطر نمی‌آورند. اگر طراح از این لحاظ دچار تردید شود، بهتر است که به جای تخمین‌خوش‌بینانه، تخمین محتاطانه‌تری از تعداد دفعات باز شدن درب‌ها بزند.

۵-۲-۷ بارهای رطوبی متناوب و پیوسته

در محاسبات بالا بارهای رطوبی به صورت پیوسته و حتی جریانی از رطوبت به داخل فضا از منابع مختلف و به صورت نرخ ثابتی از رطوبت در هر ساعت مورد بررسی قرار گرفت. در حقیقت ندرتا بارهای رطوبی کاملا یکنواخت هستند. به عنوان مثال افرادی که برای کار ساعت ۷ صبح وارد یک فضای خشک می‌شوند، برای استراحت ساعت ۱۲ فضا را ترک می‌کنند. بنابراین تعداد دفعات باز شدن درب‌ها در شروع و پایان شیفت‌های کاری بسیار زیاد است و در بین این بازه زمانی فعالیت درب‌ها بسیار کم است. در این شرایط طراح دو انتخاب دارد: یا میانگین بارهای متناوب را به دست آورد و یا از ماکزیمم بار رطوبی در ساعت برای محاسبات استفاده کند. هر کدام از این دو راه مزایا و معایبی دارند.



شکل ۵-۱۵

بارهای متناوب

بسیاری از بارهای رطوبی پیوسته نیستند و در زمان‌های مختلف شبانه روز و به صورت گسسته وارد فضا می‌شوند. طراح باید تصمیم بگیرد که آیا سطح کنترل رطوبت باید برای اوج بار رطوبی تعیین شود، یا می‌توان خطر بیشتر بودن رطوبت فضا از سطح کنترلی در بازه زمانی کوتاهی از سال را برای کاهش هزینه سامانه و بهبود عملکرد آن پذیرفت. این تصمیم‌گیری به طور کلی به اندازه بارهای متناوب و مدت زمانی‌که سامانه کوچک‌تر برای گرفتن بار رطوبی (دقیقه، ساعت یا روز) نیاز دارد، بستگی خواهد داشت.

اگر طراح از ماکزیمم بار رطوبی استفاده کند، سامانه همواره ظرفیت مورد نیاز برای کنترل فضا در شرایط رطوبی مورد نظر را دارد، اما در شرایط دیگر ظرفیت آن بیش از اندازه خواهد بود. این بدان معنی است که در این شرایط کنترل سامانه دشوار خواهد بود، انرژی زیادی نیاز خواهد داشت و هزینه نصب و بهره‌برداری آن بسیار بیشتر می‌شود. اگر طراح از مقدار میانگین رطوبت و تناوب‌های زمانی با بار رطوبی کم استفاده کند، کنترل این سامانه راحت‌تر از یک سامانه بزرگ خواهد بود و هزینه نصب و راه‌اندازی آن کمتر می‌شود. از طرف دیگر ممکن است در صورتی که ماکزیمم بار رطوبی اتفاق بیفتد، سامانه ظرفیت کافی برای کنترل فضا در شرایط رطوبی مورد نظر را نداشته باشد.

اهمیت این مسأله به مقدار بارهای متناوب بستگی دارد. اگر مقدار بار متناوب نسبت به کل بار کم باشد، انحراف کم از شرایط کنترلی بی‌اهمیت و ناچیز است. همچنین ممکن است در زمان ایجاد بارهای متناوب کنترل شرایط رطوبی اهمیت نداشته باشد. برای مثال وقتی‌که یک کارخانه محصولات غذایی برای شستشو آب‌پاشی می‌شود، بیشتر شدن میزان رطوبت فضا مهم نیست، بلکه مسأله مهم‌تر مدت زمانی است که طول می‌کشد تا فضا رطوبت‌گیری شود. همچنین، اگر ماکزیمم مقدار مجاز بار رطوبی فضا اهمیت داشته باشد، طراح یا باید سامانه رطوبت‌گیری بزرگی برای گرفتن بار ماکزیمم طراحی کند و یا سامانه ثانویه‌ای را طراحی کند که وقتی بارهای متناوب بزرگ اتفاق می‌افتند، به سامانه اصلی اضافه شود.

۵-۲-۸ بار رطوبی هوای تازه

همه بارهای رطوبی که تا اینجا ذکر شده‌اند، داخلی هستند. بهتر است گفته شود که داخل فضا

اتفاق می‌افتند و در واقع پایین‌دست[1] سامانه رطوبت‌گیری هستند. اما، عموما بیشترین میزان بار رطوبی از هوای تازه که از بالادست[2] سامانه گرفته می‌شود، ناشی می‌شود. بار رطوبی هوای تازه قبل از ورود به فضا گرفته می‌شود. این موضوع بسیار اهمیت دارد، زیرا اگر بار رطوبی هوای تازه مستقیما وارد فضا شود، اندازه سامانه رطوبت‌گیری مورد نیاز بسیار بزرگ‌تر می‌شود.

برای مثال سامانه‌ای را فرض کنید که هوا با رطوبت ۲۵gr/lb تولید می‌کند تا سطح کنترلی فضا را در ۳۰gr/lb حفظ کند. اگر بار رطوبی داخلی ۴۰۰۰۰ گرین در ساعت باشد، سامانه باید ۱۷۷۷cfm هوا با رطوبت ۲۵ گرین تولید کند تا فضا را در ۳۰ گرین حفظ کند. هوای خشک مورد نیاز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{W_t}{d * ۶۰ * (Mm - Mc)} = \frac{۴۰۰۰۰}{۰/۰۷۵ * ۶۰ * (۳۰ - ۲۵)} = ۱۷۷۷cfm \qquad ۱۱-۵$$

که

Q: نرخ جریان هوای مورد نیاز برای گرفتن بار رطوبی و نگهداری فضا در شرایط کنترلی تعیین‌شده (cfm)

W_t: کل بار رطوبی داخل فضا (gr/hr)

d: چگالی هوا (lb/cu.ft.)

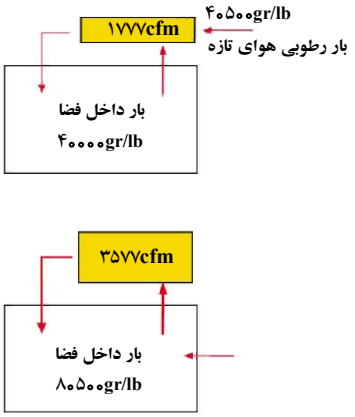
M_m: سطح کنترل رطوبت داخل فضا (gr/lb)

M_i: سطح رطوبت هوای خروجی از سامانه رطوبت‌گیری به فضا (gr/lb)

اگر ۱۰۰cfm هوا با رطوبت ۱۲۰gr/lb مستقیما از محیط بیرون برای تهویه به فضا آورده شود، ۴۰۵۰۰ گرین رطوبت در هر ساعت به بار رطوبی داخلی افزوده می‌شود. حل معادله بالا برای ۸۰۵۰۰gr/hr بار رطوبی داخلی، نشان‌دهنده این است که اکنون سامانه باید ۳۵۷۷cfm هوا با رطوبت ۲۵gr/lb برای کنترل شرایط فضا در ۳۰ گرین رطوبت تولید کند که بیش از دو برابر ظرفیت سامانه است.

به همین دلیل است که در صورت امکان، رطوبت هوای تازه قبل از ورود به اتاق باید گرفته شود که در نتیجه سامانه رطوبت‌گیری کوچک‌تر و بسیار به صرفه‌تر می‌شود. از این رو طراح باید دقت کند که در محاسبات بار تهویه را به بار داخلی فضا اضافه نکند، زیرا در غیر این صورت ظرفیت سامانه بسیار زیاد خواهد شد.

به سه دلیل هوای تازه به سامانه آورده می‌شود: برای تهویه هوای مورد نیاز افراد، برای جبران هوای خروجی از هود و فن فضا یا برای ایجاد فشار مثبت داخل فضا نسبت به محیط بیرون. مقدار هوای مورد نیاز برای هر یک از این هدف‌ها، در کاربردهای مختلف به طور قابل ملاحظه‌ای



شکل ۵-۱۶

کمینه کردن بارهای داخلی

گرفتن رطوبت هوای تهویه قبل از اینکه وارد فضا شود، اندازه و هزینه سامانه رطوبت‌گیری را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. اگر طراح بخواهد این کار را انجام دهد، لازم است که محاسبات بارهای رطوبی هوای تهویه و بارهای رطوبی داخلی فضا به صورت مجزا انجام شود تا مقدار هوای خشک مورد نیاز اشتباه نشود.

[1] Down stream
[2] Upstream

متفاوت است.

- برای تهویه افراد

استاندارد ۱۹۹۹-۶۲ ASHREA (تهویه برای کیفیت قابل قبول هوای داخلی) حداقل هوای تازه مورد نیاز برای تهویه را ۱۵ تا ۲۵cfm برای هر نفر مشخص کرده است. مقدار دقیق آن به نوع ساختمان و کاربرد آن بستگی دارد. با این حال، مقررات محلی ساختمانی[1] ممکن است متفاوت باشند. در شرایطی که قوانین محلی، حداقل هوای مورد نیاز برای تهویه را نسبت به استاندارد ۶۲ ASHREA بیشتر تصویب کرده‌اند، طراح باید از این قوانین پیروی کند.

- هوای جبرانی برای هوای خروجی از فن‌ها

هودها هوای فضا را خارج می‌کنند و در نتیجه هوای تازه محیط باید جایگزین هوای خروجی شود. مقدار هوای مورد نیاز با توجه به اندازه هود و قدرت فن آن متغیر است. اغلب هودها هوا را با سرعت ۱۵۰fpm از سطح مقطع خود خارج می‌کنند. اما طراحی‌های متفاوتی وجود دارد، به همین دلیل طراح باید مقدار هوای خروجی از یک هود را از سازندگان آن سوال کند. در مورد فن هود نیز اقدامات محتاطانه مشابهی باید صورت پذیرد. اگر فن هود کنترل نشود، هوای اتاق را متناسب با فشار داخل و خارج فضا، خارج می‌کند. اگر در یک فضای کنترلی از فن تخلیه هوا استفاده می‌شود، طراح باید اطمینان حاصل کند که هوای خروجی از فضا تعیین و کنترل می‌شود.

- هوای جبرانی برای تنظیم فشار هوای فضا

مقدار هوای لازم برای افزایش و حفظ فشار مثبت فضا به سطح آزادی که هوا از آن به محیط نشت می‌کند و به شکل لبه‌های شکاف‌ها بستگی دارد. کتاب راهنمای "مهندسی فن[2]" که شرکت بوفالو فورج[3] آن را منتشر کرده است، فرمول زیر را برای تخمین جریان هوای لازم برای ایجاد مقدار فشار مثبت مشخص در یک طرف شکاف چهارگوش ارائه کرده است:

$$Q = ۴۰۰۵ * ۰/۶ * A * \sqrt{SP} \qquad ۱۲-۵$$

که

Q: نرخ جریان هوای لازم برای ایجاد فشار مثبت مشخص در یک فضا دارای شکاف چهارگوش (cfm)

۴۰۰۵: ضریب محاسبات (بی‌بعد)

۰٫۶: ضریب ورود هوا به شکاف چهارگوش (بی‌بعد)

A: مساحت بازشو (.sq.ft)

Mm: اختلاف فشار استاتیک هوا (.in.wc)

[1] Local building codes
[2] Fan Engineering
[3] Buffalo Forge Company

برای شکاف‌های کوچک‌تر و ترک مانند این رابطه به دلیل مقاومت بیشتر جریان هوای آشفته در لبه‌ها در مقایسه با جریان یکنواخت وسط شکاف تغییر می‌کند. در این صورت عبارت آخر معادله از $SP^{\circ}/^{5}$ (جذر فشار استاتیک هوا) به $SP^{\circ}/^{65}$ تغییر می‌کند.

پس از تعیین کل هوای تازه مورد نیاز طراح می‌تواند بار رطوبی هوای تازه را محاسبه کند. قابل ذکر است که اگر یک سامانه برای خروج هوا و یا تنظیم فشار فضا به طور پیوسته کار کند، ممکن است قسمتی و یا کل هوای مورد نیاز برای تهویه افراد را تامین کند.

$$W_m = Q * d * ۶۰ * (Mo - Mi) \qquad ۱۳-۵$$

که

W_m: بار رطوبی هوای تازه (gr/hr)

Q: مجموع جریان هوای لازم برای تهویه، تنظیم فشار فضا و هوای جبرانی (cfm)

d: چگالی هوا (lb/cu.ft.)

Mo: رطوبت هوای داخل (gr/lb)

Mi: رطوبت هوای بیرون (gr/lb)

۵-۳ محاسبات نمونه بار رطوبی

همانطور که در ابتدای این فصل شرح داده شد، در محاسبات بارهای رطوبی افزون بر معادلات ساده و مشخص، به فرضیات دیگری نیز نیاز است. دو فرد با دانش و تجربه یکسان ممکن است نتایج متفاوتی برای یک پروژه به دست آورند.

برای دستیابی به بهترین نتایج ممکن، سازنده تجهیزات، طراح سامانه، پیمانکار نصب سامانه و مالک باید از فرضیات اطلاع داشته باشند و در مورد مقادیر تعیین شده نهایی به توافق برسند.

مثال‌هایی که در زیر آمده است، استدلال‌ها و محاسبات ریاضی را برای دو نوع پروژه متفاوت نشان می‌دهند: یک انبار غیر فعال که سطح کنترل رطوبت آن تقریبا بالاست و یک محیط تولید فعال که در آن بار رطوبی زیاد و سطح کنترلی رطوبت پایین است.

افزون بر این دو مثال در فصل هفتم (طراحی سامانه) پنج پروژه دیگر ارائه شده است که محاسبات بارهای رطوبی را با جزئیات عددی کمتری نسبت به این فصل نشان می‌دهند.

۵-۳-۱ رطوبت‌گیری انبار

یک مرکز تولید قطعات الکترومکانیکی واقع در شیکاگو، ایلینویز، قطعات تراشکاری‌شده و مواد خام را در یک انبار نزدیک کارخانه ذخیره می‌کند. مشکلات زیادی ناشی از خوردگی سطوح بسیار صیقلی ایجاد شده است. هدف این پروژه کنترل ماکزیمم رطوبت نسبی ٪۴۰ در تمام طول سال برای کاهش کارکرد مجدد ناشی از خوردگی است.

مهندس پروژه اطلاعات آب و هوایی محلی را ارزیابی می‌کند و تصمیم می‌گیرد که دمای $۹۵^{\circ}F$ و رطوبت ۱۴۶gr/lb را برای تابستان و دمای $۵^{\circ}F-$ و رطوبت ۴gr/lb را برای زمستان بکار

گیرد. این شرایط "حداکثر یک‌درصد" شرایط تابستان و زمستان هستند. مهندس استدلال می‌کند که با اینکه بکارگیری این شرایط موجب بزرگ شدن سامانه رطوبت‌گیری مورد نیاز می‌شود، اما چون هزینه سالانه دوباره‌کاری قطعات به دلیل خوردگی بیش از ۲۵۰۰۰۰ دلار است، هزینه اضافی سامانه رطوبت‌گیری بزرگ در طول چند ماه کارکرد جبران می‌شود. شیکاگو در ارتفاع ۶۵۸ فوتی از سطح دریا قرار دارد، بنابراین مهندس از مقدار .۰٫۰۷۰lbs/cu.ft برای چگالی هوا در محاسبات استفاده می‌کند. دمای میانگین سالانه آب‌های زیرزمینی در منطقه ۵۲°F است که برای محاسبه نفوذ رطوبت از بتون کف فضا مورد نیاز است.

برای تعیین دما و رطوبت کنترلی داخل فضا برای انجام محاسبات، باید کمترین رطوبت داخل فضا تعیین گردد، در حالی که رطوبت بیرون بیشترین مقدار را دارد؛ به عبارت دیگر، باید شرایطی که بیشترین اختلاف فشار بخار را بوجود می‌آورد، تعیین گردد. با توجه به اطلاعات آب و هوایی محلی، وقتی دمای حباب خشک هوا ۸۵°F است، حداکثر رطوبت محیط بیرون برابر با ۱۴۶gr/lb می‌شود. در این دمای محیط، دمای ساختمان ۷۵°F است. وقتی دمای داخل فضا ۷۵°F و رطوبت نسبی آن ٪۴۰ است، میزان رطوبت آن gr/lb ۵۲ خواهد بود.

این انبار ۲۵۰ft طول، ۷۵ft عرض و ۱۴ft ارتفاع دارد. بین انبار و کارخانه یک مسیر برای انتقال مواد وجود دارد. انبار دارای دو درب کیپ‌نشده به ابعاد ۱۰ft در ۱۰ft است. یکی از درب‌ها به مسیر انتقال باز می‌شود و درب دیگر به فضای بارگیری راه دارد. درب فضای بارگیری در هر ساعت دو بار و به مدت ۳۰ ثانیه برای ورود و خروج کامیون‌ها باز می‌شود. درب انتقال مواد به کارخانه نیز هر ساعت هشت یک بار و به طور میانگین به مدت ۳۰ ثانیه برای انتقال مواد باز می‌شود.

دیوارهای انبار از آجر با ضخامت ۸٫۵ اینچ ساخته شده‌اند و سطح داخلی آن‌ها با رنگ لاتکس صنعتی عایق بخار رنگ‌آمیزی شده است. کف انبار از بتن با ضخامت ۸ اینچ که روی سنگ‌های خردشده قرار دارد، بدون عایق بخار ساخته شده است. سقف از نوع ورقه فلزی پیش‌ساخته است.

دو کارمند برای بسته‌بندی و انجام کارهای اداری در طول شیفت کاری روزانه در انبار کار می‌کنند و قطعات در مقواهای نازک بسته‌بندی می‌شوند و روی پالت‌های چوبی قرار داده می‌شوند. وزن خشک همه مقواها تقریبا ۵۰۰۰lbs است. مواد موجود در انبار در هر سال تقریبا شش بار تعویض می‌شوند.

بخش داخلی انبار فضایی باز و بدون پارتیشن‌بندی است و اتاق در آن وجود ندارد. بجز هوایی که از دیوارهای ساختمان به داخل نشت می‌کند، سامانه سرمایشی یا هوای تازه برای تهویه وجود ندارد.

برگه‌های محاسبات انجام شده در صفحات بعدی نشان‌دهنده نحوه انجام محاسبات بار است. برخی از ملاحظات دیگر مهندس پروژه عبارتند از:

- شرایط طراحی هوای محیط

بزرگ‌ترین مشکلات مربوط به خوردگی در بهار و پاییز اتفاق می‌افتد که افزایش رطوبت هوا موجب چگالش بخار آب بر سطوح سرد فلزی مواد خام و قطعات پرداخت‌سطحی‌شده می‌شود. مهندس می‌تواند حد پایین رطوبت در بهار و پاییز را انتخاب کند، اما برای اطمینان بیشتر تصمیم می‌گیرد که شرایط تابستان را در نظر بگیرد. همچنین چون رطوبت‌گیر در کل طول سال کار می‌کند، طراح هیتر احیا رطوبت‌گیر را بر مبنای دمای هوای زمستان انتخاب می‌کند تا از ظرفیت کافی هیتر برای احیا دسیکنت اطمینان حاصل شود.

- نفوذ از ساختمان

هوا در تابستان بسیار گرم و نامساعد می‌شود و برای جلوگیری از جمع شدن حرارت در انبار، در سقف آن تهویه نصب شده است. این تهویه‌ها باید با تخته‌های چند لایه پوشیده شود و با نوارهای فلزی درزگیری گردد. مهندس فرض می‌کند که این کار صورت می‌گیرد و بودجه کمی نیز برای سامانه تبرید کوچک و قابل حمل برای کارگرها در نظر می‌گیرد. همچنین دو درب غیر فعال انبار با نوارهای فلزی کاملا درزبندی می‌شوند تا از نشت هوا جلوگیری شود و شیشه شکسته یکی از درب‌ها نیز تعویض می‌گردد. در نهایت سوراخ‌های بزرگی که روی دیوار برای لوله‌های دودکش هیتر و گاز ایجاد شده است، با ورقه‌های فلزی و عایق پشم شیشه درزبندی می‌شوند.

- مشاهدات در مورد بارهای رطوبی

محاسبات اهمیت محدود کردن نفوذ هوا از درز درب‌ها و شکاف‌ها را نشان می‌دهد. استفاده از درزگیرها و بست‌های مناسب‌تر باعث کوچک‌تر شدن و کم‌هزینه‌تر شدن سامانه مورد نیاز و کاهش هزینه بهره‌برداری آن می‌شود. درب‌های باز فضای بارگیری، بار رطوبی زیادی را در پی دارند. با استفاده از پوشش‌های پلاستیکی بر درب ورودی، بار رطوبی تا حدودی کاهش می‌یابد و همچنین نصب چراغ یا زنگ خطر بر روی درب‌ها برای یادآوری کارگران برای بستن درب‌ها بلافاصله پس از ورود یا خروج کامیون‌ها می‌تواند در کاهش بار رطوبی کمک‌کننده باشد. همچنین توجه داشته باشید که چندین بار رنگ‌آمیزی و یا استفاده از چند نوار عایق بخار[1] برای کاهش نفوذ رطوبت تغییر قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. بهتر است به کم‌کردن شکاف‌ها و کاهش تعداد دفعات باز شدن درب‌ها توجه شود.

[1] Vapor barrier film

برگه‌های محاسبات بار رطوبتی

اطلاعات پروژه

اسم پروژه:

انبار قطعات

مکان:

شیکاگو، ایلینویز

کاربرد:

حفاظت از خوردگی

محاسبه‌گر: تاریخ:

ام، مک دونالد ۲۰۰۲/۲

ناظر: تاریخ:

اس، بریکلی ۲۰۰۲/۳

هدف پروژه:

هزینه کارکرد مجدد با جلوگیری از خوردگی قطعات دارای سطوح صیقلی کاهش داده شود.

شرایط طراحی

	حالت حاد آب و هوا		آب زیرزمینی	شرایط داخلی	
	تابستان	زمستان		اتاق	ساختمان
دمای حباب خشک	۹۵	-۵	۵۲	۷۵	۷۵
دمای نقطه شبنم	۷۶	-۴	۵۲	۴۹	۵۸
نسبت رطوبت	۱۴	۶۵	۵۸	۵۲	۷۲
فشار بخار	۰/۹۸۰	۰/۰۰۱	۰/۳۹۵	۰/۳۵۰	۰/۴۸۰

ارتفاع ۶۵۸ بالاتر از سطح دریا؛ چگالی استاندارد هوا = ۰/۰۷۰ lb/ft3

نفوذ

	بار نفوذ (gr/hr)	فشار بخار کمتر (in. hg)	فشار بخار بزرگ‌تر (in. hg)	ضریب نفوذ (gr/hr/sq. ft.)	سطح مقطع (sq. ft.)
دیوار ۱:	۱۴۰ gr/lb =	(۰/۳۵	– ۰/۹۸) ×	۰/۲۱ ×	۱۰۵۰
دیوار ۲:	۱۴۰ gr/lb =	(۰/۳۵	– ۰/۹۸) ×	۰/۲۱ ×	۱۰۵۰
دیوار ۳:	۴۶۳ gr/lb =	(۰/۳۵	– ۰/۹۸) ×	۰/۲۱ ×	۳۵۰۰
دیوار ۴:	۴۶۳ gr/lb =	(۰/۳۵	– ۰/۹۸) ×	۰/۲۱ ×	۳۵۰۰
سقف:	۱۷۷ gr/lb =	(۰/۳۵	– ۰/۳۹۵) ×	۰/۲۱ ×	۱۸۷۰۰
کف:	– gr/lb =	(–	– –) ×	– ×	– –

مقدار کل: ۱۳۸۳ gr/lb

محصولات، بسته‌بندی و لباس‌ها

	بار رطوبتی (gr/hr)	گرین بر پوند	محتوای رطوبتی نهایی (gr/lb)	محتوای رطوبتی اولیه (gr/lb)	نرخ ورود (gr/lb)
مورد ۱:	۹۵۸ gr/lb =	۷۰۰۰ ×	(۰/۰۷	– ۰/۱۱) ×	۳/۴۲
مورد ۲:	..... gr/lb =	۷۰۰۰ ×	(.....	– .....) ×	.....
مورد ۳:	..... gr/lb =	۷۰۰۰ ×	(.....	– .....) ×	.....
مورد ۴:	..... gr/lb =	۷۰۰۰ ×	(.....	– .....) ×	.....

مقدار کل: ۹۵۸ gr/lb (۵۰۰۰ lbs × ۶) ÷ (۸۷۶۰ hrs/yr) = ۳/۴۲ lb/hr

اجاق‌های سرباز

	بار رطوبتی (gr/hr)	تولید بخار آب (gr/ft³)	نرخ سوختن گاز (ft³/hr)
	صفر gr/lb =	..... ×	.....

مقدار معمول ۶۵۰ gr/ft3

افراد

	بار رطوبتی (gr/hr)	بار رطوبتی (gr/hr) برای هر فرد	تعداد افراد
نشسته:	..... gr/lb =	..... ×	.....
ایستاده:	..... gr/lb =	..... ×	.....
کار سبک:	..... gr/lb =	..... ×	.....
کار متوسط:	۱۱۰۰۰ gr/lb =	۵۵۰۰ ×	۲ .
بازدیدکننده اتاق:	..... gr/lb =	..... ×	.....

مقدار کل: ۱۱۰۰۰ gr/lb

سطوح مرطوب

	بار رطوبتی (gr/hr)	گرین بر پوند	فشار بخار هوا (in. hg)	فشار بخار سطح آب (in. hg)	نرخ انتقال گرمای نهان (Btu/ sq.ft. in.hg)	سطح مقطع مرطوب (sq. ft.)
	صفر gr/lb =	۷۰۰۰ ×	[(.....	– .....) ×	.....	] / .....

دیوارهای خارجی

	بار رطوبی (gr/hr)		چگالی هوا (lb/ft³)		رطوبت داخلی (gr/hr)		رطوبت خارجی (gr/hr)	نرخ نفوذ هوا (ft³/hr/ft.)		سطح مقطع (sq. ft.)
دیوار ۱:	۴۱۵ gr/lb	=	۰/۰۷	× (	۵۲	–	۱۴۶) ×	۰/۰۶	×	۱۰۵۰
دیوار ۲:	۱۳۸۲ gr/lb	=	۰/۰۷	× (	۵۲	–	۱۴۶) ×	۰/۰۶	×	۳۵۰۰

مقدار کل: ۱۷۹۷ gr/lb

شکاف‌ها

	بار رطوبی (gr/hr)		چگالی هوا (lb/ft³)		رطوبت داخلی (gr/hr)		رطوبت خارجی (gr/hr)	نرخ نفوذ هوا (ft³/hr/ft.)		طول شکاف یا مساحت اجزای آن (sq. ft. یا ft)	
قاب درب:	۱۴۰۰ gr/lb	=	۰/۰۷	× (	۵۲	–	۷۲) ×	۲۵	×	۴۰	.
پنجره‌ها:	۴۵۵۳۳۶ gr/lb	=	۰/۰۷	× (	۵۲	–	۱۴۶) ×	۸۶۵	×	۸۰	.
کانال‌ها:	..... gr/lb	=	.....	× (	.....	–	.....) ×	.....	×	.....	

مقدار کل: ۴۵۶۷۳۶ gr/lb

ورودی درب‌ها

	بار رطوبی (gr/hr)		رطوبت هوای داخل (gr/hr)		رطوبت هوای خارج (gr/hr)	زمان باز بودن (min/hr)	چگالی هوا (lb/ft³)	سطح مقطع باز (sq. ft.)	سرعت جریان هوا (fpm)
درب ۱:	۲۸۰۰۰ gr/lb	= (	۵۲	–	۷۲) ×	۴	× ۰/۰۷	× ۱۰۰	× ۵۰ .
درب ۲:	۶۳۶۹۴۴ gr/lb	= (	۵۲	–	۱۴۶) ×	۱	× ۰/۰۷	× ۱۰۰	× ۹۶۸ .

	بار رطوبی (gr/hr)		رطوبت هوای داخل (gr/hr)		رطوبت هوای خارج (gr/hr)	تعداد باز شدن (تعداد در ساعت)	چگالی هوا (lb/ft³)	طول، عرض و ارتفاع هوابند (ft)
راهرو هوابند:	– gr/lb	= [(..... – .....) / 2] ×	.....	×	.....	×	× (.....)	× ..... × ..... × .....)

مقدار کل: ۶۶۴۹۴۴ gr/lb

ورودی از دیوارها

	بار رطوبی (gr/hr)		دقیقه	چگالی هوا (lb/ft³)	رطوبت داخلی (gr/hr)		رطوبت خارجی (gr/hr)	سرعت هوای ورودی (fpm)	سطح مقطع (sq. ft.)
ورودی نقاله‌ها:	..... gr/lb	= ..... ×	۶۰ ×	.....	× (.....	– .....) ×	.....	×	
راهرو و حفره‌های باز:	..... gr/lb	= ..... ×	۶۰ ×	.....	× (.....	– .....) ×	.....	×	

مقدار کل: صفر gr/lb

هوای تازه

مقدار هوای تازه برای افراد، هوای جبرانی و تنظیم فشار اتاق:

	بار رطوبی (gr/hr)		دقیقه		چگالی هوا (lb/ft³)	سطح رطوبت کنترلی (gr/hr)		رطوبت خارجی (gr/hr)	نرخ جریان هوای تازه (cfm)
	صفر gr/lb	=	۶۰	× ..... ×	.....	× (.....	– .....) ×	.....	

خلاصه

نفوذ:	۱۳۹۸
محصولات:	۹۵۸
افراداجاق گاز:	۱۱۰۰۰
اجاق گاز:	---
سطوح مرطوب:	---
دیوارهای خارجی:	۱۷۹۷
شکاف‌ها:	۴۵۶۷۳۶
ورودی درب‌ها:	۶۶۴۹۴۴
ورودی دیوارها:	---
بار رطوبی داخلی کل:	۱۱۳۶۸۱۹
هوای تازه:	صفر

۵-۳-۲ اتاق تولید شیشه‌های چند لایه

یک سازنده شیشه‌های اتومبیل در دالاس، تگزاس، در حال گسترش کارخانه برای تولید شیشه‌های چند لایه است. در این فرآیند از لایه‌های پلاستیکی پلی‌وینیل‌بوتیرال[1] به عنوان چسب بین صفحات شیشه‌ای استفاده می‌شود و این پلاستیک بسیار رطوبت‌گیر است. اگر این پلاستیک رطوبت جذب کند، رطوبت در کوره بخار می‌شود که در نتیجه در بین لایه‌های شیشه‌ای حباب جمع می‌شود. در این صورت شیشه غیر قابل استفاده خواهد بود.

هدف پروژه این است که با حفظ رطوبت نسبی اتاق در ٪۲۰ از جذب رطوبت توسط پلاستیک جلوگیری شود. دمای فضا اهمیتی ندارد، اما باید برای کارگران مناسب باشد و برای جلوگیری از انبساط و انقباض صفحات بزرگ پلاستیکی، باید از نوسان دما جلوگیری شود. طراح دمای ۷۰°F را به عنوان دمای کنترلی برای فضا تعیین می‌کند و بدین معنی است که در رطوبت نسبی٪۲۰، ۲۲gr/lb رطوبت در فضا وجود دارد.

اتاق درون کارخانه موجود ساخته می‌شود که در تابستان به دمای ۸۰°F و رطوبت نسبی ٪۵۰ می‌رسد. مواد خام از انباری که شرایط داخلی آن کنترل نمی‌شود، به اتاق آورده می‌شوند. دما و رطوبت محیط حداکثر به ۱۰۲°F و ۱۴۶gr/lb می‌رسد. برای کمینه کردن نفوذ رطوبت از انبار هنگام ورود محصول به اتاق، طراح یک دالان هوابند برای ورودی محصولات در نظر گرفته است. تعداد دفعات انتقال مواد خام متفاوت است، اما ظاهرا حداکثر ۴ بار در ساعت انجام می‌شود. بسته‌بندی‌های مواد نیز مقداری رطوبت به همراه دارند. وزن بسته‌بندی مواد مصرفی در هر ساعت ۱۵lbs است.

پنج کارگر در اتاق مشغول به کار هستند و گاهی نیز ناظران و تکنسین دستگاه‌ها وارد اتاق می‌شوند. طراح حضور پنج کارگر دائمی و سه نفر موقت را به طور همزمان مجاز فرض می‌کند. شمارشگر موجود روی درب‌ها نشان می‌دهد که درب ورودی پرسنل در طول تولید در هر ساعت ۱۶ بار باز می‌شود. ابعاد درب ۳۰ اینچ در ۶ اینچ است. متاسفانه درب ورودی پرسنل دارای راهرو نیست.

یک نقاله محصولات را از طریق شکافی در دیوار به ارتفاع ۲ft و عرض ۴ft از فضا خارج می‌کند. طراح تصمیم می‌گیرد که مساحت آزاد شکاف نقاله را با استفاده از تونل‌های کوتاه و همچنین پوشش پلاستیکی در انتهای هر تونل کاهش دهد. همچنین، مقداری هوای تازه نیز برای پرسنل به فضا آورده می‌شود. این هوا از شکاف خروجی نقاله از فضا خارج می‌شود و نفوذ هوای مرطوب از این بخش را کمینه می‌سازد.

طول اتاق ۶۰ft، عرض آن ۴۰ft و ارتفاع آن ۱۰ft است. یکی از چهار دیوار فضا از دیوارهای کارخانه تشکیل شده است و دیوارهای دیگر فضا را از بخش‌های دیگر کارخانه جدا می‌کنند. کف اتاق از بتون با ضخامت ۸in ساخته شده است و دیوارهای بتونی آن با لایه‌های انعطاف‌پذیر

[1] Polyvinyl butyral

آلومینیمی عایق بخار و همچنین تخته چند لایه و رزین پلاستیکی پوشیده شده است. سقف اتاق از بتون‌های قالبی تشکیل شده است و به عنوان طبقه دوم ساختمان عمل می‌کند. این سقف با دو پوشش رنگ لاتکس صنعتی عایق بخار رنگ‌آمیزی شده است.

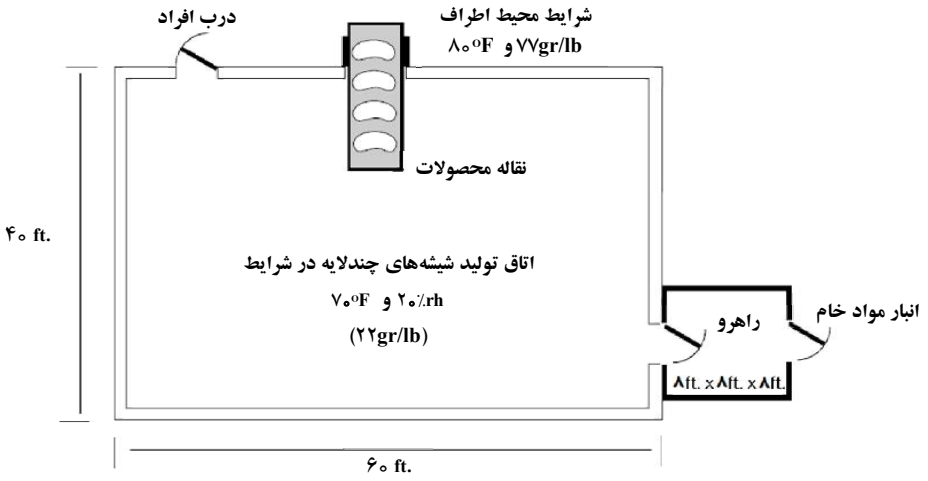
مهندس باید ملاحظات لازم در مورد مسائل زیر را در نظر بگیرد:

- رطوبت نسبی هوای داخل انبار

بسته‌بندی‌های مواد خام موجود در انبار رطوبت وارد اتاق می‌کنند، اما میزان رطوبت آن‌ها چقدر است؟ با توجه به شرایط طراحی و حداکثر دما و رطوبت فرض‌شده رطوبت نسبی ٪۴۷ می‌شود، اما مهندس می داند که با کاهش دمای حباب خشک هوا هنگام غروب، رطوبت نسبی افزایش می‌یابد. رطوبت‌سنج نصب‌شده در انبار نشان می‌دهد که در تابستان رطوبت نسبی انبار به ٪۸۰ می‌رسد. طراح از این مقدار در محاسبات استفاده می‌کند، زیرا اگر رطوبت نسبی ٪۱۰۰ هم باشد، تاثیر زیادی بر بار رطوبی کل نخواهد داشت.

- حجم هوای تازه

با توجه به مقررات محلی ۲۰cfm هوای تازه برای هر فرد مورد نیاز است که برای هشت نفر حاضر در اتاق مجموعا به ۱۶۰cfm هوا نیاز خواهد بود. اما مهندس بر آن است تا نفوذ هوای مرطوب از درب‌ها، درزها و خصوصا شکاف نقاله را کمینه سازد. ارتفاع شکاف نقاله ۲ft و عرض آن ۴ft است و پوشش پلاستیکی سطح آزاد آن را بجز وقتی‌که محصولات از طریق نقاله از فضا خارج می‌شوند، می‌پوشاند. مهندس بر آن است تا سرعت هوای خروجی را در ۱۵۰fpm حفظ کند. او فرض می‌کند که محصولات هنگام خروج پوشش پلاستیکی را کنار می‌زنند، طوری که بیشتر اوقات نیمی از شکاف بدون پوشش است. بدین ترتیب جریان هوای مورد نیاز ۶۰۰cfm خواهد بود که برای پرسنل نیز کافی خواهد بود.



شکل ۵-۱۷

برگه‌های محاسبات بار رطوبتی

اطلاعات پروژه

اسم پروژه:

اتاق تولید شیشه‌های چند لایه

مکان:

دالاس، تگزاس

کاربرد:

جلوگیری از جذب مجدد رطوبت

محاسبه‌گر: ادی، کالوین — تاریخ: ۲۰۰۲/۲

ناظر: سی، مانترز — تاریخ: ۲۰۰۲/۳

هدف پروژه:

با حفظ شرایط اتاق در دمای ۷۰°F و رطوبت نسبی ٪۲۰ (۲۲gr/lb)، از جذب مجدد رطوبت در لایه‌های پلاستیکی پلی‌وینیل‌بوتیرال جلوگیری شود.

شرایط طراحی

	حالت حاد آب و هوا		آب زیرزمینی	شرایط داخلی	
	تابستان	زمستان		اتاق	ساختمان
دمای حباب خشک	۱۰۲	۱۸	۶۷	۷۰	۸۰
دمای نقطه شبنم	۷۸	۱۸	۶۷	۲۸	۶۰
نسبت رطوبت	۱۴۶	۱۴	۱۰۰	۲۲	۷۷
فشار بخار	۰/۴۸	۰/۱۰	۰/۶۸	۰/۱۵	۰/۵۲

ارتفاع ۴۹۵ بالاتر از سطح دریا؛ چگالی استاندارد هوا = ۰/۰۷۴lb/ft3

نفوذ

	بار نفوذ (gr/hr)		فشار بخار کمتر (in. hg)	فشار بخار بزرگ‌تر (in. hg)	ضریب نفوذ (gr/hr/sq. ft.)	سطح مقطع (sq. ft.)
دیوار ۱:	۴ gr/lb	=	(۰/۱۵	− ۰/۵۲۰) ×	۰/۰۲۵ ×	۴۰۰
دیوار ۲:	۴ gr/lb	=	(۰/۱۵	− ۰/۵۲۰) ×	۰/۰۲۵ ×	۴۰۰
دیوار ۳:	۱۳ gr/lb	=	(۰/۱۵	− ۰/۹۸۰) ×	۰/۰۲۵ ×	۶۰۰
دیوار ۴:	۶ gr/lb	=	(۰/۱۵	− ۰/۵۲۰) ×	۰/۰۲۵ ×	۶۰۰
سقف:	۵۷۲ gr/lb	=	(۰/۱۵	− ۰/۶۸۰) ×	۰/۴۵ ×	۲۴۰۰
کف:	۴۰۰ gr/lb	=	(۰/۱۵	− ۰/۵۲۰) ×	۰/۴۵ ×	۲۴۰۰

مقدار کل: ۹۹۹ gr/lb

محصولات، بسته‌بندی و لباس‌ها

	بار رطوبتی (gr/hr)		گرین بر پوند	محتوای رطوبتی نهایی (gr/lb)	محتوای رطوبتی اولیه (gr/lb)	نرخ ورود (gr/lb)
مورد ۱:	۷۳۵۰ gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	(۰/۰۶	− ۰/۱۳) ×	۱۵
مورد ۲:	..... gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	(.....	− .....) ×	.....
مورد ۳:	..... gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	(.....	− .....) ×	.....
مورد ۴:	..... gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	(.....	− .....) ×	.....

مقدار کل: ۷۳۵۰ gr/lb

اجاق‌های سرباز

	بار رطوبتی (gr/hr)		تولید بخار آب (gr/ft³)	نرخ سوختن گاز (ft³/hr)
	صفر gr/lb	=	..... ×	.....

مقدار معمول ۶۵۰gr/ft3

افراد

	بار رطوبتی (gr/hr)		بار رطوبتی (gr/hr) برای هر فرد		تعداد افراد
نشسته:	..... gr/lb	=	.....	×	.....
ایستاده:	..... gr/lb	=	.....	×	.....
کار سبک:	..... gr/lb	=	.....	×	.....
کار متوسط:	۲۷۵۰۰ gr/lb	=	۵۵۰۰	×	۵
بازدیدکننده اتاق:	۱۶۵۰۰ gr/lb	=	۵۵۰۰	×	۳

مقدار کل: ۴۴۰۰۰ gr/lb

سطوح مرطوب

	بار رطوبتی (gr/hr)		گرین بر پوند		فشار بخار هوا (in. hg)		فشار بخار سطح آب (in. hg)		نرخ انتقال گرمای نهان (Btu/ sq.ft. in.hg)		سطح مقطع مرطوب (sq. ft.)
	صفر gr/lb	=	۷۰۰۰	×	(.....	−	) ×		.....	×	.....
					.....						

دیوارهای خارجی

دیوار ۱: ..... gr/lb = ... × (..... − .....) × ..... × .....

دیوار ۲: ..... gr/lb = ... × (..... − .....) × ..... × .....

مقدار کل: صفر gr/lb دیوار خارجی مجهز به نوار فلزی عایق بخار است.

شکاف‌ها

قاب درب: ..... gr/lb = ... × (..... − .....) × ..... × .....

پنجره‌ها: ..... gr/lb = ... × (..... − .....) × ..... × .....

کانال‌ها: ..... gr/lb = ... × (..... − .....) × ..... × .....

مقدار کل: صفر gr/lb برای اتاق هوای اضافی تامین می‌شود تا نفوذ از شکاف‌ها کمینه شود.

ورودی درب‌ها

	بار رطوبی (gr/hr)		رطوبت هوای داخل (gr/hr)		رطوبت هوای خارج (gr/hr)		زمان باز بودن (min/hr)		چگالی هوا (lb/ft³)		سطح مقطع باز (sq. ft.)		سرعت جریان هوا (fpm)
درب ۱:	۲۲۳۸۵ gr/lb	=	۲۲	−	۷۷	×	۸	×	۰/۰۷۴	×	۱۳/۷۵	×	۵۰ .
درب ۲:	..... gr/lb	= (.....	−	.....	) ×	.....	×	.....	×	.....	×	.....	

	بار رطوبی (gr/hr)		رطوبت هوای داخل (gr/hr)		رطوبت هوای خارج (gr/hr)		تعداد باز شدن (تعداد در ساعت)		چگالی هوا (lb/ft³)		طول، عرض و ارتفاع هوابند (ft)
راهرو هوابند:	۹۳۹۶ gr/lb	=	[(146	−	22) / 2]	×	۴	×	۰/۰۷۴	×	(۸ × ۸ × ۸)

مقدار کل: ۳۱۷۸۱ . gr/lb

ورودی از دیوارها

	بار رطوبی (gr/hr)		دقیقه		چگالی هوا (lb/ft³)		رطوبت داخلی (gr/hr)		رطوبت خارجی (gr/hr)		سرعت هوای ورودی (fpm)		سطح مقطع (sq. ft.)
ورودی نقاله‌ها:	..... gr/lb	=	× ۶۰	×	.....	× (.....	−	.....	)	×	.....	×	.....
راهرو و حفره‌های باز:	..... gr/lb	=	× ۶۰	×	.....	× (.....	−	.....	)	×	.....	×	.....

مقدار کل: صفر gr/lb فرض می‌شود که تونل به همراه پوشش‌ها و هوای خروجی با سرعت ۱۵۰FPM نفوذ را حذف می‌کند.

هوای تازه مقدار هوای تازه برای افراد، هوای جبرانی و تنظیم فشار اتاق:

	بار رطوبی (gr/hr)		دقیقه		چگالی هوا (lb/ft³)		سطح رطوبت کنترلی (gr/hr)		رطوبت خارجی (gr/hr)		نرخ جریان هوای تازه (cfm)
gr/lb	۳۳۰۳۳۶	=	۶۰	×	۰/۰۷۴	× (	۲۲	−	۱۴۶	) ×	۶۰۰ .

خلاصه

نفوذ:	۹۹۹
محصولات:	۷۳۵۰
افراداجاق گاز:	۴۴۰۰۰
اجاق گاز:	---
سطوح مرطوب:	---
دیوارهای خارجی:	---
شکاف‌ها:	---
ورودی درب‌ها:	۳۱۷۸۱
ورودی دیوارها:	---
بار رطوبی داخلی کل:	۸۴۱۳۰
هوای تازه:	۳۳۰۳۳۶

۵-۴ منابع

[1] Babbitt, J.D. The diffusion of water vapor through a slit in an impermeablemembrane. Canadian Journal of Research, Vol.19. 1941 pp 42-55.

[2] Davis, W.J., Moisture flowing up a moving air stream 1972. Report on Special Project for engineering course EGR-192, University of Alabama, Birmingham, AL 35201 (Dr. Martin Crawford, Faculty Advisor)

[3] Fan Engineering. Buffalo Forge Company, Buffalo, NY

[4] Iglesias, Hector A. and Chirife, Jorge. Handbook of Food Isotherms 1982. Academic Press, 111 Fifth Avenue, NY, NY. USA 10003

[5] Handbook of Fundamentals. 2001.
Chapter 5 — Mass transfer
Chapter 25 — Thermal and water vapor transmission data
Chapter 26 — Infiltration and ventilation
Chapter 27 — Climatic design data
Chapter 29 — Air conditioning load

[6] Handbook of HVAC Systems and Applications 1987
Chapter 28 — Industrial Air Conditioning (Table 2 - Regain of Materials)
Chapter 44 — Industrial drying systems

[7] Handbook of Refrigeration 1986
Chapter 22 — Candies, nuts, dried fruits & vegetables (Table 1 – Optimum design air conditions, and Table 2 - Expected storage life for candy)
Chapter 26 — Commodity storage requirements (Table 2 - Storage requirements of perishable products)

[8] American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329

[9] Latent loads in low humidity rooms. Final report of ASHRAE research project RP-252. Presented to ASHRAE Technical Committee 9.2 — January 1982. (Including notes on the final report by Wm. Griffiths — Midland-Ross Corporation) American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329.

۶ عملکرد رطوبت‌گیر دسیکنت

نحوه عملکرد همه رطوبت‌گیرهای دسیکنت یکسان است. این رطوبت‌گیرها با استفاده از اختلاف فشار بخار بین هوا و سطح دسیکنت برای جذب و دفع رطوبت، بخار آب هوا را جدا می‌کنند. در فصل سوم چگونگی ایجاد اختلاف فشار بخار در انواع مختلف رطوبت‌گیرهای دسیکنت شرح داده شد. اکنون عملکرد سامانه‌های رطوبت‌گیری دسیکنت را به صورت عمیق‌تر بررسی می‌کنیم.

طراح سامانه اغلب تجهیزات را برای شرایط اوج بار انتخاب می‌کند، اما برای پاسخگویی به همه اهداف پروژه داشتن درک مناسبی از چگونگی تغییر عملکرد سامانه در شرایط کاری متفاوت با شرایط اوج بار، مفید و کمک‌کننده خواهد بود. این فصل به بررسی چگونگی عملکرد سامانه‌های رطوبت‌گیری می‌پردازد و روابط بین متغیرهای عملیاتی کلیدی سامانه‌ها را شرح می‌دهد. افزون بر این، مفاهیم این روابط که طراح سامانه رطوبت‌گیری در هنگام طراحی باید در نظر داشته باشد نیز توضیح داده می‌شود.

۱-۶ متغیرهای عملیاتی

هشت پارامتر کلیدی عملکرد رطوبت‌گیرهای دسیکنت را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این پارامترها عبارتند از:

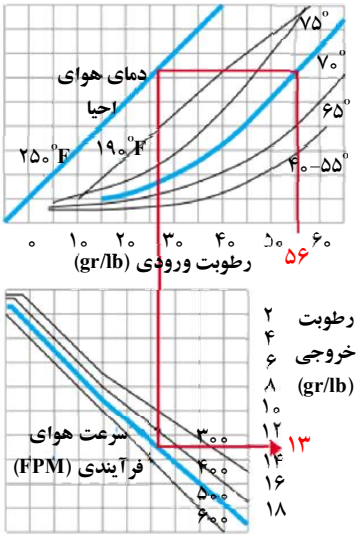
۱- رطوبت هوای فرآیندی
۲- دمای هوای فرآیندی
۳- سرعت هوای فرآیندی درون دسیکنت
۴- دمای هوای احیا
۵- رطوبت هوای احیا
۶- سرعت هوای احیا درون دسیکنت
۷- مقدار دسیکنت قرار داده شده در معرض جریان‌های هوای فرآیندی و هوای احیا
۸- مشخصات جذب-دفع دسیکنت

تاثیر دقیق هر یک از این پارامترها به نوع رطوبت‌گیر مورد بحث بستگی دارد. برای ساده‌تر کردن موضوع موارد پایه‌ای رطوبت‌گیر شانه زنبوری چرخان را بررسی می‌کنیم و آنگاه تفاوت‌هایش را با دیگر تجهیزات توضیح می‌دهیم. در مثال مبنای ما، فرض می‌کنیم که هوای فرآیندی با شرایط "آسایش" (دمای ۷۰°F و رطوبت ۵۶gr/lb که نزدیک به رطوبت نسبی ۵۰٪ است) وارد رطوبت‌گیر می‌شود.

شکل ۶-۲ فرآیندی را که هوا در دو طرف رطوبت‌گیر طی می‌کند، نشان می‌دهد. در مثال ما، هوای فرآیندی رطوبت‌گیر را گرم‌تر و خشک‌تر از هنگام ورود به آن ترک می‌کند؛ یعنی با دمای ۱۰۹°F و رطوبت ۱۳gr/lb). در سمت احیا حجم هوای کمتری از هوای بیرون به رطوبت‌گیر وارد می‌شود. این هوا از یک هیتر می‌گذرد و به سمت چرخ دسیکنت پیش می‌رود. این هوا به دسیکنت حرارت می‌دهد که در نتیجه دسیکنت رطوبت خود را از دست می‌دهد. هوای احیا با جذب رطوبت از دسیکنت بسیار مرطوب‌تر و بسیار سردتر از هنگام ورود رطوبت‌گیر را ترک می‌کند.

عملکرد یک رطوبت‌گیر دسیکنت با عملکرد یک "پمپ رطوبت[1]" مقایسه شده است. دقیقا مثل یک موتور حرارتی[2] که گرمای محسوس را از یک جریان هوا به جریان هوای دیگر منتقل می‌کند، رطوبت‌گیر دسیکنت گرمای نهان (رطوبت) را از یک جریان هوا به جریان هوای دیگر منتقل می‌کند. می‌توان به رطوبت‌گیر دسیکنت مانند یک "متمرکزکننده رطوبت[3]" نیز نگاه کرد، زیرا رطوبت را از جریان هوای فرآیندی جدا می‌کند و آن را به جریان بسیار کوچک‌تر هوای احیا می‌دهد که در عمل رطوبت هوای فرآیندی را در هوای احیا متمرکز می‌کند.

در بررسی عملکرد رطوبت‌گیر ابتدا باید این فرض مهم را در نظر بگیریم که رطوبت‌گیر در



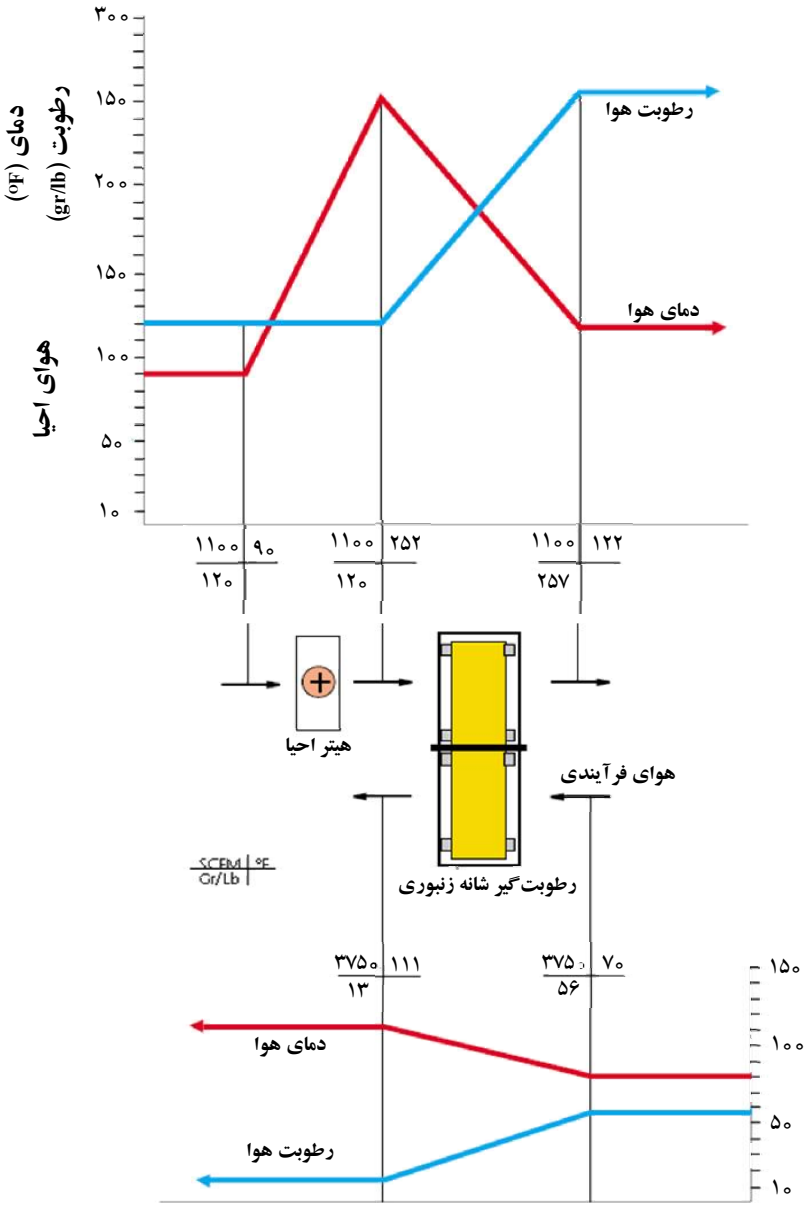
شکل ۶-۱

عملکرد رطوبت‌گیر شانه زنبوری

رطوبت‌گیرهای دسیکنت رطوبت هوا را از یک جریان هوا که هوای فرآیندی نامیده می‌شود، به جریان هوای دیگری که هوای احیا نامیده می‌شود، منتقل می‌کنند. میزان رطوبت منتقل‌شده به متغیرهایی که در نمودار بالا نشان داده شده است، بستگی دارد. در صورتی‌که رطوبت اولیه هوای فرآیندی زیاد، دمای هوای احیا بالا و سرعت هوای فرآیندی کم باشد، بیشترین میزان رطوبت از هوای فرآیندی گرفته می‌شود.

[1] Humidity pump
[2] Heat pump
[3] Moisture concentrator

تعادل[1] عمل می‌کند. به عبارت دیگر انرژی کل در سمت هوای فرآیندی با انرژی کل در سمت احیا متوازن می‌گردد. اگر سامانه در حالت تعادل نباشد، که در صورت کنترل نشدن جریان هوا و دما اتفاق می‌افتد، رطوبت‌گیر طبق پیش‌بینی‌های انجام شده عمل نمی‌کند. با فرض تعادل خواهیم دید که عملکرد رطوبت‌گیر با تغییر متغیرهای کلیدی از حالت مبنا چطور تغییر می‌کند.



شکل ٦-٢

تغییرات رطوبت و دمای جریان هوای فرآیندی و احیا

هنگامی‌که هوای فرآیندی رطوبت‌گیری می‌شود، دمای آن افزایش می‌یابد. برعکس، در این حالت چون هوای احیا رطوبت می‌گیرد، دمای آن کاهش می‌یابد.

[1] Equilibrium

۶-۱-۱ رطوبت ورودی هوای فرآیندی

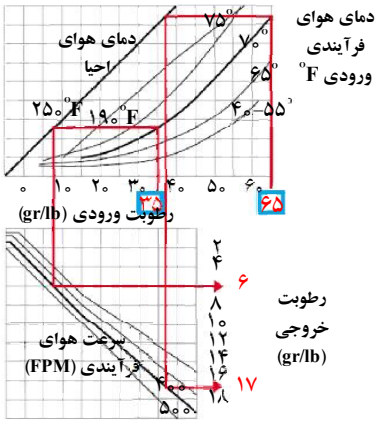
نخست تاثیر تغییر میزان رطوبت هوای ورودی به قسمت فرآیندی بررسی می‌شود. تاثیر بر رطوبت خروجی کاملا قابل پیش‌بینی است. اگر میزان رطوبت هوای فرآیندی کمتر باشد، هوا با رطوبت کمتر از ۱۳gr/lb خارج می‌شود. به عنوان مثال هوای ورودی در ۷۰°F و ۳۵gr/lb با ۶gr/lb رطوبت خارج می‌شود.

دمای هوای خروجی نیز به جای ۱۰۹°F، ۱۰۱°F خواهد بود. این اتفاق به این دلیل است که افزایش دمای هوای فرآیندی با میزان رطوبت گرفته شده از هوا متناسب است. در مثال مبنا، دستگاه ۴۲gr/lb رطوبت از هوا گرفت. در حالت دوم، دستگاه ۲۹gr/lb رطوبت می‌گیرد که در این حالت گرمای داده شده به هوا نسبت به حالت مبنا کمتر است.

برعکس، اگر رطوبت هوای ورودی بیشتر از میزان رطوبت مثال مبنا باشد، چون رطوبت بیشتری از هوا گرفته می‌شود، هوای خروجی از رطوبت‌گیر اندکی مرطوب‌تر و گرم‌تر خواهد بود. برای مثال، اگر هوا در ۷۰°F و ۶۵gr/lb وارد رطوبت‌گیر شود، در ۱۱۳°F و ۱۷gr/lb از آن خارج خواهد شد. این بدین معنی است که ۴۸gr/lb رطوبت از هوا گرفته شده است که مشخص می‌کند چرا هوا نسبت به وقتی‌که ۴۲gr/lb رطوبت گرفته شد، گرم‌تر است.

یک طراح سامانه باید حالات زیر را برای تغییرات رطوبت ورودی در نظر بگیرد:

- اگر رطوبت هوای ورودی بیش از میزان مورد انتظار باشد، هوای فرآیندی نیز گرم‌تر از حد مورد انتظار خواهد بود. از این رو، در صورتی که هوای خروجی با دمای ثابت مد نظر باشد، نیاز به سردسازی بیشتری است.
- اگر رطوبت کمتر از میزان مورد انتظار باشد، هوا نیز خشک‌تر از میزان مورد انتظار خارج خواهد شد. از این رو اگر هوای خروجی با رطوبت ثابت مد نظر باشد، هوای کمتری باید وارد رطوبت‌گیر شود.



شکل ۶-۳

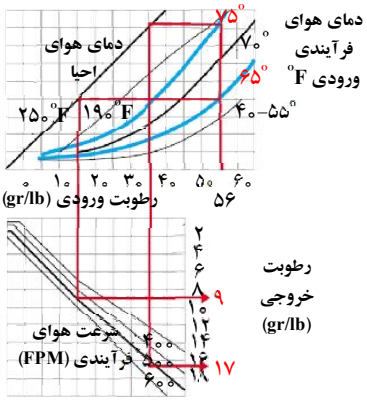
تغییر رطوبت هوای فرآیندی

هرچه میزان رطوبت ورودی کمتر باشد، سطح رطوبت هوای فرآیندی خروجی پایین‌تر است.

۶-۱-۲ دمای هوای فرآیندی ورودی

همانطور که در فصل دوم توضیح داده شد، فشار بخار سطح دسیکنت به دمای ماده و نیز میزان آب آن بستگی دارد. از این رو تعجب برانگیز نیست که عملکرد دسیکنت از دمای هوای ورودی تاثیر می‌پذیرد. در مثال مبنای ما دمای هوا ۷۰°F است. اگر آن را به ۶۵°F کاهش دهیم، رطوبت هوای فرآیندی خروجی به جای ۱۳gr/lb، ۹gr/lb خواهد بود. عملکرد دفع رطوبت بهتر شده است، چون دسیکنت خنک‌تر است و در نتیجه فشار بخار سطح آن کمتر است و می‌تواند رطوبت بیشتری نسبت به مثال مبنا جذب کند. برعکس، اگر دمای ورودی تا ۷۵°F افزایش یابد، هوای خروجی از رطوبت‌گیر به اندازه قبل خشک نخواهد بود (۱۷gr/lb به جای ۱۳gr/lb).

رابطه دمای هوای ورودی با عملکرد رطوبت‌گیر مشخص است؛ وقتی همه متغیرهای دیگر ثابت باشند، دماهای ورودی پایین‌تر عملکرد را افزایش می‌دهند و دماهای بالاتر موجب کاهش کارایی می‌شوند.



شکل ۶-۴

تغییر دمای هوای فرآیندی

دمای پایین‌تر موجب بهتر شدن دفع رطوبت می‌شود.

این رابطه برای طراح چندین مفهوم دارد. از جمله:

- اگر هوای ورودی با دماهای بالا مورد انتظار باشد، مهندس باید ظرفیت رطوبت‌گیری را برای بالاترین حد دمای هوای ورودی در نظر بگیرد و یا دسیکنتی انتخاب شود که تاثیرپذیری کمتری از دما داشته باشد. یا می‌توان هوا را از پیش سرد کرد تا رطوبت خروجی مطلوب تضمین شود.
- اگر دما کمتر از میزان مورد انتظار باشد، موجب کاهش عملکرد نمی‌شود. به همین دلیل است که در سردخانه‌ها و فضاهایی که هنگام زمستان گرم نمی‌شوند، اغلب از دستگاه‌های دسیکنت به جای رطوبت‌گیرهای سرمایشی استفاده می‌شود.
- اگر رطوبت هوای ورودی خیلی کم باشد، کم یا زیاد بودن دمای هوا تاثیر زیادی بر عملکرد نخواهد داشت. برای مثال تاثیر تغییر دما در رطوبت کمتر از ۱۵gr/lb بسیار ناچیز است، اگر دمای هوای ورودی از $65^{o}F$ تا $55^{o}F$ درجه کم شود، تغییرات رطوبت هوای خروجی در حدود ۰٫۱gr/lb خواهد بود که در نتیجه توجیه اقتصادی برای هزینه در سامانه سرمایشی نخواهد داشت.

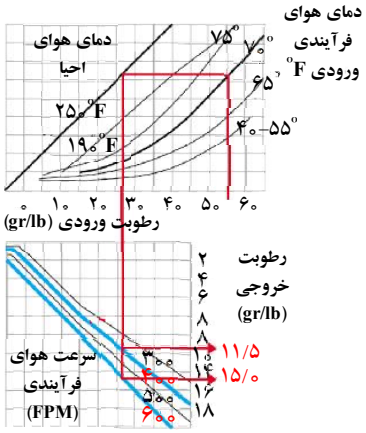
۳-۱-۶ سرعت هوا در قسمت فرآیندی

هرچه هوا آهسته‌تر در بستر دسیکنت حرکت کند، هوای خروجی از آن خشک‌تر خواهد بود. در مثال مبنای ما هوا با سرعت ۵۰۰ft/min در بستر دسیکنت حرکت می‌کند و با ۱۳gr/lb رطوبت از آن خارج می‌شود. اگر سرعت به ۴۰۰ft/min کاهش داده شود، رطوبت خروجی کمتر خواهد بود (۱۱٫۵gr/lb به جای ۱۳gr/lb). اگر سرعت تا ۶۰۰ft/min افزایش یابد، هوای خروجی مرطوب‌تر خواهد بود (۱۵gr/lb به جای ۱۳gr/lb). در این مثال اختلاف ناچیز بنظر می‌رسد. در حقیقت عموما رطوبت‌گیرها را با بیشترین سرعت ممکن برای رطوبت‌گیری انتخاب می‌کنند، زیرا سرعت بالاتر به معنی نیاز به تجهیزات کوچک‌تر و کم‌هزینه‌تر خواهد بود.

اما وقتی شرایط کنترلی رطوبت خیلی پایین باشد، استفاده از سرعت‌های کمتر به صرفه‌تر خواهد بود. برای مثال اگر سطح کنترل رطوبت فضا ۱۶gr/lb باشد، اختلاف میان ۱۱٫۵gr/lb و ۱۳gr/lbرطوبت هوای داده شده به فضا نشان‌دهنده ۴۴ درصد اختلاف در رطوبت گرفته شده است (۱۳۵۰۰gr/hr = (۱۳–۱۶) * ۴٫۵ * ۱۰۰۰scfm). این مقدار را با ظرفیت سامانه در ۱۳gr/lb مقایسه کنید. (۲۰۲۵۰gr/hr = (۱۶–۱۱٫۵) * ۴٫۵ * ۱۰۰۰scfm)

یک طراح باید حالات زیر را برای تغییرات سرعت هوای فرآیندی در نظر بگیرد:

- اگر نیاز به رطوبت خروجی بسیار کم باشد، سرعت هوای فرآیندی اهمیت بسیار زیادی دارد و ممکن است طراح بخواهد برای جلوگیری از تغییرات ناگهانی و ناخواسته سرعت، سامانه کنترلی برای کنترل جریان هوا در نظر بگیرد.
- اگر رطوبت هوای ورودی بالا باشد، اختلاف عملکرد سامانه در سرعت‌های



شکل ٦-٥

تغییر سرعت هوای فرآیندی

کاهش سرعت هوای فرآیندی موجب بیشتر شدن مدت زمان تماس هوا با دسیکنت می‌شود که در نتیجه رطوبت بیشتری گرفته می‌شود. با این حال، سرعت کمتر به معنی نیاز به تجهیزات بزرگ‌تر برای یک جریان هوای مشخص است، بنابراین رطوبت‌گیرها اغلب بر اساس بیشترین سرعت هوای فرآیندی ممکن برای یک کاربرد خاص انتخاب می‌شوند.

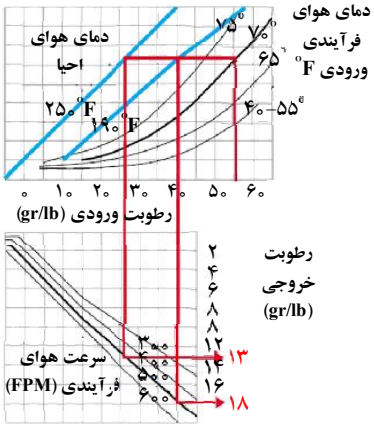
کم و زیاد، نسبتا کم است، از این رو تجهیزات بزرگ‌تر موجب بهبودی اندکی در عملکرد سامانه می‌شوند.

- اگر نرخ دفع رطوبت (پوند رطوبتی که در هر ساعت از جریان هوا گرفته می‌شود) اهمیت بیشتری نسبت به نقطه شبنم هوای خروجی داشته باشد، در این صورت سرعت بیشتر موجب کوچک‌تر و مقرون به صرفه‌تر شدن دستگاه می‌شود. برای مثال فرآیند خشک‌کردن صنعتی را در نظر بگیرید که در آن رطوبت به سرعت از محصولات تبخیر می‌شود، اما هوای قرار داده شده در معرض محصولات نباید زیاد خشک باشد. یک رطوبت‌گیر کوچک با سرعت بالا سریعا بار رطوبی را می‌گیرد و نسبت به یک دستگاه بزرگ ریسک کمتری در خشک‌کردن بیش از حد محصولات دارد.

۴-۱-۶ دمای هوای ورودی به احیا

در یک رطوبت‌گیر چرخان دسیکنت با هوای ورودی به احیا گرم می‌شود. هر چه دسیکنت گرم‌تر باشد، رطوبت را راحت‌تر دفع می‌کند. از این رو دمای هوای احیا تاثیر زیادی بر عملکرد سامانه دارد. اساسا هر چه دسیکنت در فرآیند احیا خشک‌تر شود، وقتی به سمت جریان هوای فرآیندی می‌چرخد، می‌تواند رطوبت بیشتری جذب کند.

در مثال مبنا دمای هوای ورودی به احیا ۲۵۰°F در نظر گرفته شده است که در این صورت رطوبت خروجی هوای فرآیندی ۱۳gr/lb خواهد شد. اگر دمای هوای احیا به ۱۹۰°F کاهش یابد، هوای فرآیندی خروجی مرطوب‌تر می‌شود و دستگاه را به جای ۱۳grlb در ۱۸gr/lb ترک می‌کند.



شکل ٦-٦

تغییر دمای هوای احیا

با کاهش دمای هوای احیا هزینه بهره‌برداری سامانه رطوبت‌گیری کاهش می‌یابد، زیرا هزینه انرژی با دمای کم از انرژی با دمای بالا بسیار کمتر است. اما با کاهش دمای هوای احیا رطوبت هوای فرآیندی خروجی بیشتر می‌شود و در نتیجه به رطوبت‌گیر بزرگ‌تری نیاز خواهد بود.

برای طراح سامانه تاثیر دمای احیا به موارد زیر اشاره دارد:

- اگر نیاز به هوای خروجی بسیار خشک باشد، در طراحی دماهای احیا بالا مورد استفاده قرار گیرد.
- رطوبت‌گیرهای دسیکنت می‌توانند منابع حرارتی با دمای بسیار پایین را نیز بکار گیرند. در صورت امکان، طراح باید استفاده از منابع انرژی مقرون‌به صرفه‌ای مثل آب‌گرم حاصل از سامانه‌های تولید همزمان[1] یا چگالش بخار[2] را بررسی کند. اما در این صورت برای اینکه وضعیت خروجی یکسانی در هوای فرآیندی ایجاد شود، رطوبت‌گیر باید نسبت به زمانی که از منبع انرژی احیا با دمای بالاتری استفاده می‌کند، بزرگ‌تر باشد. در این شرایط طراح از دستگاهی بزرگ (سرعت هوای فرآیندی پایین‌تر) استفاده می‌کند تا تاثیری مشابه دماهای بالای احیا حاصل شود. همچنین جریان هوای احیا بیشتری نیاز است، زیرا باید انرژی افزوده‌شده به احیا ($1{,}08 * \Delta T * 1{,}08$ scfm) یکسان باقی بماند تا سامانه را در

[1] Cogeneration
[2] Steam condensate

تعادل نگه دارد. بار رطوبی هوای فرآیندی نیز تغییری نکرده است. با توجه به اینکه اختلاف دما (ΔT) کمتر است، جریان هوا (scfm) باید افزایش یابد.

- رطوبت‌گیرها اغلب برای شرایط اوج مصرف تابستان طراحی و انتخاب می‌شوند که هوای ورودی به احیا حتی قبل از اینکه به آن حرارت داده شود، کاملا گرم است. در طول زمستان، بهار و پاییز، هوا بسیار خنک‌تر است. با توجه به اینکه دمای هوای احیا بر عملکرد رطوبت‌گیر تاثیر می‌گذارد، طراح باید ظرفیت دستگاه را در دمای هوای ورودی پایین‌تر بررسی کند. ممکن است لازم باشد ظرفیت هیتر احیا را برای زمستان، بهار و پاییز، در صورتی که بار رطوبی هوای فرآیندی تابستان و زمستان ثابت بماند، افزایش داد. اگر بار رطوبی در زمستان کاهش یابد، که در فضاهایی معمول است که نیاز به هوای تازه نیست و هوا دائما می‌چرخد، به انرژی احیا کمتری نیاز است و هیتر در نظر گرفته شده برای شرایط اوج تابستان، برای هنگامی‌که هوای احیا خیلی سردتر از هوای تابستان باشد نیز مناسب است.

۶-۱-۵ رطوبت هوای ورودی به احیا

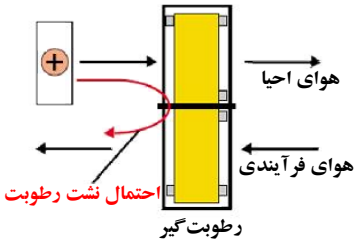
در این مثال دسیکنت لیتیم‌کلرید است که نسبت به میزان رطوبت هوای ورودی احیا حساس نیست. اما در این جا چند موضوع مکانیکی وارد بحث می‌شود و دسیکنت‌های دیگر همچون غربال‌های مولکولی[1] تا حدودی نسبت به رطوبت هوای ورودی به فرآیند احیا حساس هستند.

موضوع مکانیکی، نشت هوا بین هوای مرطوب وارد شونده به احیا و هوای خشک خارج‌شونده از هوای فرآیندی دستگاه است. هر گونه نشت هوا از هوای احیا به هوای فرآیندی سطح رطوبت را در هوای فرآیندی به میزان قابل توجهی افزایش خواهد داد. برای مثال فرض کنید ۵۰۰cfm هوای فرآیندی دستگاه را با رطوبت ۱gr/lb ترک کند، اما سپس ۲۰cfm هوای احیا با رطوبت ۱۲۰gr/lb به جریان هوای فرآیندی نشت کند. با این رطوبت اضافی هوای فرآیندی دستگاه را با رطوبت ۵٫۵gr/lb ترک می‌کند و موجب افت چشمگیر عملکرد رطوبت‌گیر می‌شود.

برای طراحان سامانه این بدین معنی است که هنگام استفاده از رطوبت‌گیر بستر چرخان، بستر افقی چندگانه و یا شانه زنبوری چرخان باید به موارد زیر دقت شود:

- سازنده رطوبت‌گیر باید از تاثیر نفوذ هوا بین هوای فرآیندی و هوای احیا در شرایط مشخص آگاهی داشته باشد.
- وقتی شرایط خروجی بسیار خشک لازم است، بهتر است که فن هوای فرآیندی را به جای نصب بعد از رطوبت‌گیر، قبل از آن نصب کنند تا در صورت نشت، هوای خشک فرآیندی را به هوای مرطوب احیا، نه برعکس، منتقل کند.

عملکرد بعضی از دسیکنت‌های دیگر همچون غربال‌های مولکولی و آلومینای فعال[2] به میزان



شکل ۶-۷

نشت هوا از جریان هوای احیا به جریان هوای فرآیندی

بین هوای احیا ورودی و هوای فرآیندی خروجی از رطوبت‌گیرهای چرخان باید بخوبی درزبندی شود. هر گونه نشت هوا در این بخش موجب افزایش رطوبت هوای فرآیندی می‌شود.

[1] Molecular sieves
[2] Activated alumina

قابل توجهی به رطوبت هوای احیا بستگی دارد. این دسیکنت‌ها برای جذب رطوبت از جریان‌های هوای گرم بسیار مفیدند. این بدین معنی است که در صورتی‌که هوای فرآیندی گرم باشد، کارایی آن‌ها کاهش نمی‌یابد. اما برعکس، چنین دسیکنت‌هایی هنوز هم می‌توانند از هوای گرم احیا رطوبت جذب کنند. اگر دسیکنت به جای اینکه در هوای احیا خشک شود، رطوبت جذب کند، ظرفیت جذب رطوبت از هوای فرآیندی را از دست خواهد داد.

به طراح سامانه توصیه می‌شود که هنگام استفاده از رطوبت‌گیرهای جامد:

- اگر نیاز به شرایط خروجی بسیار خشک باشد، باید اطمینان حاصل شود که هوای احیا خیلی مرطوب نیست.
- اگر هوای احیا از هوای محیط بیرون گرفته می‌شود، برای دستیابی به بهترین عملکرد رطوبت‌گیر هنگام تابستان به دماهای احیا نسبتا بالایی نیاز است.

۶-۱-۶ سرعت هوا در فرآیند احیا

در یک رطوبت‌گیر چرخان هوای احیا به دسیکنت گرما می‌دهد و رطوبت آزاد شده را با خود منتقل می‌کند. برای گرمایش نسبت به انتقال رطوبت به هوای بیشتری (سرعت بالاتری) نیاز است.

این موضوع مهم است که دما و جریان هوای احیا متناسب با میزان بار رطوبی گرفته شده از هوای فرآیندی تنظیم شود. اگر بار رطوبی دسیکنت افزایش یابد، باید انرژی بیشتری در سمت احیا به آن داده شود تا فرآیند احیا به طور کامل انجام شود و سامانه در تعادل بماند.

اگر مقدار هوای احیا مورد استفاده کم باشد، مشابه این است که دمای هوای احیا پایین است، زیرا گرمای مورد نیاز دسیکنت تابعی از جریان هوا ضربدر اختلاف دمای بین هوا و دسیکنت است. به عبارت دیگر دماهای بالا و جریان‌های زیاد هوای احیا گرمای بیشتری به دسیکنت می‌دهند، که بدین معنی است که می‌تواند رطوبت بیشتری از هوای فرآیندی جذب کند، زیرا دسیکنت در احیا کاملا خشک می‌شود.

اما اگر دمای هوای ورودی به فرآیند احیا ثابت بماند و جریان هوای احیا از حداقل مقدار مورد نیاز برای انتقال گرما به دسیکنت بیشتر شود، مقداری از انرژی تلف می‌شود. مگر اینکه میزان رطوبتی که باید از دسیکنت جدا شود، افزایش یابد. در غیر این صورت هوای احیا رطوبت‌گیر را گرم‌تر از حد لازم ترک می‌کند و گرما را به محیط بیرون منتقل می‌کند.

طراح باید به موارد زیر دقت کند:

- تصفیه نسبی هوای احیا همواره ضروری است. طراح باید اطمینان حاصل کند که تمیز کردن و تعویض فیلترهای هوای دستگاه برای پرسنل تعمیر و نگهداری امری ساده و بدیهی است. در غیر این صورت سرانجام فیلترها کثیف می‌شوند و جریان هوا کاهش می‌یابد که در نتیجه موجب کاهش کارایی دستگاه می‌شود.
- هوای احیا باید به خوبی کنترل شود تا سرعت هوا در دسیکنت بیش از حد

مورد انتظار نشود. برای این مورد استفاده از دمپرهای ثابت یا تنظیم‌شونده هوا کفایت می‌کند.

- به دلیل ملاحظات مکانیکی امکان استفاده از همه نوع فن و هیتر وجود ندارد. با این حال به دلیل تغییرات فصلی در میزان رطوبت هوای فرآیندی محدوده هوای احیای قابل استفاده گسترده است. طراح باید دستگاه را برای بیشترین میزان بار طراحی کند، اما باید بداند که انتخاب هیتر و فن بر این اساس در شرایط نیمه-بار بهینه نخواهد بود، مگر اینکه مالک تمایل داشته باشد که برای تجهیزات کنترلی هزینه کند.

ملاحظات دیگری نیز برای طراح وجود دارد که به نوع دسیکنت رطوبت‌گیر بستگی دارد. برای مثال:

- در مثال مبنا دسیکنت لیتیم‌کلرید است. وقتی مایع باشد، این دسیکنت توانایی جذب بخار آب تا صدها برابر وزن خود را دارد که این ویژگی مزایای زیادی دارد. اما هنگامی‌که لیتیم‌کلرید در یک رطوبت‌گیر چرخان استفاده شود، باید در احیا به طور کامل خشک شود، در غیر این صورت رطوبت بسیار زیادی جذب می‌کند که ممکن است موجب بیرون آمدن دسیکنت از جای خود شود. پس احیا کامل که به معنی برقراری دائمی جریان هوا و گرما در بخش احیا است، امری ضروری در هنگام رطوبت‌گیری دستگاه در بخش هوای فرآیندی می‌باشد.
- دسیکنت‌های دانه‌ای همچون غربال‌های مولکولی و سیلیکاژل اغلب در رطوبت‌گیرهای برج فشرده، سینی چرخان و یا بستر افقی چرخان استفاده می‌شوند. سرعت بیش از حد مورد انتظار در این رطوبت‌گیرها، چه در هوای فرآیندی و چه در هوای احیا، موجب سیال شدن دسیکنت می‌شود. یعنی هوا دسیکنت را بلند کرده و از جای خود بیرون می‌آورد که این اتفاق نیز می‌تواند موجب نشت هوا از بستر رطوبت‌گیر و پودر شدن دسیکنت شود. هر کدام از این دو مشکل کارایی دستگاه را کاهش می‌دهد. از این رو باید جریان هوا را کنترل کرد تا از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری شود.
- در رطوبت‌گیرهای دسیکنت مایع سرعت بیش از حد هوا موجب کشیده شدن قطرات دسیکنت به جریان هوا می‌شود. در سمت احیا این اتفاق موجب خوردگی کانال‌ها می‌شود و در سمت فرآیندی ممکن است دسیکنت برای استفاده در فضای تهویه‌شده مناسب نباشد. همانند همه رطوبت‌گیرهای دیگر جریان هوا در رطوبت‌گیرهای مایع نیز باید کنترل شود تا از بروز مشکلات احتمالی جلوگیری گردد.

۶-۱-۷ مقدار دسیکنت قرار داده شده در معرض جریان هوا

در کنار عوامل دیگر، میزان رطوبت گرفته‌شده از هوا به مقدار دسیکنتی که با هوای عبورکننده از رطوبت‌گیر در تماس است، بستگی دارد. هرچه مقدار دسیکنت بیشتر باشد، رطوبت بیشتری گرفته خواهد شد. در یک رطوبت‌گیر شانه زنبوری چرخان دو راه برای تماس مقدار بیشتری دسیکنت با هوا وجود دارد؛ یا چرخ عمیق‌تر شود و یا چرخ سریع‌تر بچرخد. با استفاده از هر دو راهکار می‌توان رطوبت بیشتری جذب کرد، ولی هزینه انرژی نیز بیشتر خواهد شد.

با افزایش عمق چرخ‌ها مقاومت در برابر جریان هوا نیز بیشتر می‌شود. سطح مقطع تماس بیشتر به معنای اصطکاک بیشتر هوا است. هر چه سطح مقطع در تماس با هوا بیشتر باشد، اصطکاک هوا بیشتر است. در رطوبت‌گیرهای سینی چرخان، برج فشرده و بستر افقی چرخان، دسیکنت دانه‌ای است و بنابراین جریان هوا آشفته[1] خواهد بود. این بدین معنی است که در واقع مقاومت جریان هوا با توان دوم سرعت هوا افزایش می‌یابد. سامانه‌های دسیکنت مایع متشابه هستند و جریان در قسمت تهویه و بازیافت آشفته می‌باشد. در بسترهای عمیق مقاومت و در نتیجه انرژی فن بسیار زیاد می‌شود.

در رطوبت‌گیرهای شانه زنبوری تاثیر مقاومت جریان هوا تا حدودی کمتر است. جریان هوا در مسیرهای مستقیم آرام[2] است، اما مقاومت در برابر جریان هوا متناسب با عمق بستر افزایش می‌یابد. پس در هر حالت افزایش عمق چرخ موجب افزایش هزینه انرژی فن می‌شود.

در رطوبت‌گیرهای دسیکنت جامد می‌توان با چرخاندن سریع سینی و یا چرخ در بین جریان هوای فرآیندی و احیا دسیکنت بیشتری را در معرض جریان هوا قرار داد. در رطوبت‌گیرهای دسیکنت مایع نیز می‌توان با پمپ سریع‌تر محلول دسیکنت بین قسمت تهویه و قسمت بازیافت، این کار را انجام داد. در بیشتر موارد این کار موجب افزایش ظرفیت رطوبت‌گیر می‌شود. اما همانند افزایش عمق، این افزایش ظرفیت انرژی بیشتری را نیز برای رطوبت‌گیری مصرف می‌کند.

پس از احیای دسیکنت و بازگشت آن به هوای فرآیندی، گرمای فرآیند احیا را با خود به همراه می‌آورد. مقدار گرما دقیقا متناسب با جرم دسیکنت و اختلاف دمای بین دسیکنت گرم و هوای فرآیندی خنک‌تر است. بنابراین هرچه دسیکنت بیشتری بین هوای فرآیندی و احیا بچرخد، گرمای بیشتری به هوای فرآیندی منتقل می‌شود و در نتیجه مقداری انرژی نیز برای خنک کردن دسیکنت و هوای فرآیندی نیاز خواهد بود. توجه داشته باشید که افزایش عمق بستر نیز نتیجه‌ای مشابه با استفاده مقدار بیشتری دسیکنت در پی دارد و در این صورت نیز نیاز به سرمایش بیشتری خواهد بود.

عموما سازندان رطوبت‌گیر از این جزئیات آگاهی کامل دارند و رطوبت‌گیرها به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا انرژی مصرفی و ظرفیت دستگاه بهینه شود. معمولا طراح سامانه نیازی به محاسبه عمق بسترها و نرخ چرخش هوا ندارد، زیرا این موارد توسط سازندگان تعیین می‌شوند.

---

[1] Turbulent
[2] Laminar

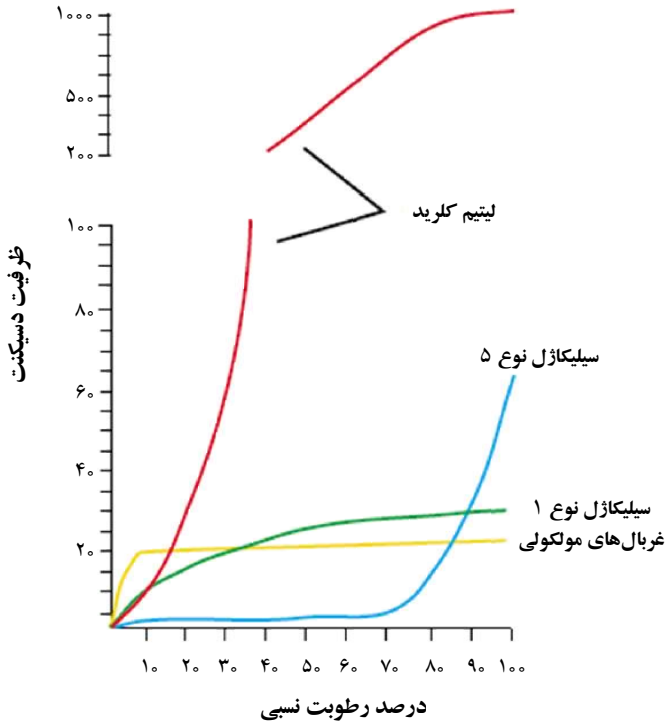
۶-۱-۸ مشخصات جذب و دفع دسیکنت

هر دسیکنت مشخصات جذب یکتایی دارد که بر عملکرد رطوبت‌گیر تاثیر می‌گذارد. این مشخصات را می‌توان در یک نمودار به عنوان خطوط ظرفیت هم‌دما نشان داد که به چگونگی تغییر میزان رطوبت به عنوان تابعی از رطوبت نسبی هنگامی‌که هوا و دسیکنت در یک دما هستند، اشاره می‌کند.

شکل ۶-۸ ظرفیت چهار دسیکنت در دمای $77^{o}F$ را نشان می‌دهد. ظرفیت به عنوان نسبت وزن آب ذخیره‌شده به وزن دسیکنت خشک بیان می‌شود. برای مثال در رطوبت نسبی ٪۲۰، سیلیکاژل نوع ۵ به اندازه ٪۲٫۵ وزن خشک خود، سیلیکاژل نوع ۱ تا ٪۱۵، غربال‌های مولکولی تا ٪۲۰ و لیتیم‌کلرید تا ٪۳۵ وزن خشک خود می‌تواند رطوبت ذخیره کنند. بنابراین اگر فرآیند رطوبت‌گیری کاملا هم‌دما باشد و اگر رطوبت‌گیر بایستی ۵۰lbs بخار آب از یک جریان هوا با رطوبت نسبی ٪۲۰ بگیرد، رطوبت‌گیر باید حاوی حداقل مقدار دسیکنت نشان داده شده در شکل ۶-۸ باشد.

اما مقدار دسیکنت یک رطوبت‌گیر بدین طریق محاسبه نمی‌شود، زیرا مسأله بسیار پیچیده‌تر است. برای مثال مقادیر گفته شده در جدول، رطوبت مورد انتظار را در صورتی دفع می‌کنند که زمان کافی برای تعادل کل دسیکنت با هوا وجود داشته باشد، که زمان آن بسیار طولانی خواهد شد. برای جریان‌های با سرعت زیاد نیز مقدار دسیکنت بسیار بیشتری برای دفع یک پوند هوا نیاز است. افزون بر این، فرآیند جذب رطوبت در یک رطوبت‌گیر واقعی به هیچ وجه هم‌دما نیست و با عبور هوا از روی دسیکنت، دمای دسیکنت و هوا و محتوای رطوبت دائما تغییر می‌کند. اما خطوط هم‌دمای دسیکنت نشان می‌دهند که چرا بعضی دسیکنت‌ها در مواردی استفاده می‌شوند ولی در جایی دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

برای مثال معمولا از غربال‌های مولکولی برای خشک کردن هوا تا دمای نقطه شبنم بسیار پایین استفاده می‌شود. با توجه به خطوط هم‌دما مشخص است که غربال‌های مولکولی هنگامی‌که رطوبت نسبی کمتر از ٪۱۰ است، ظرفیت بیشتری نسبت به دیگر دسیکنت‌ها دارند و در نتیجه مقدار دسیکنت کمتری برای گرفتن رطوبت مورد نیاز است.



شکل ٦-٨

ظرفیت دسیکنت

در دمای ثابت هر دسیکنت ظرفیت مشخصی برای جذب رطوبت دارد. ظرفیت دسیکنت تابعی از رطوبت نسبی است. جدول زیر نشان‌دهنده یکی از نتایج این موضوع است. مقدار دسیکنت مورد نیاز برای گرفتن یک مقدار بخار آب معین با توجه به خصوصیات هر کدام از مواد متغیر است.

	ظرفیت رطوبت‌گیر در رطوبت نسبی ۲۰٪ (درصد وزن خشک)	وزن دسیکنت برای ۵۰lbs آب (lbs.)
لیتیم‌کلرید	۳۵٪	۱۴۳
غربال مولکولی	۲۰٪	۲۵۰
سیلیکاژل نوع ۱	۱۵٪	۳۳۳
سیلیکاژل نوع ۵	۲/۵٪	۲۰۰۰

همچنین، بعضی از سازندگان بیش از یک نوع دسیکنت را در تجهیزات خود بکار می‌برند که دلیل این کار را می‌توان با خطوط هم‌دما توضیح داد. برای مثال می‌توان در یک دستگاه از دو نوع سیلیکاژل استفاده کرد؛ سیلیکاژل نوع ۱ در رطوبت نسبی پایین کار می‌کند و سیلیکاژل نوع ۵ در رطوبت نسبی بیشتر از ٪۹۰ رطوبت را جذب می‌کند.

همانند تعیین عمق بستر و نرخ چرخش هوا، انتخاب دسیکنت و مقدار استفاده‌شده در یک شرایط معین نیز اغلب توسط سازندگان رطوبت‌گیر تعیین می‌شود. رفتار دسیکنت از یک خط هم‌دما بسیار پیچیده‌تر است، به خصوص اگر مشخصات دفع رطوبت نیز به اندازه جذب رطوبت از هوای فرآیندی اهمیت داشته باشد. این پیچیدگی با ترکیب دسیکنت‌ها بیشتر نیز می‌شود و اکثر سازندگان معمولا از ترکیب دسیکنت‌ها برای دستیابی به کارایی بیشتر در کاربردهای خاص استفاده می‌کنند.

مورد دیگری که اغلب مورد توجه طراحان قرار می‌گیرد، عملکرد یک دسیکنت یا ترکیب دسیکنت‌ها با گذشت زمان است و اینکه آلاینده‌های هوا همچون ذرات معلق و گازها چگونه بر

عملکرد تاثیر می‌گذارند.

به طور کلی دسیکنت‌ها با دقت انتخاب شده‌اند، زیرا در مقابل حرارت و تاثیرات آلاینده‌ها مقاومند، اما به دلیل اینکه هر کدام مشخصات خاص خود را دارند، طراح سامانه باید مشخصات زیر را مورد توجه قرار دهد:

- رطوبت‌گیرهای جامدی چون سیلیکاژل و غربال‌های مولکولی آب را بر روی سطوح و در بین درزهای خود ذخیره می‌کنند. اگر حفرات آن‌ها با گرد و غبار پر شود، فضای کمتری برای آب باقی می‌ماند و در نتیجه با گذشت زمان عملکرد سامانه به آرامی کاهش می‌یابد.
- بخارهای آلی نیز همچون آب توسط رطوبت‌گیرهای جامد به طور بسیار کارآمدی جذب می‌شوند و به همین دلیل از برخی از رطوبت‌گیرها برای گرفتن چنین آلودگی‌هایی از فضا استفاده می‌شود. اما برخی از مواد هنگامی‌که در معرض گرمای احیا قرار می‌گیرند، پلیمری می‌شوند که موجب بسته شدن حفرات و یا تغییر مشخصات دسیکنت می‌شود.
- رطوبت‌گیرهای مایعی چون لیتیم‌کلرید و تری‌اتیلن‌گلیکول[1] رطوبت را طی یک واکنش شیمیایی جذب می‌کنند. وجود مواد شیمیایی دیگر درون جریان هوا می‌تواند موجب اخلال در انجام واکنش و یا تغییرات شیمیایی دسیکنت شود. برای نمونه هوای بسیار آلوده حاوی اکسید گوگرد در طی چند سال موجب تبدیل لیتیم‌کلرید به لیتیم‌سولفات می‌شود که یک دسیکنت نامناسب است.
- هنگامی‌که سرعت جریان هوا زیاد باشد، ذرات کوچکی از دسیکنت، چه مایع و چه جامد، وارد جریان هوا می‌شود و یا بر اثر چرخه‌های حرارتی دسیکنت تکه تکه می‌شود. این فرآیند طی سال‌ها دائما انجام می‌شود و تکه‌های ریزی از دسیکنت در مقیاس ۰/۰۰۰۱ جرم آن در سال جدا می‌شود.

ملاحظات ذکر شده برای طراح سامانه ساده است؛ هوای ورودی به رطوبت‌گیر همواره باید تصفیه شود. در صورتی‌که وجود ذرات آلاینده در پایین‌دست جریان خطرناک باشد، باید برای هوای خروجی رطوبت‌گیر نیز از فیلتر هوا استفاده کرد. اگر طراح انتظار وجود مقدار زیادی بخار به غیر از آب در سامانه رطوبت‌گیری دارد، می‌تواند با سازندگان رطوبت‌گیر مشورت کند.

[1] Triethylene glycol

۷ طراحی سامانه

سامانه‌های رطوبت‌گیری دسیکنت اندازه، قیمت و پیچیدگی‌های متنوعی دارند، اما بر حسب کاربرد می‌توان آن‌ها را در یکی از پنج دسته زیر قرار داد:

- انبارهای غیر فعال[1]

انبارهای غیر فعال شامل محیط‌هایی می‌شود که در آن‌ها اغلب فضای کنترلی زیاد باز و بسته نمی‌شود. برای مثال می‌توان به انبار مواد موزه‌ها و انبارهای تجهیزات نظامی و صنعتی اشاره کرد.

- انبارهای فعال[2]

در این مکان‌ها رفت و آمد بیشتر است و تغییرات بارهای رطوبی و دمایی نسبت به انبارهای غیرفعال بالاتر است. انبارهای فولاد، انبارهای کود شیمیایی و انبارهای سرد نگهداری مواد نمونه‌ای از این انبارها هستند.

- سامانه‌های HVAC سازمانی و تجاری

این سامانه‌ها نیازمند ترکیب کنترل شرایط دمایی برای آسایش انسان و شرایط رطوبی پایین برای نگهداری محصولات هستند. سوپرمارکت‌ها، هتل‌ها، مراکز درمانی و آزمایشگاه‌ها نمونه‌هایی از این گروه هستند. در این سامانه‌ها نسبت بار گرمای محسوس[3] (SHR) پایین است، بنابراین رطوبت‌گیری اهمیت زیادی دارد.

- سامانه‌های HVAC صنعتی

بسیاری از فرآیندهای صنعتی با کنترل مناسب رطوبت و دما بسیار بهتر انجام می‌شوند. در چنین کاربردهایی سامانه باید نوسان کمی داشته باشد و در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز و هفت روز هفته کار کند که در نتیجه به سامانه‌هایی با ظرفیت زیاد نیاز خواهد بود. در چنین کاربردهایی کیفیت محصول و سرعت تولید از جمله دغدغه‌های اصلی است.

- سامانه‌های خشک‌کننده محصولات

در این کاربردها سامانه رطوبت‌گیری برای گرفتن رطوبت از مواد، به جای نگهداری یک

---

[1] Passive storage
[2] Active storage
[3] Sensible heat load ratio

اتاق یا ساختمان در یک رطوبت ثابت، طراحی می‌شود. مواد دارویی، شیرینی‌ها، فیلم‌های عکاسی، ماهی‌ها و رزین‌های پلاستیکی با استفاده از سامانه‌های رطوبت‌گیری دسیکنت خشک می‌شوند. ساختمان‌ها و موادی که باید سریعا خشک شوند، به کمک شرکت‌های خدماتی با بکارگیری رطوبت‌گیرهای مستقل برای یک ماده یا اتاق خشک می‌شوند. شباهت همه این کاربردها در این است که با بکارگیری دمای بالا و سرعت زیاد برای خشک‌کردن سریع کافی نیست و یا به محصولات آسیب حرارتی وارد می‌شود، در نتیجه استفاده از این نوع رطوبت‌گیرها از لحاظ اقتصادی به صرفه خواهد بود.

مراحل طراحی در همه پنج نوع رطوبت‌گیر یکسان است:

۱. تعریف هدف پروژه
۲. تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن
۳. محاسبه بارهای رطوبی و حرارتی
۴. انتخاب اجزا و تعیین موقعیت آن‌ها
۵. انتخاب سامانه کنترلی و تعیین موقعیت آن

به منظور رسیدن به بیشترین بازده ممکن ابتدا طراح باید هدف پروژه را به خوبی بفهمد. در این صورت متغیرهای دیگر طراحی نیز به راحتی تعیین خواهند شد.

ابتدا باید هدف پروژه به طور واضح بیان شود تا از بروز اشتباه و ابهام جلوگیری گردد و راهنمای تصمیمات طراحی باشد. برای مثال، چندین سال پیش، یک انبار تجهیزات نظامی ساخته شد و در آن سامانه رطوبت‌گیری که رطوبت نسبی را در کمتر از ٪۴۰ کنترل می‌کرد، نصب شد. با اینکه سامانه رطوبت‌گیری این شرایط را حاصل کرد، اما هدف اصلی پروژه جلوگیری از خوردگی مهمات بود که سامانه در انجام آن، عملکرد مناسبی نداشت.

ورقه‌های فلزی سقف ساختمان، در شب سریع‌تر سرد می‌شدند که موجب چگالش آب، حتی زمانی‌که رطوبت نسبی داخل فضا کمتر از ٪۴۰ بود، می‌شد. آب چگالیده شده بر روی مهمات می‌ریخت و موجب زنگ‌زدن آن‌ها می‌شد. اگر هدف پروژه واضح‌تر بیان شده بود، طراح علاوه بر رطوبت نسبی ٪۴۰، به مکانیزم‌های خوردگی دیگر همچون چگالش نیز توجه می‌کرد.

برای مثال اگر هدف پروژه جلوگیری از رشد قارچ بر روی دانه‌های ذرت و گندم باشد، نیازی به انتخاب تلرانس بسیار دقیق ٪۱± برای رطوبت نسبی فضا نیست. تنها نگرانی این است که رطوبت نسبی بیش از ٪۶۰ نشود و چگالش اتفاق نیفتد. در این صورت سامانه کنترلی نیز بسیار ساده است و تجهیزات بسیار کوچک و اقتصادی خواهند بود.

از سوی دیگر اگر هدف سامانه جلوگیری از خوردگی لیتیم باشد، نباید از کنترلی که دارای تلرانس ٪۵± رطوبت نسبی است، برای کاهش هزینه استفاده شود. زیرا لیتیم در رطوبت نسبی بالای ٪۲ خورده شده و هیدروژن آزاد می‌کند که در نهایت منفجر می‌شود. سامانه کنترلی با تلرانس بیشتر از سطح کنترل رطوبت مورد نظر نیز استفاده‌ای نخواهد داشت. درک صحیح و درست از هدف پروژه از هزینه‌های بی‌مورد و اشتباهات چه در زمان طراحی و چه در هزینه تجهیزات جلوگیری می‌کند.

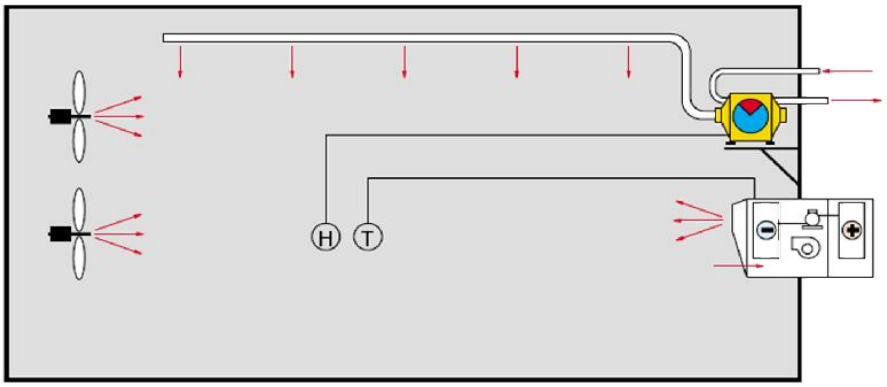
به علاوه برای طراحی سامانه به بهترین شکل ممکن باید در ذهن داشت که سامانه‌های رطوبت‌گیری دینامیک هستند و هیچ جزئی به تنهایی و جداگانه عمل نمی‌کند. تغییر در هر جنبه سامانه بر همه جنبه‌های دیگر اثر می‌گذارد، اما بیشتر طراحان فقط بر جنبه‌های مکانیکی سامانه تمرکز می‌کنند و مسائل مربوط به معماری و مدیریتی که بارهای رطوبی و حرارتی محسوس فضا را تعیین می‌کند، در نظر نمی‌گیرند.

داشتن فهم درستی از هدف پروژه و فهمیدن اینکه سامانه چگونه با محیط در ارتباط است، به طراح یک تصویر کلی می‌دهد که می‌تواند با استفاده از مراحل زیر که با مثال‌هایی نشان داده شده است، سامانه رطوبت‌گیری را طراحی کند.

۷-۱ انبارهای غیر فعال – مثال یک موزه

صفت "غیر فعال بودن" یک واژه نسبی است. در اینجا ما از این واژه برای تمایز قائل‌شدن بین سامانه‌هایی که بارهای متغیر و گذرای بزرگ دارند و سامانه‌هایی که چنین بارهایی ندارند، استفاده می‌کنیم. برای مثال یک آرشیو فیلم‌های عکاسی در صورتی که کسی در آن کار نکند، یک انبار غیر فعال به شمار می‌رود. در مقابل، انبار بستنی به عنوان یک انبار "فعال" به شمار می‌رود، زیرا طی شبانه روز کارگرها و لیفتراک‌های زیادی مشغول جابه جایی محصولات هستند و موجب ایجاد بارهای گذرا در انبار می‌شوند.

انبارهای غیر فعال ساده‌ترین سامانه‌های رطوبت‌گیری هستند. بارهای رطوبی آن‌ها کم و میزان تلرانس زیاد است. در صورتی که ساختمان بزرگ نباشد، نیازی به سامانه بزرگ نخواهد بود. طراحی سامانه شامل قرار دادن سامانه رطوبت‌گیر با ظرفیت صحیح، کانال‌کشی جریان هوای احیا و قرار دادن رطوبت‌سنج در محلی با چرخش خوب هوا می‌شود. به عنوان اولین مثال، اتاق کوچکی در زیرزمین یک موزه که برای نگهداری فیلم‌های و عکس‌ها استفاده می‌شود را در نظر بگیرید.



شکل ۷-۱

نصب سامانه در فضاهای رطوبت‌گیری‌شده می‌تواند به سادگی و مقرون به صرفه انجام شود. تنها به یک محفظه که در آن نشت هوا صورت نگیرد، نیاز است.

در این مثال اتاق یک سازه استاندارد است و از یک قاب با ابعاد ۲in در ۴in که با نوار پلاستیکی پوشیده شده است و تمام اتصالات آن با نوار عایق بخار آلومینیمی درزبندی شده‌اند، تشکیل شده است. نکته مهم این است که عایق بخار باید پیوسته باشد تا هیچ هوای مرطوبی به داخل فضا نشت نکند. کف اتاق با رنگ اپوکسی پوشیده شده است و در سقف اتاق لایه‌ای از رنگ با عایق بخار بکار برده شده است. استفاده از کاشی سقفی نیز به تنهایی کافی نیست.

۷-۱-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه

هدف پروژه جلوگیری از محو شدن رنگ‌های آلی استفاده شده در فیلم‌های عکاسی و جلوگیری از شکل‌گیری یا رشد قارچ بر روی فیلم‌ها و عکس‌ها است. مجموعه‌ای از نقاشی‌ها و فیلم‌های عکاسی با شرط فراهم آوردن شرایط نگهداری مناسب، به موزه تحویل داده شده است. ولی مکان دیگری در قسمت تهویه‌شده برای انبار آن‌ها وجود ندارد و از طرف دیگر تجربه نیز نشان داده است که قرار دادن آن‌ها در یک قسمت سرد زیرزمین فایده‌ای ندارد و طی چند ماه به دلیل رطوبت بالا قارچ بر روی فیلم‌ها رشد کرده است. مسئول موزه درصدد است تا با یک بودجه کم بهترین وسیله ممکن را برای نگه‌داری این وسایل تهیه کند.

۷-۱-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن

بهترین اطلاعات موجود از تولیدکنندگان فیلم‌های عکاسی پیشنهاد می‌دهد که شرایط بهینه برای نگهداری آن‌ها دمای $0^{\circ}F$ و رطوبت نسبی ۳۵٪ است. در این شرایط عکس‌های رنگی تا مدت زمان بسیار طولانی (شاید بیش از ۵۰۰ سال) دوام می‌آورند (مراجع را ببینید). متاسفانه بودجه برای خرید دستگاهی که چنین شرایطی را فراهم کند، کافی نیست. همچنین اگر وسایل در دمای

خیلی پایین نگهداری شوند، قبل از آنکه به محیط بیرون آورده شوند، باید مدتی در "اتاق خشک گرمادهی[1]" قرار داده شوند. اگر این وسایل مستقیما از فضای بسیار سرد به محیط بیرون با دمای ۰°F آورده شوند، ممکن است بر روی آن‌ها همانند یک قوطی نوشابه در زمستان، چگالش رخ دهد که موجب آسیب عمده به فیلم‌ها می‌شود.

از این رو برای کاهش ده برابری مقدار هزینه و همچنین امکان دسترسی راحت‌تر به فیلم‌های عکاسی مسئول موزه تعیین می‌کند که آن‌ها را در رطوبت نسبی ٪۳۰ تا ٪۴۰ و دمای ۵۵°F تا ۷۰°F نگهداری کرد. تحقیقات نشان می‌دهد که در این شرایط فیلم‌ها حداقل تا ۵۰ سال عمر می‌کنند و هیچ آسیبی به آن‌ها نمی‌رسد.

۳-۱-۷ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی

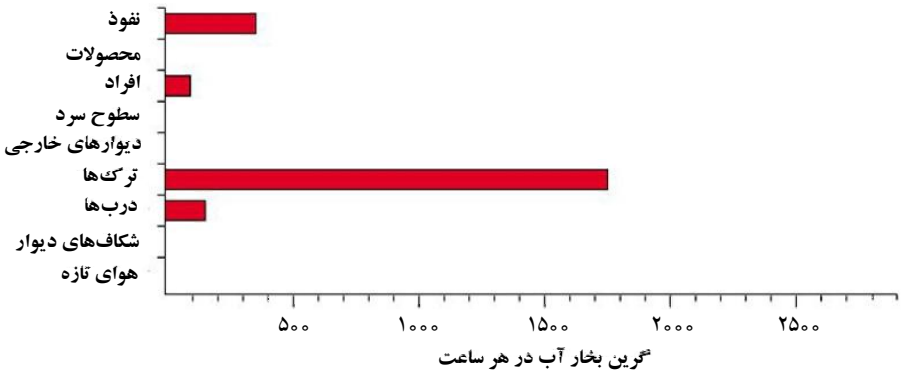
به جای تلاش برای ایجاد شرایط مناسب در زیرزمینی قدیمی که کف آن سنگی و کوبیده شده است، طراح پیشنهاد می‌دهد که اتاقی مجزا برای محل ذخیره‌سازی ساخته شود. در این صورت امنیت و تمیزی محل ذخیره‌سازی بیشتر شده و کنترل محیط آن ساده‌تر می‌گردد.

ابعاد اتاق ′۱۰ * ′۳۰ * ′۲۰ است. یک در دارد، اما پنجره ای در آن نیست. سقف و دیوارها با تخته "$\frac{۳}{۸}$ روی تیرچه ساخته شده است و با دو لایه رنگ با پایه لاستیکی رنگ‌آمیزی شده است. کف اتاق از بتون ساخته شده و با رنگ اپوکسی رنگ شده است. به طور خلاصه، اتاق ساده و طبق استاندارد ساختمان‌های مسکونی ساخته شده است. از آنجایی که توجه طراح بیشتر به درزبندی محل اتصال دیوارها به کف و سقف معطوف است، کیفیت دیوارها، کف و سقف اتاق مناسب است. به علاوه چون اتاق در زیرزمین قرار دارد و در معرض هوای محیط نیست، نیازی به ساختمان با استحکام و دوام بیشتر نیست.

اگر نیاز باشد که دمای کمینه اتاق افزایش یابد، می‌توان از عایق فایبرگلاس ′۴ که ساده و ارزان‌قیمت است، استفاده کرد. اما در این مثال هر چه سردتر باشد بهتر است و چون هیچگاه دمای اتاق حتی در زمستان هم کمتر از ۵۵°F نمی‌شود، نیازی به تجهیزات گرمایش و یا عایق‌کاری نیست.

در تابستان دمای اتاق تا ۸۰°F افزایش می‌یابد که در نتیجه نیاز به تجهیزات سرمایشی خواهد بود. محاسبات بارهای حرارتی نشان می‌دهد که بدون عایق‌کاری بار حرارتی حدود ۴۰۰BTU در هر ساعت به دست می‌آید. بار رطوبی نیز بسیار کم است و شامل بارهای رطوبی ناشی از نفوذ از دیوارها، سقف و کف، نشت هوا از کنار درب ورودی و تعویض هوا هنگام باز شدن درب توسط افراد است. در این مورد مسئول موزه می‌داند که درب اتاق در روز بیشتر از یک یا دو بار باز نمی‌شود و این بخش فعال نیست.

[1] Dry warming room



شکل ۷-۲

محاسبات دقیق بارهای رطوبی مطابق جزئیات گفته‌شده در فصل پنجم انجام شده است و نشان می‌دهد که بار رطوبی کم و به اندازه ۲۰۹۲ گرین در هر ساعت است. این بار رطوبی کمتر از ۰/۵lb آب است. بیشترین میزان بار مربوط به ترک‌های اطراف درب ورودی است. با استفاده از یک درزگیر می‌توان این بار رطوبی را کاهش داد.

بار رطوبی ناشی از افراد و باز و بسته شدن درب‌ها با فرض دو بار باز و بسته شدن درب برای هر نفر در طول روز محاسبه شده است و سپس بار رطوبی میانگین در طول هشت ساعت به دست آمده است. برای انجام محاسبات به صورت محافظه‌کارانه‌تر باید تمام بار را در یک ساعت در نظر گرفت، دقیقا همانطور که بار رطوبی اتفاق می‌افتد. با این حال چون محصول ذخیره شده به تغییرات اندک سطح کنترلی حساس نیست، در این مثال طراح محاسبات محافظه‌کارانه را در نظر نمی‌گیرد. این تصمیم موجب کاهش هزینه می‌شود، اما از آنجایی که رطوبت‌گیر نمی‌تواند تمام بار رطوبی را به سرعت بگیرد، مسئول موزه باید متوجه باشد که سامانه برای رطوبت‌گیری به زمان نیاز دارد.

۷-۱-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار رطوبی

سامانه تبرید باید قادر به گرفتن ۴۰۰BTU/hr حرارت از فضا با دمای ۷۰°F باشد. این میزان حرارت در حدود ظرفیت یک کولر پنجره‌ای ساده است که برای ساختمان‌های مسکونی ساخته می‌شود. چنین سامانه‌ای به راحتی در دیوار نصب می‌شود و کندانسور آن حرارت را به محیط بیرون دفع می‌کند. البته طراح باید در نظر داشته باشد که این سامانه‌ها مقداری مکش از هوای بیرون برای تهویه دارند. گاهی می‌توان به کمک سوییچ دستگاه ورود این هوا را درزبندی کرد، در غیر این صورت باید با نوارهای آلومینیمی از نفوذ هوای مرطوب محیط به فضای کنترلی جلوگیری کرد.

رطوبت‌گیر نیز باید ۲۱۰۰ گرین بخار آب را در هر ساعت از فضا با دمای ۵۵°F تا ۷۰°F و رطوبت نسبی ٪۳۵ دفع کند. با استفاده از یک رطوبت‌گیر دسیکنت کوچک می‌توان این کار را انجام داد. با توجه به اینکه ظرفیت رطوبت‌گیر و سامانه سرمایش بیش از حد مورد نیاز است، این سامانه‌ها به طور متناوب و با توجه به سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن روشن و خاموش خواهند شد.

۷-۱-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی

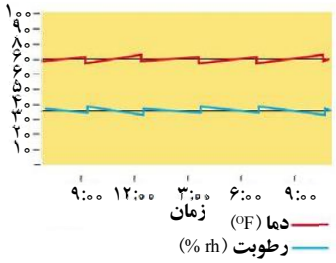
در این مثال یکی از اهداف نگهداری فضا در یک شرایط ثابت است. اما به دلیل ساده و کوچک بودن اجزا سامانه کنترلی از نوع روشن–خاموش انتخاب می‌شود که تنظیم دقیق ظرفیت حاصل نمی‌شود. با روشن شدن دستگاه، خیلی سریع بارهای رطوبی و حرارتی گرفته خواهند شد، زیرا ظرفیت دستگاه بیشتر از بارهای تولید شده است.

شرایط کنترلی در اتاق ذخیره‌ای که تجمع و تراکم وسایل زیاد است، سخت‌تر می‌شود. در صورتی که در فضا قفسه‌بندی وجود داشته باشد و یا تراکم وسایل در قسمتی بیشتر باشد، این تراکم می‌تواند موجب کم شدن جریان هوا شود که در نتیجه قسمتی از اتاق بیش از حد خشک خواهد شد، در صورتی که قسمت‌های دیگر در شرایط مطلوب نخواهند بود.

برای حل دو مشکل بالا نیازی به هزینه زیادی نیست. طراح می‌تواند از یک پنکه پره‌دار ساده چرخش هوا استفاده کند. بدین طریق سامانه تبرید و رطوبت‌گیر در کل فضای اتاق، نه فقط فضای نزدیک به رطوبت‌گیر و ترموستات، عمل می‌کنند. همچنین وسایل کنترلی نباید در جریان هوایی که مستقیما از سامانه بیرون می‌آید قرار داده شوند، زیرا در این صورت سامانه کنترلی دستگاه را

قبل از آنکه تمام فضای مورد نظر خشک و سرد شود، خاموش می‌کند.

اگر دما و رطوبت فضای کنترلی به وسیله صفحه نمایش نشان داده می‌شود یا روی نقشه رسم می‌شود، باید تجهیزات نمایش‌دهنده و یا ثبت‌کننده را برای کمینه کردن خطای تجهیزات، نزدیک به ترموستات و رطوبت‌سنج نصب کرد. هیچ دو حسگری مقدار دقیقا برابری را به دست نمی‌دهند، اما کنار هم قرار دادن حسگرهای ثبت‌کننده و کنترل‌کننده ابهامات را به حداقل می‌رساند.

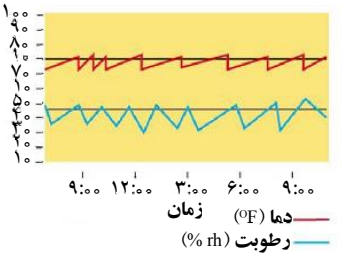


شکل ۷-۳

چون در یک بازه‌ای از شرایط مشکلی برای محصولات بوجود نمی‌آید و اندازه سامانه رطوبت‌گیری مناسب در نظر گرفته شده است، استفاده از یک رطوبت‌سنج و دماسنج روشن-خاموش کافی است.

۷-۱-۶ ملاحظات دیگر

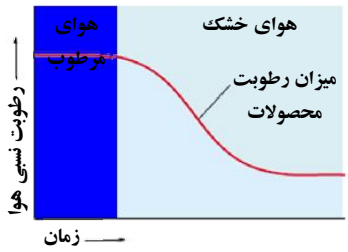
- گاهی اوقات توزیع و یکنواختی هوا اهمیت بیشتری دارد. برای مثال این موضوع در اتاق‌های باریک و یا اتاق‌های L شکل یا Z شکل باید مد نظر گرفته شود. یک راهکار برای این موضوع که با موفقیت در یک انبار فولاد بکار برده شد، استفاده از چندین رطوبت‌گیر کوچک به جای یک رطوبت‌گیر بزرگ و قرار دادن آن‌ها در نقاط مختلف اتاق است که هر یک با یک رطوبت‌سنج محلی کنترل می‌شود.
- راهکار دیگر این است که به جای استفاده از پنکه از یک سامانه کانال‌کشی ساده که هوا را در یک سمت اتاق تخلیه و در سمت دیگر جمع می‌کند و به طور دائم کار می‌کند، برای توزیع هوا در نقاط مختلف استفاده کرد. با توجه به اینکه در این حالت نیز هوای رطوبت‌گیری‌شده و خنک شده در نزدیکی حسگرهای نصب‌شده تخلیه می‌گردد، می‌توان از سامانه رطوبت‌گیری و سرمایشی مستقل استفاده کرد. در اتاق‌هایی که سامانه کانال‌کشی مرکزی دارند، بهتر است به جای استفاده از یک رطوبت‌سنج از چندین رطوبت‌سنج استفاده شود. این رطوبت‌سنج‌ها در نقاط مختلف نصب می‌شوند و در این صورت هر کدام از آن‌ها می‌تواند در صورت لزوم دستگاه را روشن کند.
- در ابتدای راه‌اندازی، سامانه‌ها بیشتر از حد انتظار کار می‌کنند و تاثیر زیادی بر میزان رطوبت فضا نمی‌گذارند. اما با گذشت زمان شرایط اتاق به شرایط کنترلی می‌رسد. این حالت در زمانی‌که رطوبت مواد و یا فضای کنترلی زیاد باشد اتفاق می‌افتد.
- برای مثال رطوبت تعادلی کاغذ و کارتن معمولی در رطوبت نسبی ٪۸۰ برابر با ٪۱۴ و در رطوبت نسبی ٪۴۵ برابر با ٪۶ است. بنابراین اگر این مواد در فضایی مرطوب نگهداری شده و سپس به فضای کنترلی ذکر شده در این مثال آورده شوند، در نهایت تقریبا ٪۸ وزن آن‌ها بخار می‌شود. در یک اتاق ′۲۰ * ′۳۰ می‌توان تقریبا ۳۰۰۰lbs کاغذ نگهداری کرد و در این حالت سامانه رطوبت‌گیری باید ۲۴۰lbs بخار آب از این مواد بگیرد تا به شرایط تعادلی با هوای خشک اتاق برسد. این کار ممکن است چندین روز طول بکشد که در این مدت ممکن است رطوبت هوا بیشتر از شرایط کنترلی باشد.



شکل ۷-٤

به صورت معمول تمایل به انتخاب تجهیزات بزرگ‌تر است، اما در این زمینه باید احتیاط شود، زیرا کنترل روشن-خاموش در سامانه‌های بزرگ انحراف بیشتری در شرایط مرجع اتاق ایجاد می‌کنند.

- چرخش خوب هوا در اتاق و نزدیک قفسه‌بندی‌ها موجب سریع‌تر شدن فرآیند رطوبت‌گیری می‌شود، اما در بیشتر موارد تغییر سریع میزان رطوبت مواد موجب آسیب به آن‌ها می‌شود. برای محصولات حساسی که در ابتدا رطوبت زیادی دارند، بهتر است که رطوبت فضا به تدریج طی چند روز و یا چند هفته گرفته شود تا آسیبی به محصولات و مواد نرسد.



شکل ۷-۵

پس از روشن شدن رطوبت‌گیر سامانه باید مواد مرطوب موجود در اتاق را نیز خشک کند. این بار رطوبی اضافی ممکن است رسیدن به شرایط کنترلی تعیین‌شده را به تاخیر اندازد.

خشک‌کردن ساختمان‌های تازه‌تاسیس بسیار دشوار است، زیرا در هنگام ساخت آن‌ها، باران و رطوبت زیاد موجب خیس شدن مصالح می‌شود. طراح باید در ذهن داشته باشد که قبل از آنکه سامانه شروع به رطوبت‌گیری اتاق کند، این بار رطوبی اولیه باید گرفته شود.

۷-۱-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک موزه

[1] McGuinness, John J. Jr. 1976. Environmental control for historic properties. Technology & conservation magazine, Winter 1976

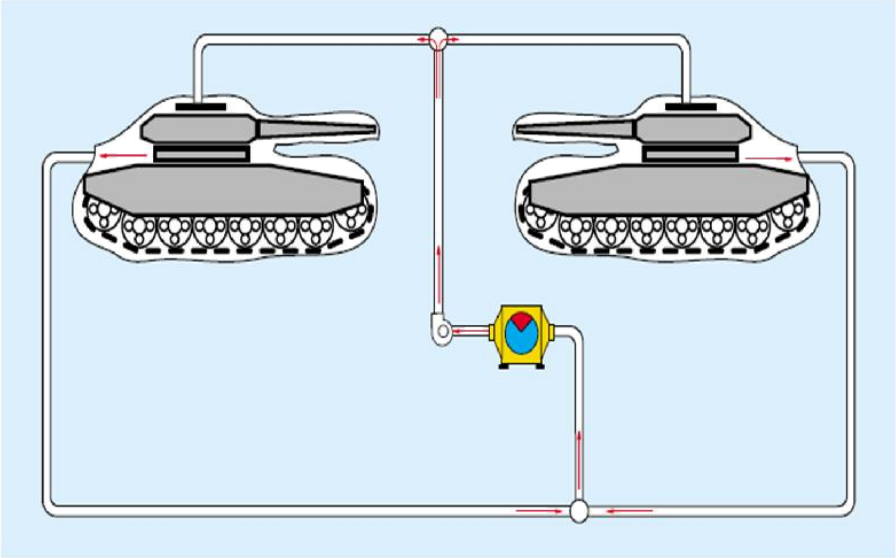
[2] Preservation and restoration of moving images and sound. 1986. Féderation Internationale des Archives du Film. Coudenberg 70 B-1000 Brussels, Belgium

[3] Thompson, Garry. 1978 The Museum Environment. Butterworth Ltd. London & Boston. 19 Cummings Park Woburn, MA 01801

[4] Harriman, Lewis G. III, Brundrett, G., Kittler, R., 2001. Humidity Control Design Guide. ASHRAE, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329 USA ISBN: 1-883413-98-2.

۷-۲ انبارهای غیر فعال – مثال تجهیزات نظامی

انبارهای نگهداری تجهیزات نظامی و صنعتی یک مثال دیگر از انبارهای غیر فعال است. در این موارد تجهیزات شامل ابزارهای مکانیکی، قطعات الکترونیکی و سطوح ماشین‌کاری‌شده هستند که در شرایط رطوبی بالا آسیب می‌بینند.



شکل ۷-۶

حساسیت تجهیزات نظامی و صنعتی به رطوبت فضا معمولا از حساسیت آن‌ها به دما بیشتر است. هر چند این تجهیزات طوری طراحی می‌شوند که در برابر تغییرات شرایط آب و هوایی مقاوم باشند، اما اغلب در برابر هوا محفوظ نیستند. در این مورد درزهای بسیار زیادی در بدنه تانک وجود دارد.

در این مورد، تانک‌ها نقاط زیادی برای نفوذ هوا دارند که کشیدن کیسه‌های محافظ انعطاف‌پذیر بر روی آن‌ها نسبت به درزگیری همه سوراخ‌ها عملی‌تر است. سپس با استفاده از یک رطوبت‌گیر دسیکنت هوا به درون کیسه‌ها چرخانده می‌شود.

۷-۲-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه

هدف این پروژه جلوگیری از خوردگی قطعات بدون صرف هزینه و زمان زیاد و دوری از مشکلات گریس‌کاری است، زیرا امکان دسترسی به تجهیزات برای استفاده فوری باید به راحتی وجود داشته باشد. در این مثال یک واحد نظامی برای نگهداری تانک‌های خود در شرایط آماده‌باش با مشکلاتی روبرو بوده است. خرابی قطعات الکترونیکی مشکلات زیادی به همراه داشته است. هزینه تنظیم مجدد این تجهیزات نیز بسیار زیاد است و از طرف دیگر، تعداد افراد ماهر برای تنظیم مجدد این تجهیزات بسیار اندک است. هر چند اغلب این تجهیزات را در فضای کنترل‌شده رطوبتی نگهداری می‌کنند، اما بودجه ساخت و سازهای نظامی کاهش یافته است و چنین فضای کنترلی برای نگهداری تانک‌ها وجود ندارد. در نظر می‌گیریم قراردادی برای طراحی و نصب یک رطوبت‌گیر دسیکنت چرخان نوشته شده است.

۷-۲-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن

اطلاعات موجود در مورد خوردگی در هوای اتمسفری نشان می‌دهد که فلزات آهنی در رطوبت نسبی کمتر از ٪۵۰ به آرامی و در رطوبت نسبی بیشتر از آن با سرعت بیشتری خورده می‌شوند (مراجع را ببینید). اما در این مثال خوردگی قطعات الکترونیکی اهمیت بیشتری دارد، زیرا بیشتر آن‌ها از آلیاژهای مس ساخته شده‌اند و نسبت به مواد آهنی حساسیت بیشتری نسبت به خوردگی دارند. همچنین در محل اتصالات اغلب دو آلیاژ یا فلز غیر متشابه به یکدیگر متصل می‌شوند که این موضوع موجب فعالیت الکتروشیمیایی بیشتر در اتصالات می‌شود. افزون بر این چون مقدار ماده در محل اتصال کم است، مقدار بسیار کم خوردگی نیز مشکلاتی را در پی

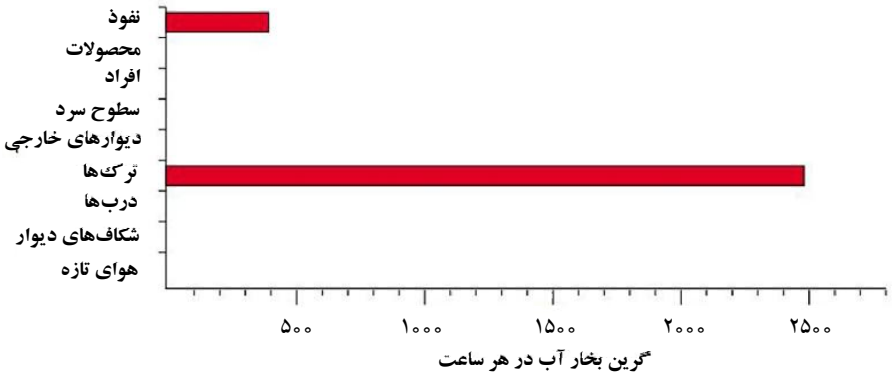
خواهد داشت. افزایش مقاومت الکتریکی در محل خوردگی حتی قبل از آنکه با چشم غیر مسلح دیده شود، مشکلاتی را ایجاد می‌کند.

با فرض وجود غلظت معمولی گوگرد دی‌اکسید و گوگرد تری‌اکسید، اطلاعات صنعتی نشان می‌دهد که اگر رطوبت نسبی از ٪۸۰ به ٪۶۰ کاهش یابد، میزان خوردگی مس نصف می‌شود و اگر تا ٪۳۰ کم شود، میزان خوردگی به ٪۱۰ حد نرمال می‌رسد. بنابراین مسئول پروژه رطوبت نسبی ٪۳۵ و تلرانس ٪۵ را تعیین می‌کند. همچنین چون تجهیزات به دما حساس نیستند، نیازی به سرمایش یا گرمایش تانک‌ها در انبار نیست.

۷-۲-۳ گام سوم- محاسبات بارهای رطوبی

تانک‌ها را در کیسه‌های محافظ مخصوصی از جنس وینیل[1] نگهداری می‌کنند. مسئول پروژه تعیین می‌کند که از یک سامانه رطوبت‌گیری "بسته[2]" و یا " رفت و برگشتی[3]" استفاده شود. هوا از کیسه‌ها گرفته و وارد سامانه رطوبت‌گیر می‌شود و پس از رطوبت‌گیری دوباره به کیسه بازگردانده خواهد شد.

مقدار اندکی نشت هوا از شکاف‌ها و درزهای محل اتصال لوله‌های توزیع هوا به کیسه محافظ وجود دارد. افزون بر این، مقدار بسیار اندکی نفوذ از کیسه محافظ وینیلی که به طور کامل عایق بخار نیست، نیز صورت می‌گیرد. بجز این مقدار کم نفوذ هوا بار رطوبی دیگری وجود ندارد. در این شرایط هیچ دربی باز نمی‌شود، هیچ ماده مرطوبی وارد و یا خارج نمی‌شود و بار رطوبی ناشی از تنفس افراد وجود ندارد. به علاوه نیازی به هوای تازه وجود ندارد.



شکل ۷-۷
در یک سامانه "بسته" بار رطوبی بسیار کمی وجود دارد. هوا بین این محفظه بسته عایق بخار و کانال‌ها جریان می‌یابد. مقدار هوای بسیار کمی از کیسه‌ها نفوذ می‌کند و بار رطوبی بزرگ‌تری (هر چند همچنان ناچیز است) از درزها و زیپ‌های کیسه و اتصالات کانال‌ها نشت می‌کند.

در این انبارها تانک‌ها در شرایط آماده باش و با مخزن سوخت پر نگهداری می‌شوند که در این صورت بحثی اساسی در مورد امکان آتش‌گیری گازهای درون محفظه مطرح می‌شود. البته در این مثال سوخت تانک‌ها گازوئیل است و خطری ندارد. اما در مورد سوخت‌های فرّاری همچون سوخت جت هواپیماها، در طراحی سامانه باید امکان وارد کردن هوای تازه و خارج کردن گازهای موجود در کیسه محافظ از طریق شیرهای اطمینان نیز در نظر گرفته شود. در این سامانه‌های "باز[4]" بار رطوبی هوای تازه نسبت به سامانه‌های بسته بسیار بیشتر و قابل ملاحظه است.

---
[1] Vinyl
[2] Closed dehumidification system
[3] Recirculated dehumidification system
[4] Open dehumidification system

۷-۲-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار رطوبی

در این مثال نیازی به سرمایش و گرمایش نیست. همچنین بارهای رطوبی موجود در کیسه‌های محافظ چهار تانک در مجموع کمتر از یک پوند بخار آب در ساعت است و در نتیجه رطوبت‌گیر مورد نیاز کوچک خواهد بود. اما دو مسأله دیگر مطرح است. یکی اینکه ظرفیت هوای خشک سامانه برای گرفتن رطوبت در هنگام تغییرات سریع آب و هوایی باید در نظر گرفته شود و دیگر اینکه ظرفیت فن برای چرخش هوا درون کیسه مناسب باشد.

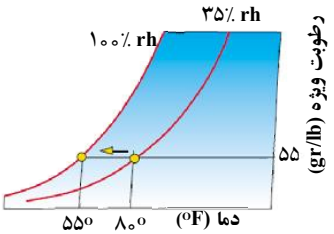
برای تصور کردن مسأله اول فرض کنید که هوای درون فضا در دمای $80^{o}F$ و رطوبت نسبی ٪۳۵ باشد. در این صورت رطوبت ویژه ۵۵گرین بخار آب در هر پوند هوا خواهد بود. سپس یک موج هوای سرد وارد منطقه می‌شود و دما تا $40^{o}F$ کاهش یابد، این میزان رطوبت، رطوبت نسبی ٪۱۰۰ را در پی خواهد داشت که در نتیجه رطوبت‌گیر باید فورا روشن شود و سریعا کیسه محافظ را خشک کند.

حالت دیگر این مشکل زمانی اتفاق می‌افتد که دمای هوا به سرعت در یک صبح بهاری یا پاییزی افزایش یابد. فرض کنید که فضا در دمای $40^{o}F$ و رطوبت نسبی ٪۳۵ است. دمای سطوح تجهیزات نیز $40^{o}F$ است. سپس دمای هوای اطراف تانک‌ها تا $80^{o}F$ افزایش یابد. در این صورت رطوبت‌سنج رطوبت هوا، نه رطوبت سطوح فلز، را اندازه‌گیری می‌کند و تا زمانی که رطوبت هوا بیشتر از ٪ ۳۵ نشده است، رطوبت‌سنج دستگاه را روشن نمی‌کند. اما در این حالت چون محفظه تجهیزات سردتر از بدنه آن‌ها است، بر روی آن‌ها چگالش اتفاق می‌افتد.

برای جلوگیری از این مشکلات ظرفیت رطوبت‌گیر باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند خیلی سریع کل هوا را رطوبت‌گیری کند. تصمیم مسئول پروژه بر این است که ظرفیت رطوبت‌گیر به گونه‌ای باشد که کل هوای موجود در کیسه محافظ را طی سی دقیقه خشک کند. این تصمیم به این دلیل است که در این مثال تانک‌ها در معرض هوای محیط قرار دارند و در یک انبار که تاثیر تغییرات هوا را کاهش می‌دهد، نگهداری نمی‌شوند. در انبارهای پوشیده ظرفیت مورد نیاز رطوبت‌گیر مورد استفاده برای تجهیزات ارتش آمریکا طوری انتخاب می‌شود که بتواند در هر چهار ساعت یک بار هوای موجود در کیسه محافظ را خشک کند.

بنابراین از آنجایی که چهار تانک باید رطوبت‌گیری شود که حجم هر کدام $510ft^3$ است، حجم کل هوا برابر $2040ft^3$ می‌شود. هوای درون لوله‌ها برابر با $60ft^3$ به دست می‌آید. اگر کل هوا باید در سی دقیقه خشک شود، هوای ورودی به رطوبت‌گیر برابر $70ft^3$ به دست می‌آید ($2100ft^3$ در سی دقیقه برابر با $70\ ft^3$ در دقیقه است). در این حالت رطوبت‌گیر همچنان کوچک است.

در حالت عادی قدرت فن رطوبت‌گیرهای کوچک به اندازه‌ای نیست که هوا را در کانال‌های طویل عبور دهد. با توجه به فصل ۲۳ کتاب راهنمای ASHREA می‌توان نتیجه گرفت که اگر هوا به وسیله لوله پی‌وی‌سی ″۴ منتقل شود، افت فشار ناشی از اصطکاک کمتر از ۱٫۵اینچ ستون آب خواهد بود.



شکل ۷-۸

اگر دمای هوای محفظه $80^{o}F$ و رطوبت آن ۵۵gr/lb باشد، شرایط موردنظر حاصل شده است، زیرا این شرایط نشان‌دهنده رطوبت نسبی ٪۳۵ است. اما اگر شرایط آب و هوایی تغییر کند و دمای هوا به $40^{o}F$ برسد، رطوبت‌گیر باید به سرعت هوا را رطوبت‌گیری کند، زیرا رطوبت نسبی در ۵۵gr/lb و $40^{o}F$ بیشتر از ٪۱۰۰ است.

رطوبت‌گیر باید بتواند بارهای رطوبی تعیین‌شده را بگیرد. اما اگر دمای هوا می‌تواند سریعا تغییر کند، سامانه باید ظرفیت لازم را داشته باشد تا هر چه سریع‌تر محفظه را رطوبت‌گیری کند. این مورد را می‌توان در دفعات تعویض هوا در واحد زمان لحاظ کرد. در این مثال مهندس پروژه یک بار تعویض هوا در هر نیم ساعت را در نظر گرفته است.

در یک سامانه شامل کیسه‌ها و کانال‌ها اندازه بارهای رطوبی بسیار ناچیز است. در ساختمان‌های قدیمی و بزرگ همواره این سوال وجود دارد که چگونه می‌توان ساختمان را برای اینکه عایق بخار شود، به بهترین شکل ممکن درزگیری کرد. گاهی طراح بیش از حد به درزگیری فضا توجه می‌کند. این مسأله در محدوده‌های معمول کنترل رطوبت (رطوبت نسبی ٪۴۰ تا ٪۶۰) نسبت به شرایط کنترلی پایین‌تر،اهمیت کمتری دارد.

بیشترین بار رطوبی از حفره‌های بزرگ دیوار به فضا نفوذ می‌کند. این مسأله را می‌توان با استفاده از پوشش پلاستیکی و درزگیری اطراف آن با استفاده از فویل آلومینیمی برطرف کرد. نیازی به درزگیری همه درزهای ساختمان نیست. مشکل اصلی نشت هوا است؛ نه انتقال بخار.

یک پروژه رطوبت‌گیری در یک انبار فولاد بیش از دو سال به تاخیر افتاد، زیرا هزینه درزگیری یا تعویض دیوارهای فولادی ساختمان بیش از ۲۵۰۰۰۰ دلار بود. در نهایت پروژه با بکارگیری تخته‌های چند لایه و پوشش‌دهی هواکش‌های انبار انجام شد و فقط ظرفیت سامانه مورد نیاز برای کنترل رطوبت اندکی بزرگ‌تر محاسبه شد. هزینه اضافی رطوبت‌گیر بزرگ‌تر فقط ٪۵ هزینه تعویض دیوارهای فولادی بود.

در یک مورد دیگر در یک ساختمان قدیمی و فرسوده مهندس از یک چهارچوب با تیرچه‌های با مقطع ۲in در ۴in استفاده کرد که با پوشش پلاستیکی پوشانده شده بود. در نتیجه تجهیزات موجود توسط ساختمان بزرگ در برابر تغییرات جوی محافظت شدند. بخار آب نیز به کمک یک سامانه کوچک که فقط "اتاق پلاستیکی" را رطوبت‌گیری می کرد، کنترل می‌شد.

می‌توان با اضافه کردن یک فن کوچک دیگر در پایین‌دست رطوبت‌گیر هوا را به تانک‌ها منتقل کرد. ظرفیت فن 2WC در جریان هوای ۷۰cfm است و باید در سامانه کنترلی، سامانه کنترل جریان هوا نیز لحاظ شود. اگر جریان هوا کنترل نشود، فن ۱۲۵cfm هوا جابجا می‌کند.

۷-۲-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی

سامانه کنترلی باید میزان هوای ورودی به کمک فن و سطح رطوبت داخل تانک‌ها را کنترل کند.

کنترل جریان هوا بسیار ساده است. از آنجایی که نیازی به تغییر جریان هوا نیست، صفحه متحرکی بر ورودی رطوبت‌گیر نصب شده است که موقعیت آن با استفاده از یک پیچ تنظیم می‌شود. از این صفحات متحرک در سامانه‌های تهویه نیز برای تنظیم جریان هوا استفاده می‌گردد.

کنترل رطوبت اندکی پیچیده‌تر است. در هر یک از تانک‌ها یک رطوبت‌سنج نصب شده است که همه آن‌ها به صورت موازی به هم متصل شده‌اند. در نتیجه رطوبت بیشتر از ٪۳۵ در هر یک از تانک‌ها سامانه رطوبت‌گیر و فن را روشن می‌کند. مسأله اصلی انتخاب محل نصب رطوبت‌سنج‌ها است.

با اینکه فضای داخلی تانک کوچک است، اما به دلیل اختلاف دمای هوا و امکان نشت مقدار کمی هوا در یک قسمت، رطوبت نسبی فضای داخلی تانک در نقاط مختلف می‌تواند متفاوت باشد. بهترین مکان برای قرارگیری و نصب رطوبت‌سنج‌ها نزدیک به وسایل الکترونیکی است، زیرا هدف اصلی این پروژه محافظت از این وسایل است.

برای اطمینان از اینکه چگالش حتی زمانی‌که رطوبت نسبی فضای کیسه محافظ ٪۳۵ است روی سطوح اتفاق نمی‌افتد، مسئول پروژه از یک سامانه کنترلی دیگر نیز استفاده می‌کند. در این شرایط می‌توان یک حسگر دمای نقطه شبنم بر روی قطعات الکترونیکی حساس نصب کرد. این حسگر به جای رطوبت هوا، رطوبت روی سطوح قطعات را اندازه‌گیری می‌کند. در صورت احتمال چگالش، سامانه را برای رطوبت‌گیری از تانک‌ها روشن می‌کند.

۷-۲-۶ ملاحظات دیگر

- توزیع هوا

با توجه به اینکه هدف پروژه نگهداری وسایل موجود در محفظه داخلی تانک‌ها است، بنابراین مناسب‌تر است که هوای خشک را به جای کیسه‌ها به نحوی به درون تانک‌ها برد. با استفاده از یک لوله انعطاف‌پذیر می‌توان هوای خشک را از قسمت پایین تانک‌ها وارد کرد و در این صورت هوای مرطوب داخل تانک‌ها وارد کیسه محافظ می‌شود. سپس هوا برای رطوبت‌گیری به دستگاه رطوبت‌گیر فرستاده می‌شود.

- ایمنی تانک

چون فضای رطوبت‌گیری بسته است، سامانه رطوبت‌گیری اغلب خاموش خواهد

بود. اگر سامانه به طور متناوب روشن و خاموش شود، حاکی از این خواهد بود که در قسمتی نشت رخ می‌دهد. در این صورت باید تجهیزاتی نصب شود که در صورت کار کردن مداوم سامانه پرسنل نگهداری و تعمیرات را آگاه کند.

۷-۲-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک انبار تجهیزات نظامی

[1] Determination of the most efficient method for long-term storage of combat vehicle. 1986. HQ 21st Support Command/OACSRM/OACSLOG APO 09325 U.S. Army.

[2] Harriman, Lewis G. III 1985. Prevention of metallic corrosion in storage areas. Proceedings of the 1985 international symposium on moisture and humidity April 15-25 1985. Instrument Society of America. 67 Alexander Drive Research Triangle Park NC 27709

[3] Harriman, Lewis G. III, Brundrett, G., Kittler, R., 2001. Humidity Control Design Guide. ASHRAE, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329 USA ISBN: 1-883413-98-2.

[4] Repairs and utilities: controlled humidity storage. 1958 U.S. Army Technical Bulletin 256, Department of the Army, Washington, DC

[5] Vernon, W.H.J. First experimental report to the atmospheric research committee (of the British non-ferrous metal research association). 1924. Transactions of the Faraday Society, Number 19, 1923-24. pp 839-934.

[6] Vernon, W.H.J. Second experimental report to the atmospheric research committee (of the British non-ferrous metal research association). 1927. Transactions of the Faraday Society, Number 23, 1927, pp 113-207.

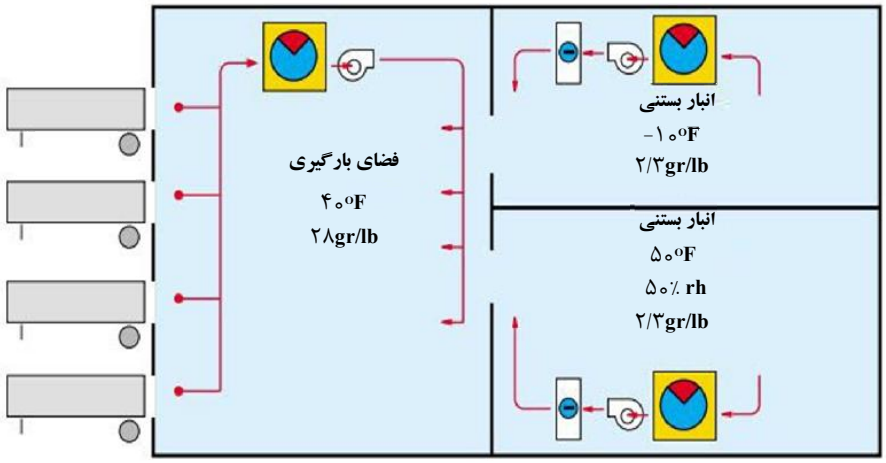
۳-۷ انبارهای فعال- مثال سردخانه

انبارهای فعال از این جهت با انبارهای غیر فعال تفاوت دارند که بار حرارتی و رطوبی متناوب آن‌ها بسیار زیاد است. اما همانند انبارهای غیر فعال به دقت زیادی نیاز ندارند و بازه دمایی در این کاربردها نسبتا کم است و یا با استفاده از سامانه‌های سرمایش و گرمایش تنظیم می‌شوند.

با توجه به اینکه بارهای رطوبی این انبارها کاملا متفاوت با بارهای رطوبی انبارهای غیر فعال است، طراحی سامانه نیز متفاوت خواهد بود. در اینجا دغدغه اصلی طراح کمینه کردن بارهای رطوبی بدون تداخل در عملکرد اصلی دستگاه است. برای مثال انبار بستنی و شیرینی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۳-۷ گام اول – تعیین هدف پروژه

هدف پروژه دفع رطوبت و جلوگیری از یخزدگی دیوارها، کف، سقف و تجهیزات است. این موضوع مسأله ایمنی است. مشکل عمده کارگرانی که در فضاهای بسیار سرد کار می‌کنند، سر خوردن و افتادن به دلیل یخزدگی سطوح در فضاهای سرد است. مدیر کل تصمیم دارد تا با نصب رطوبت‌گیرهای دسیکنت از یخزدگی که هزینه‌های زیادی را در پی دارد، جلوگیری کند.



شکل ۷-۹

انبارهای سرد یکی از مثال‌های معمول برای انبارهای دینامیک است. بار رطوبی فضا ناشی از باز و بسته شدن درب‌ها برای ورود و خروج محصولات است. مدیر عملیات و طراح می‌توانند هزینه سامانه را با کاهش مدت زمان باز بودن درب خروجی با نصب سامانه‌های کنترلی بر روی درب‌ها کمینه کنند. این عمل، اندازه رطوبت‌گیر مورد نیاز برای گرفتن بار رطوبی را به طور چشمگیر کاهش می‌دهد.

۲-۳-۷ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن

مدیر انبار نظری برای دمای کنترلی ندارد و در این زمینه تصمیمی گرفته نشده است. تولیدکننده که انبار را اجاره کرده‌اند، دمای انبار بستنی را $-10^{o}F$ و دمای انبار شیرینی را $50^{o}F$ تعیین می‌کنند. اما در مورد کنترل رطوبت به فکر بیشتری نیاز است. چه شرایطی به رسیدن به هدف پروژه کمک کننده است؟ اینکه چگالشی رخ ندهد و کارتن‌ها رطوبت جذب نکنند؟

مادامی که دمای نقطه شبنم هوا کمتر از دمای سطوح داخلی دیوارها، سقف و سطوح تجهیزات است، چگالش و برفک اتفاق نمی‌افتد. مدیر با استفاده از یک دماسنج مادون‌قرمز ارزان‌قیمت دمای هر یک از سطوح را به صورت زیر اندازه‌گیری می‌کند:

انبار بستنی

نوارهای نقاله ..... ۰°F

دیوارها ..... -۸°F

کف ..... -۸°F

کویل اواپراتور ..... -۲۰°F

انبار شیرینی

دیوارها ..... ۵۲°F

کف ..... ۵۲°F

کویل اواپراتور ..... ۴۰°F

فضای بارگیری

دیوارها ..... ۶۲°F

کف..... ۳۵°F

نوارهای نقاله به انبار بستنی..... ۰°F

شکل ۷-۱۰

پایین‌ترین دمای نقطه شبنم انبار -۲۰°F است که مربوط به دمای کویل اواپراتور انبار بستنی می‌شود. با توجه به اینکه سامانه سرمایش به سامانه برفک‌زدایی اتوماتیک مجهز است و برفک‌زدایی از لوله‌ها انرژی مصرف می‌کند، این عمل تداخلی در فعالیت انبارها ایجاد نمی‌کند. دغدغه اصلی در مورد یخ‌زدگی کف انبار و نوارهای نقاله محصولات است که مشکلات زیادی در پی دارد، زیرا باید به صورت دستی رفع شوند.

مدیر تصمیم می‌گیرد که سطح کنترل دمای نقطه شبنم فضای نگهداری بستنی در -۱۰°F تنظیم شود. با این کار از یخ‌زدگی نوار نقاله جلوگیری می‌شود، اما همچنان مقداری یخ بر روی کویل اواپراتور تشکیل می‌شود. این تصمیم‌گیری جنبه اقتصادی دارد، زیرا رطوبت‌گیری تا -۱۰°F نسبت به -۲۰°F هزینه کمتری دارد و نرخ تولید یخ در دمای نقطه شبنم -۱۰°F بسیار کمتر از شرایط رطوبی غیر کنترلی است. همچنین مدیر بیان می‌کند که می‌توان سامانه را طوری طراحی کرد که خشک‌ترین هوا در معرض سردترین سطوح قرار گیرد. چون دمای نقطه شبنم انبار -۱۰°F است، هوای خروجی از رطوبت‌گیر به اواپراتور، کف انبار و نوارهای نقاله خیلی کمتر می‌شود و باعث کاهش برفک می‌گردد.

در انبار شیرینی جذب رطوبت متناسب با رطوبت نسبی هوای اطراف کارتن‌ها صورت می‌گیرد. سازندگان کارتن‌ها تایید می‌کنند که اگر کارتن‌ها در شرایط رطوبت نسبی ٪۵۰ نگهداری شوند، تا ٪۸۰ مقاومت طراحی خود را حفظ می‌کنند. تولیدکنندگان شیرینی نیز شرایط رطوبت نسبی حداکثر ٪۵۰ را برای حفظ تازگی شیرینی‌ها مناسب می‌دانند (به مراجع رجوع شود). بنابراین رطوبت نسبی ٪۵۰ در انبار شیرینی تنظیم می‌شود. رطوبت نسبی پایین‌تر ممکن است بهتر باشد، اما هزینه تجهیزات رطوبت‌گیری و هزینه بهره‌برداری آن نیز افزایش می‌یابد.

دمای نقطه شبنم در دمای حباب خشک ۵۰°F و رطوبت نسبی ٪۵۰ برابر با ۳۳°F است. این دما از دمای کویل اواپراتور و کف انبار شیرینی کمتر است و در نتیجه در این سطح کنترلی چگالشی رخ نمی‌دهد. سطح کنترلی رطوبت تعیین شده سه مزیت دارد: کارتن‌ها نرم نمی‌شوند، چگالش روی سطوح اتفاق نمی‌افتد و به دلیل کاهش برفک کویل اواپراتور بازده سامانه تبرید افزایش می‌یابد.

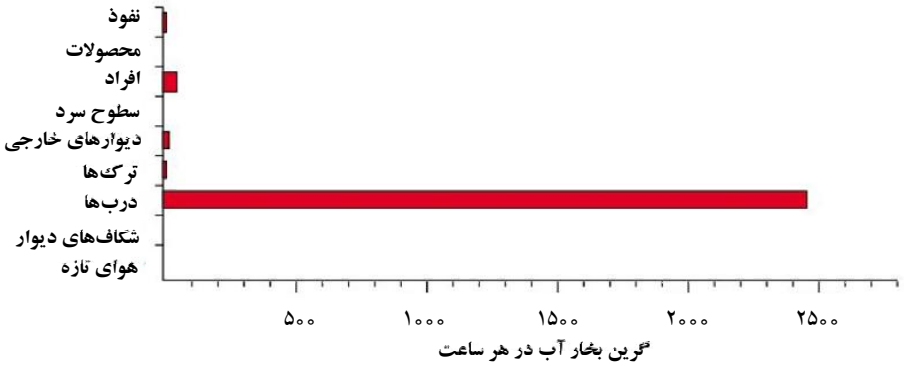
مدیر تصمیم می‌گیرد که دمای نقطه شبنم در فضای بارگیری نیز ۳۳°F تنظیم شود. دلیل آن مشابه دلیل فضای بستنی است، زیرا کنترل کل فضای بارگیری در دمای نقطه شبنم ۰°F برای جلوگیری از چگالش هزینه زیادی در پی دارد. از طرفی دمای نقطه شبنم ۳۳°F مشکلات عمده سطوح خیس را برطرف می‌کند و می‌توان سامانه توزیع هوا را طوری طراحی کرد که هوای خشک‌تر در معرض نوارهای نقاله محصولات و سطوح خیس قرار گیرد. با این کار می‌توان با هزینه کمتری نسبت به هزینه کنترل کل فضا در دمای نقطه شبنم پایین، از یخ‌زدگی نوار نقاله جلوگیری کرد.

۷-۳-۳ گام سوم- محاسبه بارهای رطوبی و حرارتی

بارهای حرارتی به راحتی توسط سامانه‌های تبرید موجود گرفته می‌شوند. نکته مهم در مورد بارهای حرارتی این است که رطوبت‌گیرهای دسیکنت ضمن خشک‌کردن هوا گرمای نهان هوا را به گرمای محسوس تبدیل می‌کنند. از این رو پس از انتخاب سامانه رطوبت‌گیر و محاسبه عملکرد آن ظرفیت سامانه سردساز باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند بار محسوس را بگیرد.

طراح محاسبات بارهای رطوبی را با محاسبه بارهای محل بارگیری شروع می‌کند. بیشترین بارهای رطوبی مربوط به محل بارگیری است، زیرا این فضا بیشترین ارتباط را با هوای بیرون دارد. بارهای زیاد را باید با دقت بیشتری بررسی کرد، زیرا هزینه زیادی در پی خواهند داشت.

محاسبات اولیه بارهای رطوبی این نکته را نشان می‌دهد. بار رطوبی ورودی بسیار زیاد (۲۹۷lbs در ساعت) است. برای گرفتن این مقدار بار رطوبی از فضایی که در ۲۸gr/lb کنترل می‌شود، به ۲۰۰۰۰cfm هوای خشک نیاز است که به معنای نیاز به یک رطوبت‌گیر نسبتا بزرگ خواهد بود.



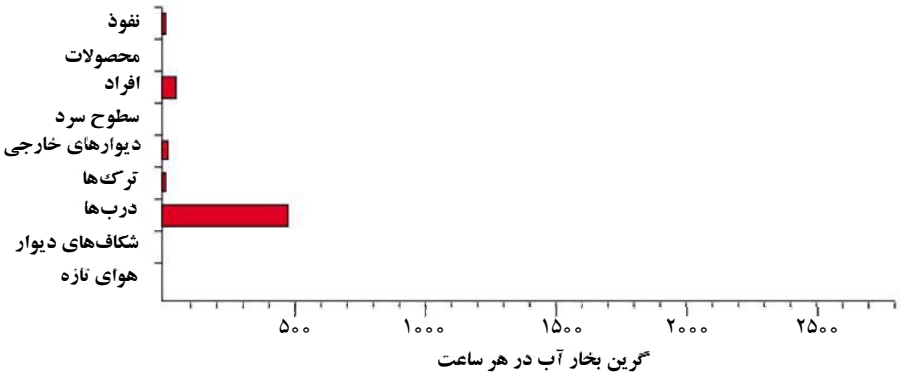
شکل ۷-۱۱

در یک انبار فعال بیشترین بار رطوبی مربوط به باز بودن درب‌ها است. کاهش این بار رطوبی موجب صرفه‌جویی در هزینه نصب و هزینه بهره‌برداری سامانه می‌گردد.

اکنون برای مدیر دو انتخاب وجود دارد؛ یا باید سطح کنترلی را افزایش دهد و یا بارهای رطوبی را کمتر کند. افزایش سطح کنترل رطوبت موجب دور شدن از هدف پروژه می‌شود.

همچنین اگر دمای نقطه شبنم از دمای سطوح و دیوارها بیشتر شود، چگالش اتفاق می‌افتد و مشکلات زیادی ایجاد خواهد شد. مدیر و طراح دوباره بارهای رطوبی را بررسی می‌کنند.

بهترین نقطه برای شروع مربوط به بیشترین بار رطوبی می‌شود که ناشی از ورودی انبار است. مدیر اطلاع دارد که در هر ساعت ۱۵ کامیون به انبار وارد و از آن خارج می‌شوند، در حالی که درب‌ها هیچ پوششی ندارند. همچنین مدیر می‌داند که کارگرها پس از ورود و خروج کامیون‌ها به سرعت درب‌ها را نمی‌بندند. محاسبات اولیه طراح با این فرض به دست آمده است که در هر نوبت بارگیری، درب‌ها به مدت سه دقیقه (دو دقیقه پس از خروج کامیون‌ها و یک دقیقه وقتی که وارد می‌شوند) باز باشند. اگر این زمان به یک دقیقه کاهش یابد، بار رطوبی بسیار کمتر خواهد شد؛ بار رطوبی ورودی از ۲۹۷lbs در ساعت به ۴۴lbs کاهش می‌یابد.



شکل ۷-۱۲

این شکل نشان‌دهنده تاثیر کاهش به یک دقیقه در زمان باز بودن درب خروجی است که حاکی از کاهش ۲۵ درصدی میزان رطوبت است.

افزون بر این، بار رطوبی ناشی از دیوارها، کف و سقف اتاق بسیار ناچیز است. میزان این بار رطوبی در مقایسه با تاثیر کنترل درب‌ها قابل چشمپوشی است.

در این حالت حجم هوای خشک مورد نیاز برای رطوبت‌گیری نیز از ۲۰۰۰۰cfm به ۳۰۰۰cfm کاهش می‌یابد که به معنای کاهش بسیار زیاد هزینه سامانه می‌باشد. البته برای این کاهش هزینه و عملکرد صحیح سامانه در این حالت، درب‌ها و مدت زمان باز بودن آن‌ها را باید به طور مرتب بررسی کرد. مدیر بر این باور است که این کار بسیار مقرون به صرفه است و با هزینه بسیار کمتر از مشکلات ناشی از یخ‌زدگی سطوح جلوگیری می‌شود.

موارد دیگری که در محاسبات بارهای رطوبی فضای بارگیری قابل ذکر است، بار عبور[1] و بار هوای تازه است. بار عبور بسیار کم (۴۰۰۰ گرین در ساعت یا کمتر از یک پوند) است. این مقدار، خطا یا اشتباه نیست. برخی طراحان به دنبال مقدار دقیق نرخ عبور بخار از مواد مختلف هستند. این کار اشتباه نیست، اما نتیجه شایانی نیز ندارد. برای مثال در این مورد ضریب نفوذپذیری بلوک بتونی با ضخامت "۸ برابر با ۰٫۳۸ گرین در ساعت در هر اینچ مربع فشار بخار دو طرف دیوار است. اگر دیوار رنگ نشده باشد، این مقدار برابر با ۲٫۴ (شش برابر) می‌شود. در این حالت بار رطوبی نیز از ۴۰۰۰ به ۱۶۰۰۰گرین در ساعت افزایش می‌یابد، اما همچنان کمتر از ٪۵ کل هوای رطوبی ورودی است. فرضیات در مورد درب‌های ورودی و نفوذ هوا اهمیت بسیار بیشتری نسبت به تعیین دقیق ضریب نفوذپذیری برابر با ۰٫۲۷ یا ۰٫۳۶ دارد.

فرضیات مربوط به بار هوای تازه اهمیت بسیار بیشتری دارد، زیرا هوای تازه مقدار رطوبت زیادی به همراه دارد. در این مثال با توجه به مقررات محلی نیازی به تهویه هوای فضا نیست، اما در

[1] Transmission load

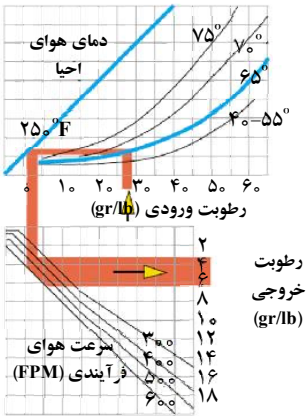
صورت نیاز به تهویه هوا رطوبت‌گیر با ظرفیت بیشتری نیاز خواهد بود، زیرا هوای بیرون مرطوب‌تر از هوا با دمای نقطه شبنم ۳۳°F است.

برای تعیین مقدار دقیق سطح کنترل رطوبت، این فرضیات محافظه‌کارانه نیست. اگر بیرون باد بوزد، هوای مرطوب بیشتری وارد فضا می‌شود (۱۵mph باد با سرعت ۱۳۲۰fpm حرکت می‌کند: ۱۳۲۰fpm=۶۰min/hr÷ ۷۰۲۰۰fph=۱۵mph×۵۲۸۰ft/mi.). اما مدیر و طراح عقیده دارند که این موارد زیاد بحرانی نیستند، زیرا هدف در اینجا کاهش مشکلات ناشی از یخ‌زدگی است، نه تضمین اینکه یخ‌زدگی هیچ‌گاه اتفاق نمی‌افتد. با این تصمیم هزینه سامانه بسیار کمتر می‌شود، اما ممکن است در شرایط خیلی مرطوب و روزهای بادی مشکل یخ‌زدگی سطوح و تجهیزات اتفاق بیفتد. البته ممکن است یک مدیر و یک طراح دیگر با دقت بیشتر و محافظه‌کارانه‌تر عمل کنند و از هوای تهویه از پیش خشک شده برای افزایش فشار داخلی ساختمان و یا تجهیزات دقیق‌تری استفاده کنند.

۷-۳-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار رطوبی

در اینجا طراح باید تصمیم‌گیری کند که بار رطوبی با استفاده از چند دستگاه گرفته شود؟ استفاده از یک دستگاه بزرگ هزینه اولیه کمتری خواهد داشت، اما با استفاده از دو دستگاه کوچک‌تر، با توجه به اینکه یکی از آن‌ها در شرایط بار رطوبی کم می‌تواند خاموش شود، انرژی کمتری مصرف می‌شود. با توجه به اینکه بودجه ساخت محدود است، مدیر با قبول احتمال بیشتر بودن هزینه بهره‌برداری، برای هزینه اولیه کمتر تصمیم می‌گیرد که یک دستگاه بزرگ استفاده شود.

بنابراین برای فضای بارگیری از یک سامانه رطوبت‌گیری استفاده می‌شود که در یک انتهای فضا بر روی سقف قرار داده شده است. این سامانه هوا را از بالای درب ورودی گرفته، خشک کرده و در فضاهای مورد نظر توزیع می‌کند. آرایش این سامانه به گونه‌ای است که هوای مرطوب را از سامانه‌های تبرید دور کرده و به سمت کانال‌های برگشتی به رطوبت‌گیر می‌فرستد. سوالی که در اینجا مطرح است این است که چه مقدار هوا برای این میزان رطوبت‌گیری مورد نیاز است؟



شکل ۷-۱۳

حجم هوای مورد نیاز برای گرفتن بار رطوبی فضای بارگیری به میزان خشک بودن هوا بستگی دارد؛ هر چه هوا خشک‌تر باشد، برای گرفتن بار رطوبی به مقدار کمتری هوا نیاز است.

با توجه به نمودارهای موجود در پیوست مشخص است که در این شرایط هوا می‌تواند از ۲۸gr/lb تا ۴٫۸gr/lb خشک شود. به طور کلی مقدار هوای مورد نیاز برای دفع ۴۴lbs (۳۰۸۰۰۰gr) رطوبت از فضایی که در ۲۸gr/lb رطوبت نگه داشته شده است، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$cfm = \frac{۳۱۵۰۰۰}{۰/۰۷۵ * ۶۰ * (۲۷ - ۷)} = ۲۹۵۰ \qquad ۷-۱$$

که

۳۱۵۰۰۰: بار رطوبی (gr/hr)

۶۰: تبدیل ساعت به دقیقه

(۷-۲۷): اختلاف رطوبت هوای خروجی از رطوبت‌گیر و رطوبت فضای بارگیری (gr/lb)

۰/۰۷۵: چگالی هوا $(\frac{lb}{ft^3})$

با توجه به نمودارهای عملکرد موجود در پیوست، هوای ورودی به دسیکنت با دمای 40^oF و رطوبت ۲۸gr/lb رطوبت‌گیر را با توجه به دمای هوای احیا و سرعت هوای فرآیندی در بستر دسیکنت، با میزان رطوبت بین ۳٫۵ تا ۶٫۵gr/lb ترک می‌کند. با انتخاب یک رطوبت‌گیر با هوای احیا 25^oF و مساحت ورودی ۷/۵ sq.ft.، ۲۹۵۰cfm جریان هوا با سرعت ۳۹۳fpm (۲۹۵۰÷۷/۵=۳۹۳) از چرخ دسیکنت عبور می‌کند. شرایط واقعی خروجی در ۳۹۳fpm برابر ۴٫۶gr/lb است که به اندازه کافی برای دفع بار رطوبی در فضا بارگیری مناسب خواهد بود.

$$\text{میزان رطوبت‌گیری} = ۰/۰۷۵ * ۶۰ * \left(۲۸ - ۴/۶\right) * ۲۹۵۰ = ۳۱۰۶۳۵gr/hr \quad ۲-۷$$

که

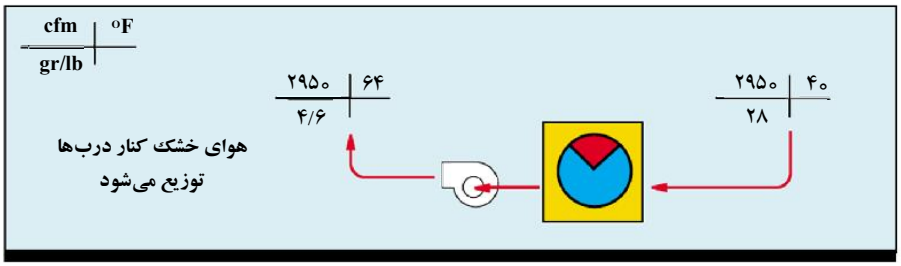
۰/۰۷۵: چگالی هوا $(\frac{lb}{ft^3})$

۶۰: تبدیل ساعت به دقیقه

(۴/۶–۲۸): اختلاف رطوبت هوای خروجی از رطوبت‌گیر و میزان رطوبت هوای فضای بارگیری (gr/lb)

۲۹۵۰: جریان هوا (cfm)

اجزا سامانه بسیار ساده هستند که شامل یک رطوبت‌گیر دسیکنت است که هوای فضای بارگیری را گرفته، خشک کرده و آن را به فضاهای مورد نظر توزیع می‌کند.



شکل ۷-۱۴

رطوبت‌گیر هوا را از بالای درب‌های فضای بارگیری می‌گیرد، آن را رطوبت گیری می‌کند و سپس نزدیک درب‌های فضاهای کنترلی توزیع می‌کند. این دقیقا همان جایی که سطوح کمترین دما را دارند و هوای خشک با جلوگیری از یخ زدگی آن‌ها، به بهترین شکل بکار برده می‌شود.

مثال طوری چیده شده است که مسأله ساده‌تر شود. اما در شرایط واقعی همواره اینگونه نیست. اگر رطوبت‌گیر با مقطع ۷٫۵sq.ft. بتواند هوا را تا ۸ گرین رطوبت‌گیری کند، طراح یکی از شرایط زیر را باید در نظر بگیرد:

- استفاده از یک رطوبت‌گیر بزرگ‌تر:

  استفاده از یک رطوبت‌گیر بزرگ‌تر به معنای هزینه اولیه بسیار بیشتر برای خرید، نصب و راه‌اندازی دستگاه است که در اینجا مد نظر نیست.

- استفاده از رطوبت‌گیر ۷٫۵ sq.ft. انتخاب شده:

  همواره رطوبت‌گیرها برای شرایط اوج بار–که فقط ۰٫۴٪ از کل سال، کمتر از ۳۵ ساعت از ۸۷۶۰ ساعت، اتفاق می‌افتد–طراحی می‌شوند. ممکن است طراح بخواهد رطوبت‌گیر را برای شرایط معمول تابستان (۸۵gr/lb و 80^oF)، نه شرایط اوج بار رطوبی، طراحی و انتخاب کند که در این صورت رطوبت‌گیر در

شرایط اوج بار بهترین عملکرد خود را نخواهد داشت. اما ممکن است مدیر کنونی یا مدیر بعدی از این تصمیم طراح خشنود نشود که سامانه در شرایط اوج بار عملکرد مناسبی نداشته باشد.

- کاهش بار رطوبی داخلی:

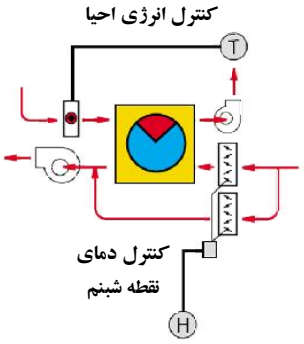
مدت باز بودن درب‌ها به میزان یک دقیقه زیاد است. شاید همچنان بتوان با کاهش زمان باز بودن درب‌ها بار رطوبی به فضای مورد نظر را کاهش داد.

۷-۳-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی

سامانه کنترلی باید دو مورد مهم را کنترل کند. هم اینکه اجزای سامانه را برای کمترین میزان هزینه ممکن تنظیم کند و هم رطوبت سطوح را دفع کند و مانع یخ‌زدگی آن‌ها شود.

سامانه کنترلی می‌تواند یک سامانه روشن–خاموش باشد، زیرا نیازی به کنترل دقیق مقادیر رطوبت نیست. در واقع هر چه فضای بارگیری خشک‌تر باشد بهتر است، زیرا رطوبتی که با استفاده از رطوبت‌گیر در فضای بارگیری گرفته نشود، باید به وسیله کویل‌های سرمایش و رطوبت‌گیر فضاهای بستنی و شیرینی گرفته شود. بنابراین حتی مناسب‌تر است که رطوبت‌گیر فضای بارگیری به طور مداوم روشن باشد که برای عملکرد کل سامانه بهتر خواهد بود.

دمای نقطه شبنم بعضی از ماه‌های سال از دمای در نظر گرفته شده در طراحی کمتر است و کار کردن دستگاه در این شرایط فقط موجب تلف شدن انرژی و افزایش هزینه می‌شود. سه انتخاب برای سامانه کنترلی وجود دارد؛ کنترل رطوبت نسبی، کنترل دمای نقطه شبنم و یا کنترل چگالش بر روی سطوح. یک کنترل‌کننده رطوبت نسبی که در رطوبت نسبی ٪۸۰ تنظیم شده است، هنگامی‌که رطوبت هوا بیشتر از ۲۸gr/lb و دمای هوا ۴۰°F باشد، رطوبت‌گیر را روشن می‌کند. این کنترل‌کننده وسیله‌ای ارزان و کاملا مناسب برای این پروژه خواهد بود. دقت آن تقریبا ٪۲± است و اگر دمای هوا غیر از ۶۰°F نیز باشد[۱]، تغییر زیادی در میزان رطوبت کنترلی ایجاد نمی‌کند.



شکل ۷-۱۵

حسگر دمای نقطه شبنم باید جایی نصب شود که چرخش هوا به خوبی انجام می‌شود. نصب آن بر دیوار پشتی فضای بارگیری مناسب خواهد بود، مگر آنکه محموله‌ها را جلوی حسگر بر روی هم قرار داده باشند.

تقریبا در همه موارد، نصب یک کنترل‌کننده انرژی احیا از هدر رفتن مقدار زیادی انرژی در شرایط نیمه-بار جلوگیری می‌کند.

استفاده از یک حسگر چگالش و نصب آن بر روی سطوح ایده‌آل خواهد بود؛ زیرا در این صورت در حالتی که چگالشی روی سطوح اتفاق نیفتد، رطوبت‌گیر روشن نخواهد شد. اما از لحاظ کاربردی و عملی نمی‌توان آن را روی سطوحی که افراد رفت‌وآمد دارند نصب کرد، زیرا این وسیله بسیار شکننده است و به سادگی از سطح جدا شده و خرد می‌شوند.

طراح تصمیم می‌گیرد که از یک حسگر دمای نقطه شبنم استفاده کند و آن را در ۳۳°F تنظیم می‌کند. این حسگر از یک رطوبت‌سنج دقیق‌تر است و برخلاف حسگر چگالش نیازی به نصب روی سطوح ندارد و در یک ارتفاع و به دور از مکان‌های شلوغ قابل نصب است.

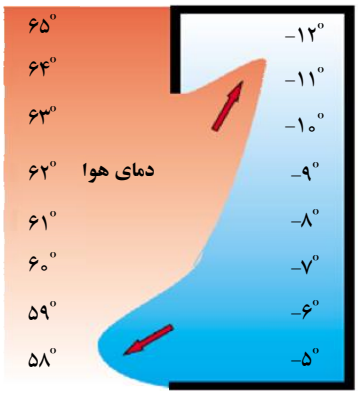
با توجه به اینکه بار رطوبی در طول سال تغییر می‌کند، طراح یک کنترل‌کننده انرژی احیا نیز لحاظ می‌کند. این یک کنترل‌کننده دماست که دمای خروجی احیا را کنترل کرده و سپس ظرفیت هیتر را با توجه به آن دما تنظیم می‌کند تا هوای اضافی برای احیا وارد نشود. دمای احیا

[۱] مترجم: این مقدار دما باید ۴۰°F باشد که به احتمال زیاد اشتباه تایپی است.

برای انواع رطوبت‌گیرها متفاوت است. در این مثال دمای هوای احیای خروجی باید حداقل ۱۲۰°F باشد تا اطمینان حاصل شود که چرخ دسیکنت به طور کامل خشک می‌شود.

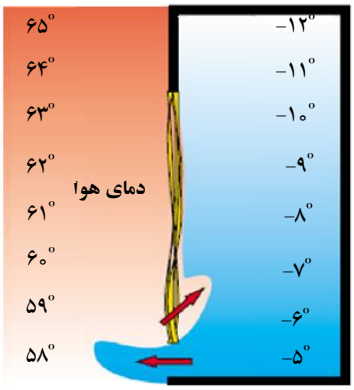
۷-۳-۶ ملاحظات دیگر

- در همه موارد هوای خروجی از رطوبت‌گیر باید در قسمت‌هایی که به رطوبت‌گیری بیشتری نیاز است، توزیع شود. در فضای بارگیری هوای خروجی رطوبت‌گیر باید نزدیک درب‌های انبارها توزیع شود. با توزیع هوای خشک نزدیک درب‌ها بار رطوبی رطوبت‌گیرهای انبارها کمتر می‌شود، زیرا بیشترین بار رطوبی از درب‌های بازشو می‌آید.
- در بیشتر انبارها به دلیل رفت و آمد زیاد هیچ درب متعارفی بین فضای بارگیری و انبارها در نظر گرفته نمی‌شود. در این حالت می‌توان برای کاهش بار رطوبی بسیار زیادی که در فضای کنترلی ایجاد خواهد شد، از یک پوشش پلاستیکی به منظور کاهش نفوذ هوا استفاده کرد. استفاده از این پوشش‌ها برای ورودی‌های بلند و جاهایی که اختلاف دما زیاد است، ضروری خواهد بود. اختلاف دما موجب اختلاف چگالی هوا می‌شود. هوای سرد سنگین‌تر بوده و از قسمت پایین راهرو از فضا خارج می‌شود که موجب کاهش فشار و در نتیجه ورود هوای گرم و مرطوب بیرون به داخل فضا می‌شود. با پوشاندن راهرو به کمک پوشش‌های پلاستیکی می‌توان نفوذ هوا را با کاهش اثر مکش محلی هوا کاهش داد.



شکل ۷-۱۶

از ورودی‌های بلند و باریک که دو ناحیه با دماهای مختلف را از هم جدا می‌کنند، مقدار زیادی رطوبت به دلیل اختلاف چگالی نشت می‌کند. بکارگیری پوشش‌های پلاستیکی نشت هوا را از بین نمی‌برد، اما این پوشش‌ها با تغییر شکل ورودی نشت هوا را بسیار کاهش می‌دهند. این پوشش‌ها اختلاف فشار یک قسمت را کاهش می‌دهند.



شکل ۷-۱۷

۷-۳-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک انبار تجهیزات

[1] Babbitt, J.D. The diffusion of water vapor through a slit in an impermeable membrane. Canadian Journal of Research, Vol.19. 1941 pp 42-55.

[2] Davis, W.J., Moisture flowing up a moving air stream 1972. Report on Special Project for engineering course EGR-192, University of Alabama, Birmingham, AL 35201 (Dr. Martin Crawford, Faculty Advisor)

[3] ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Applications 1987, Chapter 28 — Industrial Air Conditioning (Table 2 — Regain of Materials)

[4] ASHRAE Handbook of Refrigeration 1986
Chapter 22 — Candies, nuts, dried fruits & vegetables (Table 1 – Optimum design air conditions, and Table 2 - Expected storage life for candy)
Chapter 25 — Refrigerated Warehouse Design
Chapter 26 — Commodity storage requirements (Table 2 – Storage requirements of perishable products)

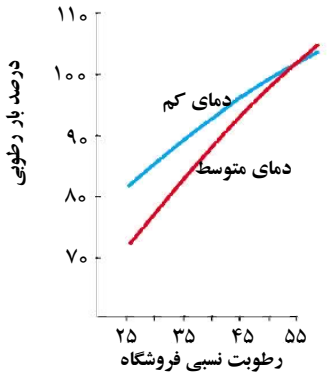
[5] American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329

[6] Latent loads in low humidity rooms. Final report of ASHRAE research project RP-252. Presented to ASHRAE Technical Committee 9.2 – January 1982. (Including notes on the final report by Wm. Griffiths – Midland-Ross Corporation)

American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329

۷-۴ سامانه‌های HVAC تجاری- مثال سوپرمارکت

ساختمان‌های سازمانی و تجاری همچون سوپرمارکت‌ها، هتل‌ها، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و بیمارستان‌ها اغلب برای ایجاد شرایط آسایش از رطوبت‌گیرهای دسیکنت استفاده می‌کنند. رطوبت‌گیرها امکان طراحی سامانه‌های HVAC را فراهم می‌کنند که قابلیت گرفتن بارهای محسوس و نهان را به طور مجزا دارند. کنترل رطوبی مجزا برای زمانی‌که نسبت گرمای محسوس (SHR) کم است، یعنی زمانی‌که بارهای رطوبی بخش عمده بارهای حرارتی را تشکیل می‌دهند، بسیار مفید خواهد بود. در مواردی که ماکزیمم بار رطوبتی و حرارتی در یک زمان اتفاق نمی‌افتد، استفاده از رطوبت‌گیرهای مجزا به صرفه‌تر است. هر دو مورد بالا در شرایطی که سطح کنترل رطوبت پایین است و یا مقدار هوای تهویه ساختمان زیاد است، کاربرد خواهند داشت. به عنوان مثال یک سوپرمارکت به مساحت ۵۰۰۰۰ فوت مربع بررسی شده است.



شکل ۷-۱۸

با اضافه شدن سامانه‌های رطوبت‌گیری دسیکنت به سامانه‌های HVAC تجاری و سازمانی، عملکرد این سامانه‌ها بسیار بهبود می‌یابد. سامانه دسیکنت رطوبت هوا را دفع می‌کند و در نتیجه سامانه تبرید کارآمدتر می‌شود. در یک سوپرمارکت کاهش رطوبت موجب کاهش بار سامانه‌های تبرید می‌شود و در هزینه انرژی صرفه‌جویی می‌شود.

۷-۴-۱ گام اول – تعیین هدف پروژه

هدف پروژه کاهش هزینه‌های اقتصادی برای سرمایش و ایجاد شرایط آسایش فضا با کم کردن میزان رطوبت نسبی فروشگاه است. سامانه HVAC سوپرمارکت‌ها اغلب ظرفیت گرمای محسوس زیادی دارند، زیرا در سوپرمارکت‌ها اغلب به دلیل هوای سرد ناشی از یخچال‌های ویترینی نسبت گرمای محسوس کم است (کمتر از ٪۷۰). در نتیجه پایین نگه داشتن دمای نقطه شبنم فضا به صرفه خواهد بود.

۷-۴-۲ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن

از آنجایی که هدف سامانه رطوبت‌گیری دفع هرچه بیشتر رطوبت از سامانه سرمایشی است، سطح کنترل رطوبت باید تا آنجا که امکان دارد، پایین در نظر گرفته شود. رطوبت‌گیرهای دسیکنت می‌توانند رطوبت را به میزان مورد نیاز پایین نگه دارند. اغلب فضاهای صنعتی در رطوبت نسبی کمتر از ٪۱ نگهداری می‌شوند. در مورد سوپرمارکت‌ها تنظیم رطوبت نسبی بین ٪۳۵ تا ٪۴۰ تعادل بهینه بین هزینه اولیه تجهیزات و هزینه بهره‌برداری را فراهم می‌آورد (به مراجع رجوع شود).

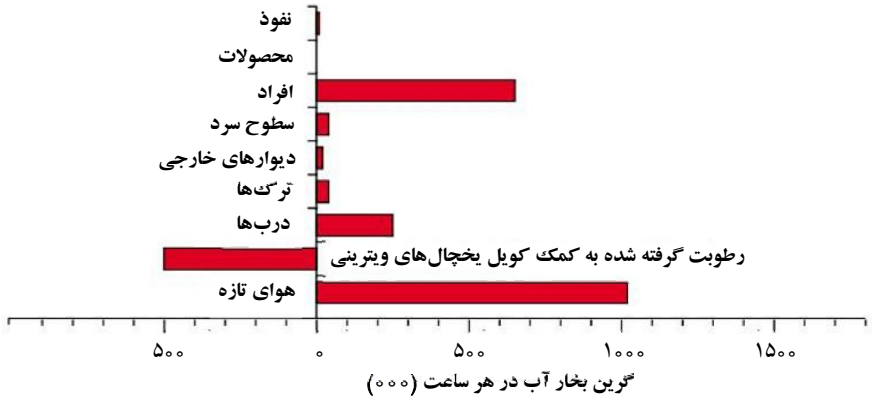
مهندس پروژه سطح کنترل دما را در $75^{o}F$ برای ایجاد شرایط آسایش مطلوب تنظیم می‌کند. البته در کاربردهای تهویه دما بین $70^{o}F$ تا $72^{o}F$ برای آسایش در نظر گرفته می‌شود، اما در سوپرمارکت‌ها چون مقداری هوای خنک نیز از یخچال‌های ویترینی در هوا پخش می‌شود، دمای $72^{o}F$ آسایش را به دنبال نخواهد داشت. میزان تلرانس برای دما و رطوبت را می‌توان ٪۳± تنظیم کرد و احتیاجی به کنترل دقیق‌تر نخواهد بود.

۷-۴-۳ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی

بارهای حرارتی اصلی ناشی از انتقال حرارت از دیوارها، روشنایی، پنجره‌ها، افراد و اجاق‌های قسمت‌های نان‌پزی و شیرینی‌پزی است. در واقع بارهای حرارتی و مقدار هوای مورد نیاز در قسمت‌هایی از فروشگاه که مواد غذایی فروخته می‌شود، بسیار بزرگ و بسیار متناوب است که در نتیجه مهندس پروژه برای آن قسمت‌ها از یک سامانه رطوبت‌گیری جداگانه استفاده شود. این کار

باعث می‌شود که بارهای متناوب از سامانه مرکزی برداشته شود و در این صورت عملکرد هر دو سامانه بهبود می‌یابد. در این مثال بار حرارتی بقیه فروشگاه برابر با ۷۵۰۰۰۰BTU/hr محاسبه شده است، اما یخچال‌های ویترینی تقریبا ۴۳۰۰۰۰BTU/hr بار حرارتی را حذف می‌کنند. در نتیجه بار حرارتی باقیمانده برابر با ۳۲۰۰۰۰BTU/hr است که باید به وسیله سامانه‌های تهویه گرفته شود.

همانند بار حرارتی محسوس بارهای رطوبی نیز با توجه به تاثیرات رطوبت‌گیری یخچال‌های ویترینی کمتر می‌شوند. هر چند رطوبت‌گیر دسیکنت فضا را در رطوبت نسبی ٪۴۰ نگه می‌دارد، اما یخچال‌های ویترینی همچنان موجب چگالش آب می‌شوند، زیرا دمای اواپراتور آن‌ها کمتر از دمای نقطه شبنم $40^{\circ}F$ است. یخچال‌های ویترینی در محاسبات بارهای رطوبی به حساب می‌آیند، زیرا آن‌ها به جای اضافه کردن بارهای رطوبی بخشی از آن را می‌گیرند. در نتیجه این بار رطوبی از بار رطوبی ورودی کم می‌شود و همانطور که در شکل زیر نیز نشان داده شده است، بار رطوبی کل به دست می‌آید.



شکل ۷-۱۹

حتی زمانی‌که رطوبت در ٪۴۰ کنترل می‌شود، یخچال‌های ویترینی همانند رطوبت‌گیر عمل می‌کنند. به همین دلیل این عمل رطوبت‌گیری باید در محاسبات بارهای رطوبی لحاظ گردد.

بیشترین مقدار بار رطوبی حاصل از بخار آب در هوای تازه است که به مقدار هوای تهویه مورد نیاز برای هر نفر و تعداد افراد حاضر در فضای مورد نظر بستگی دارد. مقررات محلی ساختمان می‌گوید نرخ هوای تازه برای تهویه باید ۷cfm برای هر نفر در نظر گرفته شود. برای ۵۰۰ نفر مشتری در فروشگاه، طراح هوای مورد نیاز را برابر با ۳۵۰۰cfm در نظر می‌گیرد. البته استاندارد ۱۹۸۹-۶۲ ASHREA (تهویه برای کیفیت هوای داخلی قابل قبول) این مقدار را برابر با ۱۵cfm برای هر نفر در سوپرمارکت ارائه کرده است. ممکن است یک طراح دیگر از این مقدار برای استاندارد بالاتر نسبت به مقررات محلی استفاده کند. باید توجه داشت که نرخ هوای تهویه کمتر هزینه کمتری خواهد داشت، اما کیفیت هوا نیز پایین‌تر خواهد بود.

با توجه به بزرگ بودن فضا محاسبه نشت هوا از اتصالات ساختمان پیچیده است و تعیین دقیق ابعاد درزهای پوشیده نشده در دیوارها در زمان ساخت و ساز غیر ممکن خواهد بود. با توجه به سابقه کار معمار، مهندس پروژه می‌داند که او سابقه بسیار خوبی دارد و درزگیری ساختمان بین مواد مختلف ساختمانی، نزدیک کانال‌کشی‌ها و درز درب‌ها بسیار خوب انجام شده است. بنابراین مهندس پروژه با استفاده از استاندارد ASHREA نرخ نفوذ هوا را تقریبا ۰٫۱cfm در هر فوت مربع در شرایط با باد با سرعت ۲۵mph در نظر می‌گیرد که در فصل ۲۳ کتاب راهنمای ASHREA چاپ سال ۱۹۸۹ توضیح داده شده است. البته پس از احداث ساختمان نیز می‌توان با استفاده از

تجهیزات دمنده که در فصل پنجم (محاسبه بارهای رطوبی) توضیح داده شد، نفوذ هوا از دیوارها را به دست آورد.

در بررسی بار رطوبی ورودی از درب‌ها دو سوال اساسی پیش می‌آید؛ مقدار و تعداد دفعات ورود بار رطوبی چقدر است؟ مهندس پروژه برای کاهش بار ناشی از درب‌های بازشو از یک مقدار اندکی هوای اضافی استفاده می‌کند تا به طور تئوری در هنگام باز شدن درب‌ها هوا به بیرون برود. در حقیقت باز بودن درب‌ها موجب ایجاد آشفتگی و اختلاف فشار اندکی می‌شود که در نتیجه هوای گرم و مرطوب بیرون از بالای درب وارد و هوای سرد و خشک فضا از پایین درب خارج می‌شود. مهندس برای محاسبه بارهای رطوبی ورودی از درب‌ها فرض می‌کند که تقریبا ٪۳۰ هوای موجود در راهرو بین درب‌ها پس از باز شدن درب وارد فضا می‌شود.

اینکه هر چند وقت یکبار درب‌ها باز می‌شوند نیز به تعداد مشتریان بستگی دارد. اگر مهندس بیشینه مقدار ممکن را در نظر بگیرد (تقریبا ۹۰۰ مشتری در هر ساعت)، در بیشتر زمان‌های سال، فضا بیشتر از حد مورد نیاز سرد و خشک می‌شود که موجب هدر رفتن انرژی و هزینه بیشتر می‌شود. راهکار مناسب این است که به جای مقدار بیشینه، متوسط تعداد مشتریان در طول یک هفته حساب شود که در این مورد ۱۵۰ مشتری یا به عبارتی ۳۰۰ بار باز و بسته شدن درب‌ها در هر ساعت است.

البته این موضوع توافقی است. در شرایط ماکزیمم بار رطوبی مشتریان، ممکن است برای مدت زمانی کوتاه رطوبت از ٪۴۰ یا ٪۴۵ بیشتر شود. در این صورت مشتریان احساس آسایش نخواهند کرد و مهندس عقیده دارد که بالاتر بودن از شرایط رطوبی کنترلی که مدت زمان کوتاهی در سال اتفاق می‌افتد، فقط هزینه بهره‌برداری سامانه تبرید را کمی افزایش می‌دهد.

سطوح مرطوب نیز به بار رطوبی فضا اضافه می‌کنند. در بخشی از فروشگاه انواع سبزی‌ها در صندوق‌هایی به مشتریان نمایش داده می‌شود که یک آب‌پاش اتوماتیک به طور مرتب رطوبت بر روی محصولات می‌پاشد. تولیدکننده سامانه آب‌پاش به اطلاع مهندس پروژه می‌رساند که سامانه با طول ۱۲۰ft که قرار است در فروشگاه نصب شود، در هر ساعت ۱۰lbs آب مصرف می‌کند.

مقدار مشخصی رطوبت نیز به همراه مواد بسته‌بندی محصولات وارد فضا می‌شود. بیشتر این میزان رطوبت در لایه‌های بیرونی کارتن‌های مقوایی بسته‌بندی محصولات جذب می‌شود و اغلب قبل از رطوبت‌گیری از فضا خارج می‌شوند. با توجه به تعداد کارتن‌هایی که در هر روز وارد فروشگاه می‌شود، مهندس تعیین می‌کند که این بار رطوبی بسیار کم است و می‌توان آن را ناچیز فرض کرد.

بعد از رطوبت هوای تازه رطوبت افراد بیشترین مقدار را دارد. خوشبختانه محاسبه این بار رطوبی در صورت مشخص بودن تعداد افراد بسیار ساده است. جدول ۳ فصل ۲۶ کتاب راهنمای ASHREA میزان بار رطوبی افراد در سوپرمارکت‌ها را تقریبا ۲۰۰BTU/hr تخمین زده است. برای تبدیل این مقدار به گرین بر ساعت باید آن را در ۶٫۶ ضرب کرد که در نتیجه برای هر نفر ۱۳۲۰gr/hr خواهد شد (گرمای نهان آب ۱۰۶۰BTU/lb است و ۷۰۰۰ گرین بخار در هر پوند آب وجود دارد، بنابراین ۱BTU = ۷۰۰۰÷۱۰۶۰ که برابر است با ۶/۶).

همانند بسیاری از موارد دیگر در اینجا نیز بار نفوذ از دیوارها، کف و سقف نسبت به بارهای رطوبی دیگر بسیار کم است. در این مثال این بار رطوبی برابر با ۱۰۰۰۰گرین در ساعت محاسبه شده است که از رطوبت ایجاد شده از هشت مشتری نیز کمتر خواهد بود. با محاسبه بارهای رطوبی اکنون طراح می‌تواند سامانه رطوبت‌گیر را طراحی کند.

۷-۴-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار های رطوبی و حرارتی

پس از دفع بارهای رطوبی حاصل از اجاق و شیرینی‌پزی به کمک یک سامانه مجزای دیگر، بار حرارتی باقیمانده در فروشگاه برابر ۳۲۰۰۰۰BTU/hr و بار رطوبی داخلی ۷۷lbs در هر ساعت (۸۱۶۲۰BTU/hr) به دست می‌آید.

در کاربردهایی که نیاز به کنترل پایین رطوبت نیست، طراح می‌تواند با تقسیم مجموع بارهای محسوس و نهان به ۱۲۰۰۰BTU (یک تن تبرید) و همچنین ضرب ظرفیت به دست آمده در ۴۰۰cfm به ازای هر تن تبرید، مقدار جریان هوای مورد نیاز را سریعا محاسبه کرده و اجزای سامانه تبرید را تعیین کند. اما این روش برای سوپرمارکت‌ها که نیاز به کنترل پایین رطوبت دارند، مناسب نیست؛ زیرا در این صورت جریان هوای به دست‌آمده و تجهیزات مورد نیاز برای این کار بسیار بزرگ خواهد بود.

برای بهترین استفاده از رطوبت‌گیر و سامانه تبرید، مهندس باید دما و رطوبت را به عنوان متغیرهای مستقل در نظر بگیرد. رطوبت‌گیر رطوبت فضا و سامانه تبرید دمای آن را کنترل می‌کند. بارهای محسوس و میزان چرخش هوای مورد نیاز جریان هوای سامانه را تعیین می‌کنند و رطوبت وارد محاسبات نمی‌شود. نتیجه این کار کوچک‌تر شدن و عملکرد بهتر دستگاه‌های مورد نیاز خواهد بود.

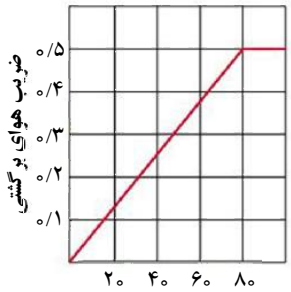
اگر موضوع اصلی دفع گرمای محسوس باشد، جریان هوای سامانه را می‌توان فقط با توجه به افزایش دمای مجاز در فروشگاه تعیین کرد. برای مثال اگر حداقل دمای مجاز $55^{o}F$ باشد (برای پیشگیری از سرد شدن بیش از حد مردم در نزدیکی محل تخلیه هوا)، حجم هوای مورد نیاز برابر با ۱۴۸۱۵cfm خواهد بود ((۲۰÷۱٫۰۸)÷۳۲۰۰۰۰=cfm). اما در عمل طراحان در طراحی سوپرمارکت‌ها از چنین مقدار جریان هوای کمی استفاده نمی‌کنند، زیرا ممکن است در زمستان لایه‌بندی گرمایی[1] زیادی ایجاد شود. رطوبت‌گیرهای دسیکنت معمول حداقل ۰٫۵cfm هوا در هر فوت مربع از مساحت فروشگاه را برای رطوبت‌گیری بکار می‌برند، حتی اگر جریان هوای کمتری برای رطوبت‌گیری و دفع بارهای حرارتی محسوس نیاز باشد. البته در این مثال مهندس پروژه ترجیح می‌دهد که از حجم هوای بیشتری نسبت به مقدار محاسبه شده (۲۵۰۰۰ به جای ۱۴۸۱۵) استفاده شود.

پس از تعیین حجم هوای مورد نیاز و هوای تازه مهندس می‌تواند دما و شرایط رطوبی که وارد دستگاه‌های تبرید و رطوبت‌گیری می‌شود را محاسبه کند. ابتدا باید سامانه رطوبت‌گیر را تعیین کرد، زیرا رطوبت‌گیر گرمای نهان هوا را به گرمای محسوس تبدیل کرده و بر انتخاب سامانه

[1] Thermal stratification

تبرید تاثیر می‌گذارد.

شرایط طراحی در تابستان برای تهویه هوا، دمای $95^{o}F$ و رطوبت ۱۲۰gr/lb است. محاسبه دمای هوای برگشتی[1] از فروشگاه به سامانه‌های رطوبت‌گیری و سردساز کمی پیچیده‌تر است، زیرا این هوا بیشتر از راهروها، نه از قسمت‌های بالای دیوار فروشگاه، گرفته می‌شود. این کار برای دفع هوای خیلی سرد نزدیک به یخچال‌های ویترینی فروشگاه انجام می‌شود. این هوا، گرفته شده و به بخش‌هایی که به سردسازی نیاز است، توزیع می‌شود. این بدین معنی است که دمای هوای برگشتی برابر با دمای متوسط فروشگاه یعنی $75^{o}F$ نیست و تاحدودی از آن کمتر خواهد بود. این‌که چقدر پایین‌تر است نیز به این بستگی دارد که چقدر هوا از راهروها و چقدر از قسمت‌های بالای دیوارهای فروشگاه گرفته می‌شود.



شکل ۷-۲۰

رطوبت‌گیرهای سوپرمارکت‌ها طوری طراحی می‌شوند که هوای زیر یخچال‌های ویترینی نیز به رطوبت‌گیر بازگردانده می‌شود. یخچال‌های ویترینی هوای برگشتی را سرد می‌کنند. "ضریب هوای برگشتی" نشان‌دهنده درصد خنک‌کنندگی یخچال‌های ویترینی است که به کمک آن می‌توان دمای هوای برگشتی را محاسبه کرد.

نتایج تجربی از آزمایش در چندین فروشگاه نشان‌دهنده این است که حتی اگر ٪۱۰۰ هوای برگشتی از راهروها گرفته شود، حداکثر ٪۵۰ هوای یخچال‌ها بر دمای هوای برگشتی تاثیر دارد و مابقی آن در فروشگاه باقی می‌ماند. برای محاسبه میزان کاهش میزان دمای هوای برگشتی از فروشگاه به سامانه‌ها می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\text{کاهش دما} = \frac{۰/۵ * ۴۳۰۰۰۰}{۲۱۵۰۰ * ۱/۰۸} = ۹/۲^{\circ}F \qquad ۳-۷$$

که

۰/۵: ضریب هوای برگشتی (عددی بی بعد)

۴۳۰۰۰۰: تاثیر سردسازی سامانه‌های تبرید (BTU/hr)

۲۱۵۰۰: جریان هوای برگشتی به سامانه (cfm)

۱/۰۸: BTU/hr در هر یک cfm و یک درجه فارنهایت

که در نتیجه دمای هوای برگشتی برابر با $65/8^{o}F$ می‌شود (۶۵/۸=۹/۲-۷۵). با توجه به اینکه شرایط هوای برگشتی مشخص است، مهندس می‌تواند دما و شرایط رطوبی هوای سامانه را محاسبه کرده و ظرفیت سامانه را تعیین کند.

در شرایط رطوبی پایین رطوبت‌گیرهای دسیکنت به مراتب بهتر از سامانه‌های تبرید هوا را خشک می‌کنند. در نتیجه نیازی به خشک‌کردن کل هوای ورودی فروشگاه برای حفظ رطوبت نسبی ٪۴۰ نیست، بلکه می‌توان بخش کمتری از هوا را به شدت خشک کرده و با ترکیب آن با بخش دیگر، هوای مورد نظر برای رطوبت‌گیری را فراهم کرد.

گام نخست تعیین میزان خشکی مورد نیاز جریان هواست. رابطه زیر اختلاف رطوبت بین هوای ورودی و خروجی فروشگاه را تعیین می‌کند:

$$\Delta \text{ گرین} = \frac{۵۳۲۰۰۰}{۲۵۰۰۰ * ۰/۰۷۵ * ۶۰} = ۴/۸ \qquad ۴-۷$$

[1] Return air

که

۵۳۲۰۰۰: بار رطوبی ورودی (gr/hr)

۶۰: تبدیل ساعت به دقیقه

۰/۰۷۵: چگالی هوا $(\frac{lb}{ft^3})$

۲۵۰۰۰: جریان هوا (cfm)

که در نتیجه جریان هوای مورد نیاز حاوی ۵۱٫۲gr/lb رطوبت است (۵۱٫۲=۴٫۸–۵۶).

با تعیین شرایط مورد نیاز اکنون می‌توان شرایط هوای مخلوط شده[1] ورودی به رطوبت‌گیر را محاسبه کرد:

$$\text{دما} = \frac{\left(۲۱۵۰۰ * ۶۵/۸\right) + (۳۵۰۰ * ۹۵)}{۲۵۰۰۰} = ۶۹/۸°\text{F} \qquad ۵–۷$$

$$\text{رطوبت} = \frac{\left(۲۱۵۰۰ * ۵۶\right) + (۳۵۰۰ * ۱۲۰)}{۲۵۰۰۰} = ۶۵gr/lb$$

که

۲۱۵۰۰: جریان هوای برگشتی به سامانه (cfm)

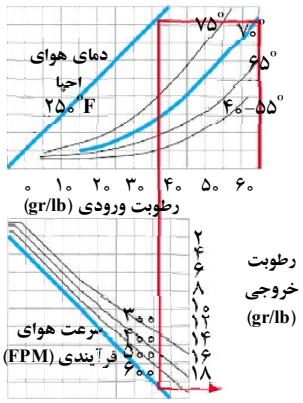
۶۵/۸: دمای هوای برگشتی (^{o}F)

۳۵۰۰: جریان هوای گرفته شده از محیط بیرون (cfm)

۹۵: دمای هوای گرفته شده از محیط بیرون (^{o}F)

۲۵۰۰۰: جریان هوا (cfm)

سوالی که در اینجا پیش می‌آید این است که با استفاده از رطوبت‌گیر تا چه حد می‌توان هوا را خشک کرد؟ نمودارهای عملکرد موجود در پیوست نشان می‌دهند که اگر هوا در ۷۰°F و ۶۵gr/lb وارد رطوبت‌گیر شود، با توجه به سرعت هوا درون چرخ دسیکنت و دمای هوای احیا، در شرایط رطوبی بین ۱۳ تا ۱۹gr/lb رطوبت‌گیر را ترک می‌کند. سرعت بیشتر هوا و دمای هوای احیا بالاتر به معنای کوچک‌تر بودن و در نتیجه هزینه کمتر سامانه رطوبت‌گیری است.



شکل ۷-۲۱

عملکرد رطوبت‌گیرهای دسیکنت به دما و رطوبت داخل فضا (که در این مثال دما ۷۰°F و رطوبت ۶۵gr/lb است)، دمای هوای احیا و سرعت هوای درون چرخ دسیکنت بستگی دارد. در این شرایط هر چه دمای هوای احیا بالاتر و سرعت هوا بیشتر باشد، هزینه سامانه مورد نیاز کمتر می‌شود.

برای کمینه‌کردن هزینه اولیه مهندس فرض می‌کند که سرعت هوای فرآیندی ۶۰۰fpm و دمای احیا ۲۵۰°F است و رطوبت‌گیری تا ۱۹gr/lb انجام می‌شود. آنگاه حجم هوای مورد نیاز با رطوبت ۱۹ گرین که قرار است ۲۵۰۰۰cfm هوای حاوی ۶۵gr/lb رطوبت را به هوای حاوی ۵۱gr/lb رطوبت برساند برابر است با:

$$\left(cfm * ۱۹\right) + \left(\left(۲۵۰۰۰ - cfm\right) * ۶۵\right) = ۲۵۰۰۰ * ۵۱ \qquad ۶–۷$$

$$\rightarrow \quad cfm = ۷۶۱۰$$

[1] Blended air

که

cfm: حجم هوای خشک (cfm)

۱۹: رطوبت هوای خشک (gr/lb)

(۲۵۰۰۰ –cfm): جریان هوای گذرنده از رطوبت‌گیر (cfm)

۶۵: رطوبت هوای ورودی به رطوبت‌گیر (gr/lb)

۲۵۰۰۰: جریان هوای کل (cfm)

۵۱: میزان رطوبت مطلوب مورد نظر (cfm)

یک رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۱۵ sq.ft. می‌تواند ۷۶۱۰cfm هوا را فراهم کند که هوای فضا را تا کمتر از ۱۹گرین خشک می‌کند. در این شرایط سرعت هوای فرآیندی ۵۰۷fpm (۷۶۱۰÷۱۵=۵۰۷) است و رطوبت هوای خروجی ۱۷گرین خواهد بود که در نتیجه ظرفیت سامانه بیش از حد مورد نیاز خواهد بود.

$$\text{رطوبت‌گیری} = ۰/۰۷۵ * ۶۰ * \left(۵۶ - ۵۰/۴\right) * ۲۵۰۰۰ = ۶۳۰۰۰۰gr/hr \qquad ۷-۷$$

که

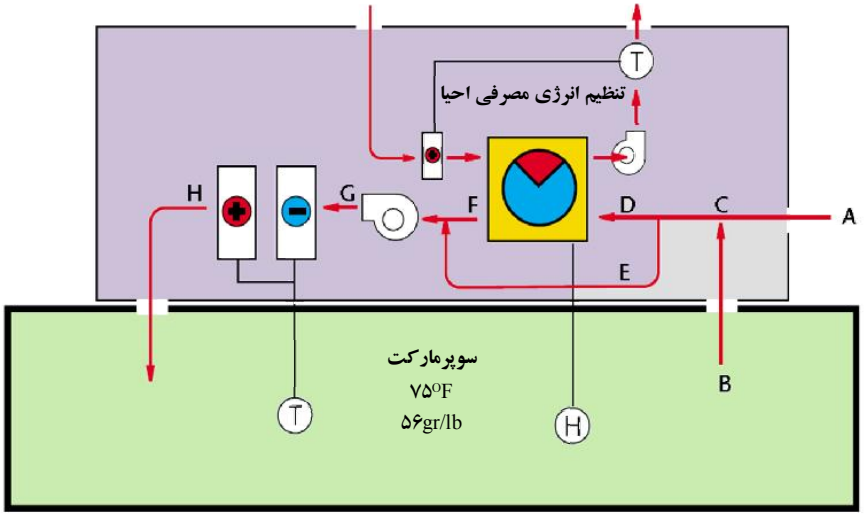
۰/۰۷۵: چگالی هوا $(\frac{lb}{ft^3})$

۶۰: تبدیل ساعت به دقیقه

(۵۶–۵۰/۴): اختلاف بین رطوبت جریان هوا و سطح کنترل رطوبت (gr)

۲۵۰۰۰: جریان هوا (cfm)

اکنون که عملکرد رطوبت‌گیر مشخص شده است، طراح می‌تواند به محاسبه میزان سرمایش مورد نیاز در پایین‌دست رطوبت‌گیر پس از آنکه هوا مخلوط شد، بپردازد. شکل کلی سامانه‌ها کامل شده است.



شکل ۷-۲۲

موقعیت	جریان هوا (cfm)	دما (°F)	رطوبت (gr/lb)
A	۳۵۰۰	۹۵	۱۲۰
B	۲۱۵۰۰	۶۵٫۸	۵۶
C	۲۵۰۰۰	۶۹٫۸	۶۵
D	۷۶۱۰	۶۹٫۸	۶۵
E	۱۷۳۹۰	۶۹٫۸	۶۵
F	۷۶۱۰	۱۱۲٫۴	۱۷
G	۲۵۰۰۰	۸۲٫۸	۵۰٫۴
H	۲۵۰۰۰	۵۵	۵۰٫۴

۷-۴-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی

دما و رطوبت فروشگاه باید کنترل شود و سامانه رطوبت‌گیر و تبرید باید مطابق با تغییرات بار

ناشی از تغییر هوا یا شرایط داخلی فروشگاه تنظیم شوند. فن اصلی سامانه نیز باید به طور مداوم کار کند و موجب چرخش هوا در فضا شود.

سامانه کنترلی می‌تواند یک رطوبت‌سنج ساده روشن-خاموش باشد. نیازی به کنترل دقیق رطوبت نیست و سطح کنترلی تقریبا بالا و بر روی ٪۴۰ تنظیم می‌شود. اما در تعیین موقعیت حسگر باید دقت شود و باید حداقل ۱۰ft از کف فاصله داشته باشد تا به آن برخوردی صورت نگیرد. همچنین باید در مرکز فروشگاه و در یک راهرو مناسب نصب شود، زیرا در غیر این صورت به دلیل وجود اثر یخچال‌های ویترینی حسگر مقدار صحیح رطوبت فروشگاه را تعیین نخواهد کرد. همچنین اگر حسگر بیشتر از ۱۰ft از کف فاصله داشته باشد، به دلیل اینکه دما بیشتر از دمای کنترلی است، رطوبت نسبی صحیح اندازه‌گیری نمی‌شود. با استفاده از حسگر دمای نقطه شبنم می‌توان از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری کرد، اما این حسگر از یک رطوبت‌سنج ساده گرانقیمت‌تر است.

برای کنترل و تنظیم سامانه تبرید نیز می‌توان از یک ترموستات استفاده کرد. مهندس عقیده دارد که این حسگر نیز باید در نزدیکی رطوبت‌سنج در مرکز فروشگاه نصب شود که در این صورت دمای میانگین فروشگاه را تعیین خواهد کرد.

انرژی مصرفی در هر دو سامانه رطوبت‌گیر و تبرید باید مطابق با تغییرات بار تنظیم شود. تنظیم سامانه تبرید با تنظیم کمپرسور آن صورت می‌گیرد. میزان سرمایش را می‌توان با تجهیز سامانه به شیرهای کاهش بار کمپرسور تنظیم کرد. با تغییر فشار در سمت مکش کویل اواپراتور بار روی موتور کمپرسور کمتر شده و در نتیجه انرژی مصرفی کاهش می‌یابد.

انرژی احیا رطوبت‌گیر نیز با استفاده از کنترل‌کننده دما صورت می‌گیرد که در جریان هوای خروجی از سامانه نصب شده است. با کاهش بار رطوبی، رطوبت کمتری از بخش احیا می‌گذرد و در نتیجه دما افزایش می‌یابد. سپس کنترل‌کننده دما انرژی مصرفی هیتر احیا را کم می‌کند و موجب حفظ دمای ثابت ۱۲۰°F در خروجی سامانه می‌شود.

مورد مهمی که معمولا طراحان نادیده می‌گیرند، سامانه برفک‌زدایی سامانه‌های تبرید است. یکی از فواید پایین بودن میزان رطوبت فروشگاه کاهش میزان برفک سامانه‌های تبرید و در نتیجه کاهش تعداد موارد برفک‌زدایی است. البته بیشتر سامانه‌های برفک‌زدایی با ساعت زمان[1] کنترل می‌شوند. در این سامانه‌ها فروشنده مدت زمان مشخصی با توجه به برفک تشکیل‌شده برای برفک‌زدایی تعیین می‌کند. چنین سامانه‌هایی امکان استفاده کامل از مزایای پایین بودن رطوبت نسبی فروشگاه را برای مالک آن فراهم نمی‌آورند، زیرا تنظیم ساعتی سامانه برفک‌زدایی همواره از میزان نیاز به برفک‌زدایی کمتر یا بیشتر است. یک سامانه دیگر از دیود ساتع‌کننده نور[2] و دستگاه گیرنده آن برای تعیین ضخامت برفک ایجاد شده استفاده می‌کند و تا وقتی‌که میزان برفک به حد مشخصی نرسیده است، برفک‌زدایی شروع نمی‌شود.

---

[1] Time-clock

[2] Light-emitting diode (LED)

۷-۴-۶ ملاحظات دیگر

- هوای سرد و خشک حاصل از سامانه‌ها را باید در بخش جلویی فروشگاه توزیع کرد؛ زیرا هم بارهای حرارتی و هم بارهای رطوبی در بخش جلویی فروشگاه که تردد مشتریان و ورودی و خروجی‌ها صورت می‌گیرد، متمرکزاند. با این کار هم سطح آسایش افزایش می‌یابد و هم بار ورودی به فروشگاه کمتر می‌شود.
- بیشترین هزینه بهره‌برداری رطوبت‌گیرهای دسیکنت مربوط به هزینه انرژی مصرفی احیا رطوبت‌گیر است. از طرف دیگر، هدف اصلی استفاده از رطوبت‌گیرها در سوپرمارکت‌ها و یا مکان‌های تجاری دیگر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری است، در نتیجه کاهش هزینه انرژی احیا اهمیت زیادی دارد. در همه سوپرمارکت‌ها مقداری گرمای تلف شده حاصل از یخچال‌های ویترینی وجود دارد که می‌توان از آن برای پیش‌گرمایش هوا قبل از ورود به فرآیند احیا استفاده کرد. افزون بر این شرکت‌های خدماتی زیادی وجود دارند که امکان استفاده از گاز طبیعی با هزینه بسیار مناسب را در تابستان فراهم می‌آورند. مهندس می‌تواند با استفاده از این منابع کم‌هزینه انرژی هزینه بهره‌برداری سامانه‌های رطوبت‌گیری را کاهش دهد.

حتی کنترل دما و رطوبت نیز به تطابق ظرفیت سامانه و بارهای رطوبی بستگی دارد. اگر بارهای رطوبی و حرارتی در یک ناحیه ایزوله شده از فضا بسیار بیشتر از نقاط دیگر باشد، بهتر است که یک سامانه جداگانه برای آن بخش در نظر گرفته شود. در این مثال برای بخش شیرینی‌پزی سامانه جداگانه ای نصب شده است.

در یک پروژه واقعی طراح اشتباها مقدار هوای کمی از سامانه مرکزی برای سرمایش و گرمایش اتاق مدیریت در نظر گرفت. اما از آنجایی که سامانه به شرایط فروشگاه و نه شرایط اتاق مدیریت واکنش می‌دهد، اتاق به طور مرتب سرد و گرم می‌شد.

۷-۴-۷ منابع انبارهای غیر فعال – مثال یک انبار تجهیزات

[1] Banks, Nancy J. (MacDonald) Utilization of Condenser Heat for Desiccant Dehumidifiers in Supermarket Applications ASHRAE Transactions, June 1982.

[2] Calton, Dean S. Application of a Desiccant Cooling System to Supermarkets ASHRAE Transactions 1985 V.91, Pt.1

[3] Harriman, Lewis G. III, Brundrett, G., Kittler, R., 2001. Humidity Control Design Guide. ASHRAE, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329 USA ISBN: 1-883413-98-2.

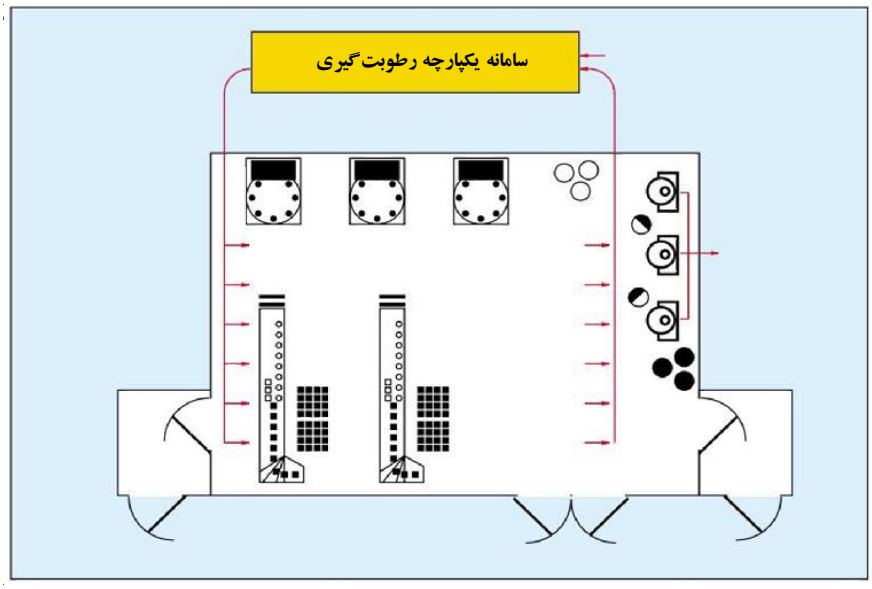
[4] Retail Facilities - Chapter 18, ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Applications 1987

[5] Retail Food Store Refrigeration Equipment - Chapter 35, ASHRAE Handbook of Equipment 1988

[6] American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, NE. Atlanta, GA 30329 USA

۵-۷ سامانه‌های HVAC صنعتی- مثال تولید قرص‌های دارویی[1]

رطوبت‌گیرهای دسیکنت صنعتی امکان تولید سریع‌تر و تولید محصولات مرغوب‌تر را نسبت به تولید در رطوبت بالا فراهم می‌آورند. کنترل رطوبت در سطح پایین ممکن است به معنی سودآوری یا عدم سودآوری در تولید باشد. از این رو همانگونه که به تجهیزات تولید توجه می‌شود، تجهیزات رطوبت‌گیری نیز مورد توجه مهندسان قرار می‌گیرد. مانند همه ماشین‌ها و ابزارآلات دیگر که باید در ۲۴ ساعت روز و ۷ روز هفته کار کنند، سامانه رطوبت‌گیری نیز باید کاملا قابل اطمینان و مقرون به صرفه طراحی و ساخته شود. در ادامه یکی از کاربردهای معمول رطوبت‌گیری در صنعت داروسازی را بررسی می‌کنیم.



شکل ۷-۲۳

فرآیندهای ترکیب، تولید قرص و بسته‌بندی مواد دارویی اغلب در محیط‌های کم‌رطوبت انجام می‌گیرد. در این مثال تصمیماتی که مهندس طراح برای سامانه رطوبت‌گیری به منظور کنترل فضا در رطوبت نسبی ٪۱۰ می‌گیرد را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۵-۷ گام اول – تعیین هدف پروژه

هدف پروژه جلوگیری از جذب رطوبت قرص‌ها و پودرهای جوشان[2] است. پرس کردن قرص‌ها با استفاده از پودرهای خشک سریع‌تر انجام می‌شود و عمر قرص‌های خشک نیز طولانی‌تر است. ابعاد فضا ۳۰ft×۴۰ft×۸ft است. فرآیند نیز شامل سه مرحله است: پودرهای خشک در مخلوط‌کننده‌های بزرگ مخلوط می‌شوند، سپس پودرها به صورت قرص فشرده می‌شوند و پس از آن در پالت‌هایی برای حمل و نقل بسته‌بندی می‌شوند.

۲-۵-۷ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن

یکنواختی دما در این فرآیند اهمیتی ندارد. نیاز به تلرانس بسیار خوب نیست و انبساط حرارتی وجود ندارد. دغدغه اصلی در مورد شرایط آسایش کارگران است، بنابراین مهندس پروژه سطح کنترل را در دمای $70^{o}F$ و تلرانس $\pm 3^{o}F$ تنظیم می‌کند. در واقع مهندس می‌داند که بسیاری از کارگران در این شرایط رطوبت کم ترجیح می‌دهند که دمای هوا کمی بالاتر باشد، اما او برای اطمینان از اینکه سامانه در شرایط مختلف از ظرفیت کافی برخوردار است، $70^{o}F$ را انتخاب می‌کند.

---

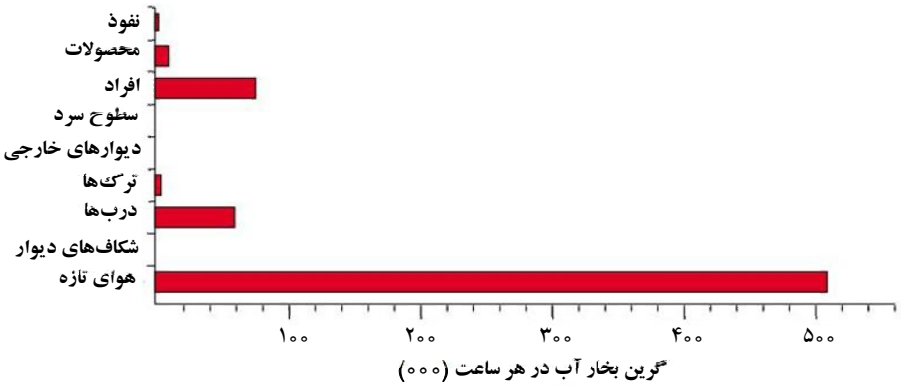
[1] Pharmaceutical Tableting

[2] Effervescent powders

کنترل رطوبت بسیار حساس‌تر است. فرض بر این است که مهندسان تولید تاکید کرده‌اند که عامل محدودکننده طول عمر قرص‌ها جذب رطوبت آن‌ها هنگام تولید است. طبق گفته مهندسان این شرکت "هر چه خشک‌تر باشد، بهتر است. اما رطوبت نسبی ٪۱۰ بسیار مناسب است، زیرا ٪۹۵ جذب رطوبت را کاهش می‌دهد". بنابراین سطح کنترل رطوبت نیز در رطوبت نسبی ٪۱۰ تنظیم می‌شود. همچنین از آنجایی که دما می‌تواند تا ۳ درجه بالا و پایین مقدار مورد نظر نوسان کند، رطوبت نسبی ٪۱۰ به معنی نسبت رطوبت بین ۹٫۷ و ۱۱٫۸gr/lb خواهد بود. وقتی سطح کنترل رطوبت پایین است، این اختلاف هزینه‌های زیادی خواهد داشت. برای جلوگیری از اشتباه دمای نقطه شبنم دقیقا در ۱۳°F (۱۱gr/lb) تنظیم می‌شود.

۳-۵-۷ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی

فضای اتاق در ساختمان بزرگ‌تری قرار دارد؛ بنابراین دیوارها، سقف و کف در معرض هوای محیط قرار ندارند. چون هوای کل ساختمان تهویه می‌شود، در دیوارهای فضا اختلاف دما وجود ندارد. حرارت ایجاد شده در فضا عمدتا ناشی از موتورهای مخلوط‌کننده‌ها، فرآیند پرس‌کردن و ماشین‌آلات بسته‌بندی و همچنین روشنایی فضا و رفت‌وآمد افراد است. کل بار حرارتی ۴۱۰۰۰Btu/h است.



شکل ۷-۲۴
هود نصب شده در بالای مخلوط‌کننده‌ها ۵۰۰cfm هوا از اتاق خارج می‌کند. هوایی که جایگزین می‌شود، مقدار زیادی رطوبت دارد و بیشترین بار رطوبی را به سامانه تحمیل می‌کند. بار رطوبی داخل اتاق نیز عمدتا شامل تنفس افراد و رطوبت ورودی از درب‌های باز می‌شود. نفوذ بخار از طریق دیوارها، سقف و کف تقریبا ناچیز است.

محاسبات بارهای رطوبی نشان می‌دهد که بار رطوبی داخل فضا بخش کوچکی از کل بار است. نمودار میزان بار رطوبی تاثیر بار رطوبی هوای تازه را بر رطوبت اتاق نشان می‌دهد. چون مقدار این بار بزرگ است، به بررسی دقیق‌تری نیاز است.

مهندس پروژه متوجه می‌شود که این بار ناشی از ۸۰۰cfm هوا است. بنابراین با استفاده از ۳۰۰cfm هوا فضا تحت فشار مثبت قرار داده می‌شود (برای به حداقل رساندن نشت هوا) و سپس ۵۰۰cfm دیگر برای جبران هوای خروجی از هود مخلوط‌کننده‌ها اضافه می‌شود. متاسفانه راهی برای کاهش این جریان هوا وجود ندارد. وجود هود برای گرفتن ذرات و حلال‌هایی که از مخلوط‌کننده بیرون می‌آید، ضروریست و توان مصرفی آن در کمترین میزان ممکن برای گرفتن ذرات تنظیم شده است. با اینکه نمی‌توان میزان هوای تازه را کاهش داد، اما می‌توان با سرد کردن هوا قبل از ورود به رطوبت‌گیر بار رطوبی هوای تازه را کاهش داد. فرض می‌شود هوای محیط در دمای ۹۱°F و رطوبت ۱۴۷gr/lb وارد سامانه رطوبت‌گیری می‌شود. این شرایط برای رطوبت‌گیرهای سرمایشی ایده‌آل است.

بارهای رطوبی این مثال، مطابق با موارد گفته‌شده در فصل پنجم محاسبه شده است.اما ممکن است دو طراح فرضیات متفاوتی را برای شرایط یکسان در نظر بگیرند.

برای مثال یک مهندس ارشد که در صنعت داروسازی کار کرده است، اعتقاد دارد که چگونگی استفاده از اتاق قابل پیش‌بینی نیست. بر حسب تجربه این مهندس عدم قطعیت محاسبات بارهای رطوبی را به صورت زیر بیان کرده است:

حجم هوای تازه	٪۱۵±
نشت از کانال‌ها	٪۱۰۰±
نشت هوا	٪۵۰±
نشت از رطوبت‌گیر	٪۵۰±
تعداد باز شدن درب‌ها	٪۵۰±
سطوح مرطوب	٪۲۵±
رطوبت محصولات	٪۵۰±
تعداد افراد	٪۲۵±
انتقال رطوبت	٪۵۰±

با پیش‌سرد کردن هوا تا دمای $۵۰^{o}F$ می‌توان ٪۶۰ رطوبت هوا را جدا کرد و دمای کمتر هوا موجب بهبود عملکرد رطوبت‌گیر می‌شود. کارهای کمی برای کاهش بار رطوبی افراد می‌توان انجام داد، اما مهندس با اضافه کردن راهرو برای درب‌های ورودی افراد بار رطوبی ناشی از درب‌ها را نصف می‌کند. این کار را می‌توان برای ورودی به فضای محصولات نیز انجام داد، اما به فضای بیشتری احتیاج است. با توجه به اینکه ورودی‌ها هر ساعت یک بار باز می‌شوند، کاهش بار رطوبی نسبت به هزینه راهروها به صرفه نیست.

ضخامت دیوار $\frac{۳}{۴}''$ است و با رنگ لاتکس صنعتی عایق بخار رنگ‌آمیزی شده است. دیوارها درزبندی شده‌اند و بار رطوبی نفوذ از دیوارها برابر با ۴۷۱gr/lb اندازه‌گیری شده است که به سختی روی نمودار نشان داده شده است.

مهندس پروژه مقدار اندکی بار رطوبی ورودی از کنار درب ورودی محصولات به فضا محاسبه می‌کند. با اینکه مهندس برای درب‌ها درزبند در نظر گرفته است، اما ممکن است مقدار کمی هوا از آن نفوذ کند.

بار حرارتی محسوس نهایی برابر با ۴۱۰۰۰Btu/h و بار رطوبی داخلی فضا برابر با ۱۰۵۰۰۰gr/hr (۱۵lbs بخار آب در هر ساعت) است.

۷-۵-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بارهای رطوبی و حرارتی

تعیین اجزای رطوبت‌گیری با محاسبه میزان هوای مورد نیاز برای فضا آغاز می‌شود. جریان هوا باید سه معیار را برآورده کند؛ باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا هم پاسخگوی میزان گردش هوای مورد نیاز باشد و هم بتواند بار حرارتی و همچنین بار رطوبی فضا را بگیرد. مهندس پروژه باید حداقل جریان هوا را برای پاسخگویی به شرایط ذکر شده محاسبه کند.

در این مورد، میزان هوای مورد نیاز توسط شرکت تعیین شده است: در اتاق‌های تولید این شرکت حداقل به ۲۰ بار چرخش هوا در ساعت نیاز است. این کار یکنواختی دما و رطوبت را در فضا افزایش می‌دهد و موجب آسایش کارگران و ثبات تولید می‌شود. ابعاد فضا ۸×۴۰×۳۰ است که حجم آن $۹۶۰۰ft^3$ می‌شود. برای ۲۰ بار چرخش هوا در ساعت به ۹۶۰۰×۲۰ معادل با $۳۲۰۰ft^3$ هوا در دقیقه نیاز است.

حداقل میزان هوای مورد نیاز برای گرفتن بار حرارتی به اختلاف دمای مجاز بین هوای تهویه و هوای برگشتی از ساختمان بستگی دارد. برای اطمینان از اینکه کارگران سردشان نشود، مهندس پروژه تصمیم می‌گیرد که حداقل دمای هوا $۶۰^{o}F$ باشد. معادله زیر مقدار جریان هوای مورد نیاز برای گرفتن بارهای حرارتی را در صورتی که اختلاف دمای هوای تهویه و برگشتی از ساختمان ۱۰ درجه باشد، را به دست می‌دهد:

$$cfm = \frac{۴۱۰۰۰}{۱/۰۸ * (۷۰ - ۶۰)} = ۳۷۹۶ \qquad ۸\text{-}۷$$

که

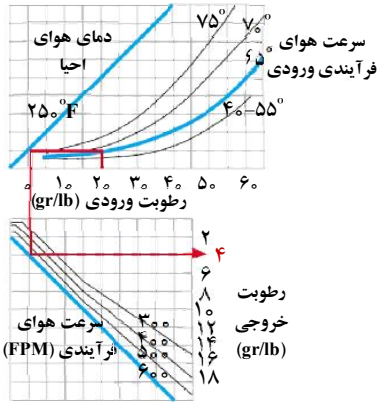
۴۱۰۰۰: بارحرارتی محسوس داخلی (Btu/h)

۱/۰۸: Btu/h فوت مکعب هوا در دقیقه

(۶۰-۷۰): اختلاف دمای بین هوای تهویه و هوای برگشتی از اتاق (^{o}F)

این مقدار به این معنی است که به جای ۳۲۰۰cfm هوا که برای تامین گردش هوا مورد نیاز است، باید ۳۸۰۰cfm هوا فراهم شود.

هوای مورد نیاز برای گرفتن بارهای رطوبی نیز به اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از سامانه بستگی دارد. با اینکه مهندس به راحتی می‌تواند فرض کند که سامانه تبرید هوا را به میزان ۱۰^{o}F سرد می‌کند، اما فرض اینکه رطوبت‌گیر می‌تواند هوا را تا مقدار رطوبت دلخواه رطوبت‌گیری کند، اشتباه است. وقتی رطوبت فضا بالا باشد، می‌توان ۳۰gr/lb رطوبت را از فضا گرفت. اما اگر هوای ورودی به رطوبت‌گیر ۱۵gr/lb رطوبت داشته باشد، گرفتن رطوبت بیش از ۱۴gr/lb دشوار است.



شکل ۷-۲۵

شرایط هوای خروجی از رطوبت‌گیر دسیکنت به شرایط هوای ورودی، دمای هوای احیا و سرعت هوای فرآیندی درون چرخ دسیکنت بستگی دارد. هر چه سرعت هوا بیشتر باشد، رطوبت‌گیر مورد نیاز کوچک‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر خواهد بود. بنابراین مهندس پروژه ابتدا عملکرد رطوبت‌گیر را در سرعت ۶۰۰fpm بررسی می‌کند. در این مثال در سرعت ۶۰۰fpm ظرفیت رطوبت‌گیر بیش از اندازه مورد نیاز است.

بنابراین قبل از آنکه مهندس بتواند مقدار هوای مورد نیاز برای گرفتن بار رطوبی را تعیین کند، باید مشخص کند که هوا را تا چه میزان می‌توان رطوبت‌گیری کرد. در این شرایط سه مورد برای مهندس مشخص است:

- حداقل به ۳۸۰۰cfm هوا برای سردسازی مناسب فضا نیاز است.
- هوای برگشتی حاوی ۱۱gr/lb رطوبت است (دمای ۷۰^{o}F و رطوبت نسبی ۱۰٪).
- جریان هوای خروجی برابر با ۸۰۰cfm است که ابتدا تا ۵۰^{o}F و ۵۴gr/lb پیش‌سرد می‌شود.

با این شرایط مهندس می‌تواند عملکرد رطوبت‌گیر دسیکنت را تعیین کند و مشخص می‌شود که تا چه میزان می‌توان هوا را رطوبت‌گیری کرد. پس از این شرایط مشخص می‌شود که آیا جریان هوایی که بار حرارتی را از فضا می‌گیرد، برای گرفتن بار رطوبی نیز کافی است یا خیر. با فرض ۳۸۰۰cfm کل جریان هوا مهندس می‌تواند شرایط هوای ورودی به رطوبت‌گیر را تعیین کند:

$$\text{دما} = \frac{(۳۰۰۰ * ۷۰) + (۸۰۰ * ۵۰)}{۳۸۰۰} = ۶۶^{o}\text{F} \qquad ۹-۷$$

$$\text{رطوبت} = \frac{(۳۰۰۰ * ۱۱) + (۸۰۰ * ۵۴)}{۳۸۰۰} = ۲۰gr/lb$$

که

۳۰۰۰: جریان هوای برگشتی (cfm)

۷۰: دمای هوای اتاق (^{o}F)

۸۰۰: جریان هوای گرفته شده از محیط (cfm)

۵۰: دمای هوای محیط پس از پیش‌سرد کردن (^{o}F)

۳۸۰۰: کل جریان هوا به رطوبت‌گیر (cfm)

با توجه به منحنی عملکرد رطوبت‌گیر چرخان لیتیم‌کلرید هوای ورودی به رطوبت‌گیر با دمای ۷۲^{o}F و رطوبت ۲۰gr/lb، با توجه به سرعت هوا در بستر دسیکنت، رطوبت‌گیر را با ۱/۵ تا ۵gr/lb رطوبت ترک می‌کند. یک رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۷/۵sq.ft، ۳۸۰۰cfm هوا را با سرعت ۵۰۶ft/min درون رطوبت‌گیر می‌چرخاند. هوای ورودی با ۲۰gr/lb رطوبت، این رطوبت‌گیر را در شرایط رطوبی ۴gr/lb ترک می‌کند. اکنون باید ظرفیت رطوبت‌گیر انتخاب‌شده را برای دفع بار رطوبی بررسی کرد:

ظرفیت = ۳۸۰۰ * ۰/۰۷۵ * ۶۰ * (۱۱ − ۴) = ۱۱۹۷۰۰gr/hr ۱۰-۷

که

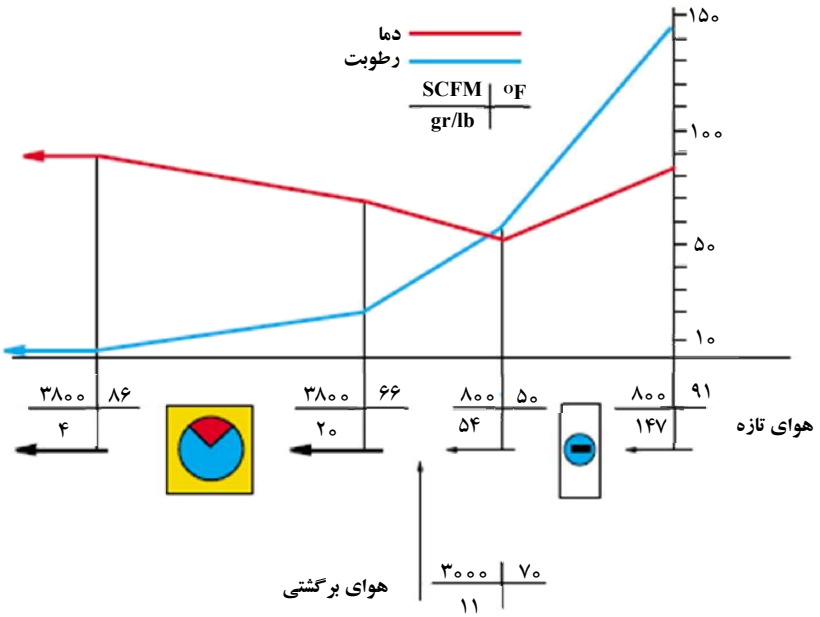
۳۸۰۰: کل جریان هوا به رطوبت‌گیر (cfm)

۰/۰۷۵: چگالی هوا (lbs/cuft/min)

۶۰: تبدیل ساعت به دقیقه

(۴-۱۱): اختلاف بین رطوبت جریان هوای تهویه و هوای برگشتی از اتاق (gr/lb)

با توجه به اینکه بار رطوبی فضا برابر با ۱۰۵۰۰۰gr/hr است، ۳۸۰۰cfm هوا با رطوبت ۴gr/lb برای گرفتن بار رطوبی مناسب است و ظرفیت آن نیز ۱۵٪ بیشتر از مقدار مورد نیاز است.



شکل ۷-۲۶

یکی از تصمیمات بسیار مناسب در سامانه‌های دسیکنت پیش‌سرمایش هوای تازه قبل از ورود به رطوبت‌گیر است. رطوبت‌گیرهای سرمایشی در رطوبت و دمای بالا بهترین عملکرد را دارند. رطوبت‌گیرهای دسیکنت در دما و رطوبت پایین کارآمدتر هستند. ترکیب این دو روش برای رطوبت‌گیری هوای تازه حتی از بکارگیری یکی از این دو روش نیز هزینه کمتری دارد.

این شکل تغییرات دما و رطوبت هوا را هنگام عبور از رطوبت‌گیر نشان می‌دهد.

قابل توجه است که اگر هوای محیط پیش‌سرد و رطوبت‌گیری نشود، هوای مخلوط‌شده با دمای $۷۴^{o}F$ و رطوبت ۳۷gr/lb وارد رطوبت‌گیر می‌شود. در این حالت نهایتا می‌توان هوا را تا ۷gr/lb رطوبت‌گیری کرد. در این شرایط اندازه رطوبت‌گیر مورد نیاز دو برابر افزایش یافته و میزان هوای مورد نیاز برای دفع ۱۰۵gr/hr بار رطوبی نیز بسیار بیشتر از ۳۸۰۰cfm می‌شود. اگر هوای مورد نیاز به وسیله سامانه تهویه مطبوع تامین نشود، قبل از آنکه هوای محیط وارد رطوبت‌گیر دسیکنت شود، باید آن را به وسیله سامانه تبرید رطوبت‌گیری کرد.

بار رطوبی اتاق و بار رطوبی هوای تازه به طور جداگانه گرفته می‌شود. مهندس به رطوبت‌گیری هوا برای گرفتن بارهای داخل فضا توجه می‌کند. او می‌داند که بار رطوبی هوای تهویه نیز قبل از ورود به فضا به راحتی توسط رطوبت‌گیر گرفته می‌شود. اگر هوای محیط بدون رطوبت‌گیری وارد اتاق شود، رطوبت‌گیر مورد نیاز بسیار بزرگ‌تر خواهد بود. برای مثال اگر ۵۰۰cfm هوای خروجی از فضا توسط سامانه جبران نشود و مستقیما از محیط وارد فضا شود، ۳۰۶۰۰۰gr/lb رطوبت وارد فضا می‌شود که در این صورت بار رطوبی فضا چهار برابر خواهد شد. بنابراین اندازه رطوبت‌گیر مورد نیاز چهار برابر رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۷٫۵sq.ft است.

تا اینجا مهندس جریان هوا و اندازه رطوبت‌گیر را تعیین کرده است. اکنون او می‌تواند میزان سرمایش مورد نیاز در پایین‌دست رطوبت‌گیر برای انتقال هوا با دمای $۶۰^{o}F$ را به فضا محاسبه کند.

هوا رطوبت‌گیر را در دمای $۸۶^{o}F$ ترک می‌کند، بنابراین سرمایش ثانویه مورد نیاز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{سرمایش ثانویه} = \frac{۳۸۰۰ * ۱/۰۸ * (۸۶ - ۶۰)}{۱۲۰۰۰} = ۹ \text{ تن تبرید} \qquad ۱۱-۷$$

که

۳۸۰۰: کل جریان هوا به رطوبت‌گیر (cfm)

۱/۰۸: Btu/h بر هر فوت مکعب هوا در دقیقه

(۶۰-۸۶): اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کویل سرمایشی (^{o}F)

۱۲۰۰۰: هر تن تبرید

هوای محیط باید به کمک کویل سرمایشی هم رطوبت‌گیری و هم سرد شود، بنابراین بار بر واحد cfm آن بسیار بیشتر از کویل سرمایش ثانویه است که فقط حرارت هوا را می‌گیرد:۷

$$\text{سرمایش اولیه} = \frac{۸۰۰ * ۴/۵ * \left(۴۵ - ۲۰/۲\right)}{۱۲۰۰۰} = ۷/۵ \text{ تن تبرید} \qquad ۱۲-۷$$

که

۸۰۰: جریان هوای تازه از محیط (cfm)

۴/۵: جریان هوا (cfm/hr)

(۲۰/۲-۴۵): اختلاف آنتالپی هوای ورودی و خروجی کویل سرمایشی (Btu/lb)

۱۲۰۰۰: هر تن تبرید

در زمستان چون هوای سرد وارد سامانه می‌شود، مهندس دمای طراحی در زمستان را برای تعیین میزان گرمایش مورد نیاز مشخص می‌کند. هوای محیط در زمستان با دمای $-5^{o}F$ وارد فضا می‌شود و در این صورت دمای هوای مخلوط‌شده به $54^{o}F$ می‌رسد.

در تابستان دمای هوای تهویه ورودی به فضا $60^{o}F$ است، اما در زمستان دمای هوای تهویه اینقدر زیاد نیست. دمای $60^{o}F$ هوا به معنی این است که بار حرارتی فضا ماکزیمم است؛ همه تجهیزات کار می‌کنند، همه افراد داخل فضا حضور دارند و همه لامپ‌ها روشن است. در زمستان سامانه باید بتواند فضا را در $70^{o}F$ نگهداری کند، حتی اگر بار فضا اندک باشد. بنابراین مهندس ظرفیت هیتر را برای گرم کردن هوا از $54^{o}F$ به $70^{o}F$ تعیین می‌کند.

$$\text{گرمایش در زمستان} = 3800 * 1/08 * (70 - 54) = 65665 Btu/hr \qquad ۱۳\text{-}۷$$

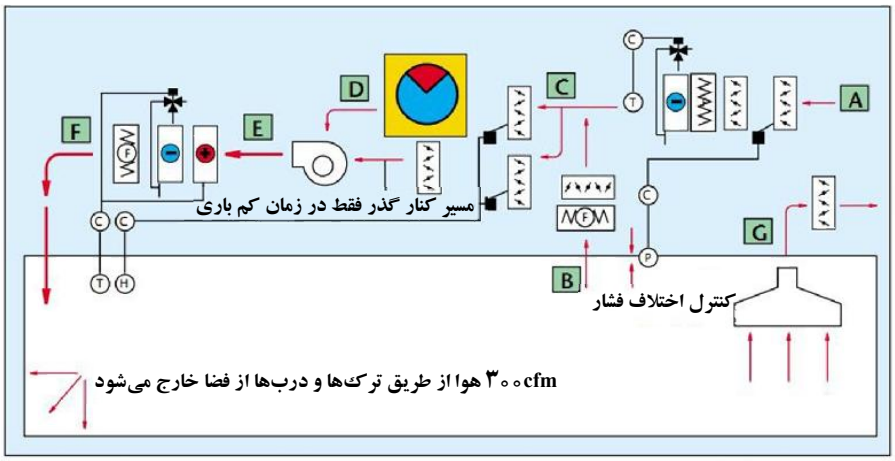
که

۳۸۰۰: کل جریان هوا به رطوبت‌گیر (cfm)

۱/۰۸: Btu/h بر هر فوت مکعب هوا در دقیقه

(۵۴-۸۰): اختلاف دمای هوای مخلوط‌شده و هوای تهویه (^{o}F)

موقعیت	جریان هوا (cfm)	دما (^{o}F)	رطوبت (gr/lb)
A	۸۰۰	۹۱	۱۴۷
B	۳۸۰۰	۷۰	۱۱
C	۳۸۰۰	۶۶	۲۰
D	۳۸۰۰	۸۶	۴
E	۳۸۰۰	۸۶	۴
F	۳۸۰۰	۶۰	۴
G	۵۰۰	۷۰	۳



شکل ۷-۲۷

این سامانه طوری طراحی شده است که ابتدا رطوبت را دفع کند و سپس دمای هوا را تنظیم کند. چون حرارت و بارهای رطوبی به طور مستقل تغییر می‌کنند، این دو متغیر جداگانه کنترل می‌شوند.

برای تنظیم جریان هوای سامانه دمپرهای ثابتی در نقاط مهم ورودی و خروجی سامانه نصب شده است. یک دمپر متغیر نیز برای تنظیم مکش هوای تازه مورد نیاز به منظور ایجاد فشار مثبت درون اتاق نیز بر روی سامانه نصب می‌شود.

فرآیند اختلاط در فضایی پوشیده انجام می‌شود و از فضا خارج می‌گردد، اما با این حال تجربیات قبلی نشان می‌دهند که هوای خروجی از سامانه تهویه باید تصفیه شود. مهندس در قسمت ورودی هوا به رطوبت‌گیر فیلتر هوا (با بازده حذف[1] ٪۳۵) نصب می‌کند؛ یکی در جریان هوای محیط و دیگری در جریان هوای برگشتی. در این صورت به اندازه کافی از اجزای سامانه محافظت خواهد شد. سپس او از فیلتر هوا با بازده بالا (بازده حذف ٪۹۵) در خروجی هوا از سامانه و پایین‌دست اجزای سامانه استفاده می‌کند. با این کار ذراتی که از فیلترهای قبل عبور کرده‌اند و یا ذراتی که درون سامانه تولید شده‌اند، گرفته خواهند شد.

[1] Removal efficiency

یکی دیگر از جنبه‌های مهم در طراحی سامانه تنظیم میزان هوا[1] است. جریان هوای درون سامانه با تغییر دما و فشار هوای محیط تغییر می‌کند. برای ثبات جریان هوا مهندس از دمپرهای ثابت برای تنظیم جریان در جریان هوای برگشتی از اتاق و مجرای مکش هوای تازه استفاده می‌کند.

بسیار مهم است که جریان خروجی از هود کاملا کنترل شود. اگر مقدار زیادی هوا از هودهای فضا خارج شود، هوای محیط به فضا نشت می‌کند و کنترل رطوبت فضا دشوار می‌شود. با بکارگیری هودهایی که جریان هوا را به طور خودکار کنترل می‌کنند، می‌توان این مشکل را به حداقل ممکن رساند.

۵-۵-۷ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی

سامانه کنترل باید ظرفیت هر یک از اجزای رطوبت‌گیر را برای پاسخگویی به تغییرات بار رطوبی و حرارتی تنظیم کند. افزون بر این، باید اطمینان حاصل شود که هر یک از اجزای سامانه از حداقل انرژی لازم استفاده می‌کند. همچنین چون فضا باید همواره تحت فشار مثبت باشد، جریان هوای محیط باید به طور خودکار مطابق با تغییرات فشار تنظیم شود.

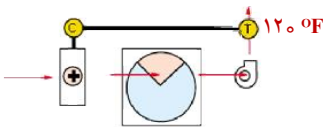
فشار داخل فضا با کنترل دمپر جریان هوای محیط تنظیم می‌شود. هنگامی‌که فشار داخل فضا از حد تعیین‌شده بیشتر شود، دمپر بسته می‌شود تا هوای ورودی به اتاق را کاهش دهد. وقتی‌که فشار داخل فضا کاهش می‌یابد، مانند زمانی‌که درب ورودی به قسمت محصولات باز می‌شود، دمپر باز می‌شود تا هوای بیشتری وارد فضا شود و فشار افزایش یابد.

وقتی به رطوبت‌گیری کمی نیاز است، ظرفیت رطوبت‌گیر با کنترل میزان هوای عبوری تنظیم می‌شود. در این شرایط رطوبت‌گیر مقدار هوای کمتری رطوبت‌گیری می‌کند و مقدار هوای تهویه نسبت به هوای محیط بیشتر می‌شود که در نتیجه سامانه رطوبت‌گیری فضا را بیش از حد خشک نمی‌کند. این کار زمانی‌که مقاومت در برابر جریان هوای رطوبت‌گیر و جریان درون مسیر کنارگذر[2] یکسان است، مناسب است. بنابراین مهندس یک دمپر نیز در جریان هوای مسیر کنارگذر قرار می‌دهد. با یکسان کردن مقاومت چرخ‌های دسیکنت و هوای مسیر کنارگذر به راحتی می‌توان ظرفیت مناسب را تنظیم کرد.

با تغییر میزان رطوبت فضا سامانه کنترلی با باز و بسته کردن دمپرها رطوبت فضا را کنترل می‌کند. اما با این حال این کنترل به طور خودکار انرژی مصرفی سامانه را مطابق با تغییر بار رطوبی کنترل نمی‌کند.

برای به حداقل رساندن مصرف انرژی مهندس یک دماسنج در جریان هوای خروجی از فرآیند احیا رطوبت‌گیر نصب می‌کند. دماسنج دمای هوا را اندازه‌گیری می‌کند و اگر بیشتر از حد تعیین شده باشد، انرژی مصرفی هیترهای احیا رطوبت‌گیر را کاهش می‌دهد. اگر دمای هوای خروجی از احیا $۱۲۰^{o}F$ باشد، نشان‌دهنده این است که کل رطوبتی که در هوای فرآیندی جذب

[1] Air regulation
[2] Bypass



شکل ۷-۲۸

اگر رطوبت کمتری در هوای فرآیندی رطوبت‌گیر گرفته شود، می‌توان انرژی احیا رطوبت‌گیر را کاهش داد. اگر دمای هوای خروجی از فرآیند احیا بیش از ۱۲۰°F باشد، دسیکنت کاملا خشک شده است. می‌توان انرژی ورودی به هیتر را کاهش داد.

اگر از بخار یا آب‌گرم برای فرآیند احیا استفاده می‌شود، می‌توان دمای هیتر را ثابت نگه داشت و جریان هوای احیا را با تنظیم فن ورودی یا کنترل سرعت موتور کاهش داد. مزیت این روش این است که می‌توان هم انرژی مصرفی هیتر و هم انرژی مصرفی فن را کاهش داد. اگر انرژی احیا با استفاده از گاز طبیعی یا انرژی الکتریکی تامین می‌شود، این کار مناسب نیست، زیرا کاهش جریان هوا در این سامانه‌ها می‌تواند موجب آسیب به هیتر شود.

شده است، در فرآیند احیا دفع شده است. اگر دمای هوای خروجی از احیا از این مقدار کمتر شود، به معنی این است که رطوبت بیشتری در هوای فرآیندی جذب شده است و بنابراین انرژی بیشتری در فرآیند احیا نیاز است. اگر دما از این مقدار بیشتر شود، هوای فرآیندی رطوبت کمتری جذب کرده است و انرژی احیا رطوبت‌گیر را می‌توان کاهش داد.

یک سامانه مرکزی آب خنک کویل‌های سرمایشی را تامین می‌کند. جریان آب خنک کویل‌های سرمایشی موجود در جریان هوای تازه با استفاده از یک کنترل‌کننده که در پایین‌دست کویل قرار دارد، تنظیم می‌شود. کنترل‌کننده نرخ جریان آب خنک را طوری تنظیم می‌کند که دمای هوای خروجی از روی کویل‌ها در ۵۰°F ثابت بماند. کویل سرمایشی ثانویه نیز به همین صورت تنظیم می‌شود، اما حسگر دما داخل فضا نصب شده است، زیرا این کویل باید دمای فضا را در مقدار تعیین‌شده نگه دارد.

گرمای کویل‌های گرمایشی به صورت الکتریکی تامین می‌شود. کنترل‌کننده کویل‌های گرمایشی به حسگر کویل سرمایشی ثانویه واکنش داده و متناسب با این حسگر، در صورتی که دمای اتاق کمتر از ۶۸°F باشد، توان هیتر کویل را تغییر می‌دهد.

۷-۵-۶ ملاحظات دیگر

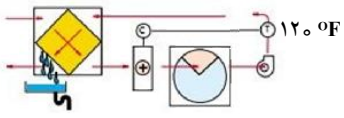
۷-۵-۶-۱ شرایط محیط طراحی

در ابتدای پروژه مهندس باید تعیین کند که در طراحی، دما و رطوبت محیط چقدر در نظر گرفته شود. در این مثال مهندس ۱٪ شرایط طراحی تابستان را انتخاب می‌کند. به این معنی است که در کل ماه‌های تابستان، شرایط محیط در ۱٪ از کل زمان (۲۶ ساعت) از مقادیر تعیین‌شده بیشتر می‌شود. در این مثال تصمیم‌گیری به راحتی انجام می‌شود. تولید به صورت دائم انجام می‌شود و اگر شرایط مورد نظر فراهم نشود، خسارت زیادی به محصولات وارد می‌شود. در کاربردهای کم‌اهمیت‌تر می‌توان مقدار بیشتری در نظر گرفت؛ مثلا ۲٫۵ درصد شرایط این کتاب و یا مقدار کمتری از کتاب راهنمای ASHREA. اما در آن صورت طراح باید بداند که در بسیاری از ساعت‌های سال سامانه رطوبت‌گیری نمی‌تواند رطوبت نسبی فضا را در ۱۰٪ نگه دارد.

۷-۵-۶-۲ کنترل سامانه سرمایشی

در این مثال ما به راحتی فرض کردیم که سرمایش مورد نیاز به وسیله کویل‌های آب خنک فراهم می‌شود. اگر لازم باشد که از سامانه‌های تبرید انبساط مستقیم استفاده شود، مهندس باید بررسی کند که آیا هر دو کویل سرمایشی را با یک سامانه راه‌اندازی کند یا برای هر کویل سامانه مجزا بکار گرفته شود. با بکارگیری یک سامانه برای هر دو کویل هزینه اولیه کاهش می‌یابد و استفاده از دو سامانه موجب سادگی سامانه کنترل می‌شود.

هنگامی‌که دمای هوای محیط بیشتر از ۵۰°F است (بیشتر از نصف مدت زمان یک سال) بار حرارتی کویل ثانویه ثابت است. اما بار حرارتی کویل اولیه با تغییرات هوای محیط تغییر می‌کند. تغییر هوای محیط و تغییر بار کویل‌ها باید هم در لوله‌کشی سامانه تبرید و هم در سامانه کنترل کمپرسور لحاظ گردد.



شکل ۷-۲۹

با بازیافت حرارت خروجی از احیا و استفاده از آن برای پیش‌گرمایش هوای ورودی می‌توان هزینه بهره‌برداری سامانه را کاهش داد.

ذکر این نکته مهم است که هوای احیا گرم و مرطوب موجب چگالش مقدار زیادی آب در مبدل حرارتی می‌شود، بنابراین باید آب چگالیده شده را تخلیه کرد.

۷-۵-۶-۳ بازیافت انرژی

چون سامانه رطوبت‌گیری به طور پیوسته کار می‌کند، حتی با تنظیم مصرف انرژی نیز هزینه بهره‌برداری سامانه زیاد خواهد بود. مهندس می‌تواند با بازیافت حرارت تلف‌شده از کمپرسور سامانه تبرید و هوای خروجی از احیا رطوبت‌گیر، هزینه بهره‌برداری سامانه را کاهش دهد. از این حرارت می‌توان برای گرم کردن هوای احیا، قبل از ورود به رطوبت‌گیر، استفاده کرد.

در این مورد حرارت تلف شده از احیا بسیار قابل توجه است. ۱۳۰۰cfm هوای احیا رطوبت‌گیر را با دمای ۱۲۰°F ترک می‌کند. وقتی هوای محیط ۵۵°F باشد، یک مبدل حرارتی هوا به هوا می‌تواند ٪۶۰ از حرارت خروجی یا ۹۱۲۰۰Btu/h را بازیافت کند. البته باید توجه داشت که مبدل حرارتی در هوای مرطوب احیا رطوبت‌گیر موجب چگالش مقدار زیادی آب می‌شود (در این مثال چند گالن در ساعت). باید مبدل و کانال‌کشی‌ها را طوری سازماندهی کرد که آب چگالیده شده به رطوبت‌گیر برنگردد و به جایی دیگر تخلیه شود.

برای طراحی کانال‌های سامانه، به یاد داشته باشید که احتمال چگالش آب در سامانه وجود دارد. در یک پروژه عملی، کانال خروج هوای مرطوب احیا به صورت عمودی و بدون تخلیه نصب شد. بخار آب درون کانال چگالیده شده و به سمت رطوبت‌گیر برمی‌گشت و موجب خرابی فن احیا و دسیکنت شد.

در یک مورد دیگر، چون در زمان فعالیت رطوبت‌گیر هیچ رطوبتی بر روی کویل سرمایش ثانویه ایجاد نمی‌شد، سامانه تخلیه برای این بخش در نظر گرفته نشد. اما زمانی‌که رطوبت‌گیر بعد از تعمیرات شروع به فعالیت می‌کند، تا قبل از اینکه به تعادل برسد، کویل سرمایش مرطوب خواهد بود. در این مورد، کویل به صورت افقی و بالای کانال هوای تهویه اتاق نصب شده بود. بخار آب چگالیده شده بر روی کویل سرمایش ثانویه وارد اتاق می شد و موجب شرمندگی طراح سامانه شد.

راهکار دیگر برای کاهش مصرف انرژی استفاده از حرارت تلف‌شده از سامانه‌های تبرید برای پیش‌گرم کردن هوای ورودی به احیا رطوبت‌گیر است. این کار عملکرد رطوبت‌گیر را نیز بهبود می‌دهد، زیرا در این صورت سطح مقطع موجود برای چگالش مبرد بیشتر می‌شود.

۷-۵-۷ منابع-ساختمان‌های صنعتی

[1] Grady, Harold R., Harriman, Lewis G. III, Pouchak, Dimitri M. Recent Innovations in Battery Room Moisture Control. Batteries Today, Winter 1982, Vol 2. No. 1. Advanced Battery Technology. Box 30, Cooperstown, NY 13326 USA

[2] Harriman, Lewis G. III Moisture Control in Photolithography Areas. Solid State Technology June 1983. 14 Vanderventer Ave. Port Washington, NY 11050 USA

[3] McGuire, Anthony B. Designing Cleanrooms for Anhydrous Product Manufacture. Pharmaceutical Manufacturing. March 1984, Canon Communications

[4] Rosencrantz, Robert. Automation of HVAC and process controls in a new pharmaceutical manufacturing facility. Pharamceutical Technology. August 1984 Aster Publishing Corporation. 859 Willamette St. Eugene, OR. 97440-2460 USA

۶-۷ خشک‌کردن محصولات-مثال پوشش‌دهی شیرینی[1]

در کاربردهای خشک کردن محصولات که دمای نقطه شبنم بسیار پایین یا دمای خشک‌کنندگی بسیار کم و یا هر دو مورد بسیار سودمند است، از رطوبت‌گیرهای دسیکنت استفاده می‌شود.

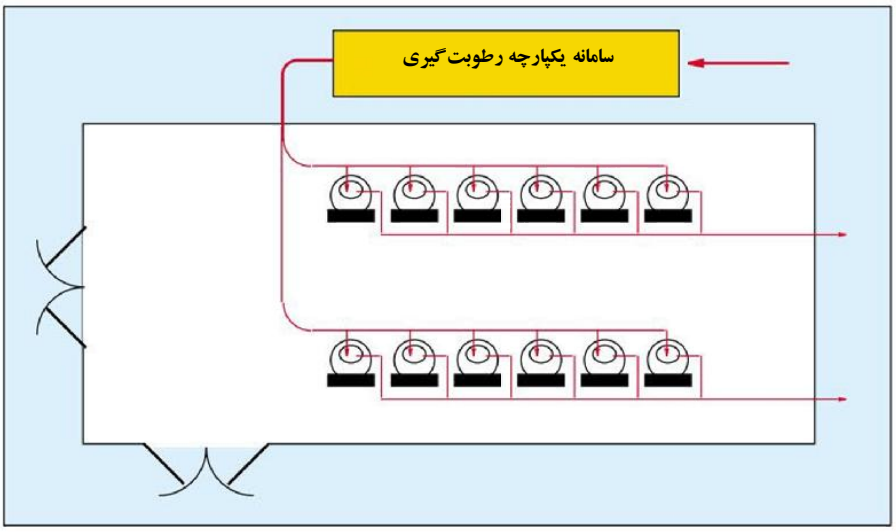
برای مثال امولسیون فیلم‌های عکاسی به کمک هوا و غلتک‌های سرد در دمای بین ۰°F تا ۲۰°F تولید می‌شود. برای تشکیل این امولسیون و گرفتن مقداری از آب آن و همچنین به منظور جلوگیری از چگالش بر سطوح سرد فیلم، به جریان هوای سرد و خشک نیاز است.

برعکس، پلاستیک های PET بسیار جاذب رطوبت هستند. برای گرفتن همه ذرات رطوبت از این پلاستیک، از جریان هوا با دمای ۳۰۰°F با دمای نقطه شبنم ۴۰°F- (۰٫۵gr/lb) استفاده می‌شود. فیلم عکاسی به صورت مداوم تولید می‌شود و پلاستیک‌ها به صورت گروهی خشک می‌شوند. این فرآیندها بدون هوای خشک نیز انجام می‌شوند، اما با استفاده از رطوبت‌گیر، سرعت تولید بیش از دو برابر می‌شود.

سامانه‌های رطوبت‌گیری که محصولات را خشک می‌کنند، منفعت بسیار زیادی برای مالکان دارند. در بسیاری از موارد با استفاده از هوای رطوبت‌گیری شده سرعت خط تولید دو برابر می‌شود و کیفیت محصولات افزایش می‌یابد. رطوبت‌گیرهای خشک‌کننده محصولات شبیه به ابزاری هستند که هزینه نصب آن‌ها در چند ماه و یا چند هفته جبران می‌شود. به عنوان مثال سامانه جعبه خشک‌کننده[2] برای پوشش‌دهی شیرینی‌جات که موجب سفت و براق شدن آن‌ها می‌شود را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۶-۷ گام اول – تعیین هدف پروژه

هدف پروژه کاهش رطوبت هوای خشک‌کننده است تا بتوان سرعت زیاد تولید در زمستان را در تابستان، بهار و پاییز نیز ایجاد کرد. طبق تجربه قبلی، فرآیند پوشش‌دهی در تابستان از کنترل خارج می‌شود. محیط مرطوب هوا را بسیار مرطوب می‌کند و نمی‌توان با سرعت بالا پوشش‌دهی کرد. پوشش شیرینی، لک‌دار و ناصاف می‌شود و قطعات شیرینی بهم می‌چسبد. می‌توان سامانه‌ای را در نظر گرفت که هوای نقاط دیگر اتاق را برای خشک‌کردن پوشش‌دهی بکار می‌برد. در حالی که هوای اتاق سرد ولی بسیار مرطوب است.



شکل ۷-۳۰

در صنایع شیرینی‌سازی، دارویی و شیمیایی اغلب از هوای خشک برای فرآیندهای پوشش‌دهی و خشک کردن محصولات استفاده می‌شود. در این مثال توضیح داده شده است که چگونه هوای تازه از محیط گرفته شده و برای استفاده در دو شرایط مختلف مطبوع‌سازی می‌شود.

۲-۶-۷ گام دوم – تعیین سطح کنترل رطوبت و تلرانس آن

با توجه به برهه زمانی و تقاضای بازار شرکت یکی از دو محصول زیر را با استفاده از جعبه‌های خشک‌کننده تولید می‌کند.

- آجیل با پوشش شکلاتی با پوشش نازکی از شکر
- شیرینی‌های پوشش داده شده-مثل آب‌نبات

این دو محصول همزمان تولید نمی‌شوند و شرایط دمایی و رطوبی هر یک از آن‌ها متفاوت است. محصولات شکلاتی به هوای خنک نیاز دارند، زیرا در غیر این صورت به دلیل گرمای

[1] Candy Coating
[2] Bin drying

تولید شده ناشی از غلت خوردن محصولات در جعبه‌های خشک‌کننده، آرایش خود را از دست می‌دهند (کریستال شدن مجدد[1] بالاتر از نقطه ذوب). از طرف دیگر، شکلات‌های سفت به هوای گرم برای پوشش‌دهی شکر و ایجاد سطح براق و صاف نیاز دارند که یکی از ویژگی‌های اصلی آن‌ها برای بازاریابی است.

تجربیات گذشته نشان می‌دهد که دمای ۶۵°F برای تولید محصولات شکلاتی مناسب است، اما در زمستان دمای ۵۰°F مناسب‌تر است، زیرا در این صورت محصولات سفت‌تر می‌شوند و در حین غلت خوردن در جعبه خشک‌کننده، فرورفتگی کمتری در آن‌ها ایجاد می‌شود. شیرینی‌های سفت نیز به هوا با دمای ۱۲۰°F نیاز دارند تا سطح آن‌ها براق شود.

هر چه هوا خشک‌تر باشد، فرآیند پوشش‌دهی سریع‌تر انجام می‌شود. متاسفانه دو عامل "هزینه سامانه" و "خشک‌کنندگی بیش از حد[2]" میزان خشک بودن هوا را محدود می‌کند. هر چه هوا خشک‌تر باشد، هزینه خرید و راه‌اندازی سامانه بیشتر است. افزون بر این اگر هوا بیش از حد خشک شود، پوشش شکر به صورت بی‌نظم شکل می‌گیرد که در این صورت لایه‌های پوشش ضعیف می‌شوند و به راحتی ترک بر می‌دارند. بدون انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، مهندس نمی‌توان سطح کنترلی را که سریع‌ترین سرعت تولید را بدون بیش از حد خشک شدن ایجاد می‌کند، تعیین کند. این کار در انجام پروژه وقفه می‌اندازد و پروژه تا یک سال به تاخیر می‌افتد.

طی تابستان و زمستان مهندس با اجاره یک رطوبت‌گیر آزمایش‌هایی را برای شرایط خشک‌کنندگی آن انجام می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که شرایط زیر برای هر یک از محصولات مناسب هستند:

- دمای ۵۰°F، رطوبت نسبی ۵۰٪ (۲۷gr/lb) برای محصولات شکلاتی
- دمای ۱۲۰°F، رطوبت نسبی ۹٪ (۴۴gr/lb) برای آب‌نبات‌های سفت
- ۲۵۰cfm هوا برای هر جعبه خشک‌کننده

۷-۶-۳ گام سوم – محاسبه بارهای حرارتی و رطوبی

سامانه موجود باید به طور کامل تغییر یابد. این سامانه هوای سرد را از اتاق می‌گیرد و آن را به هر یک از دوازده جعبه خشک‌کننده می‌دهد. فن‌های خروجی هوا در سقف نصب شده و هوای مرطوب را به خارج از ساختمان می‌فرستند، اما هوای جبرانی برای هوای خروجی از ساختمان وجود ندارد. در این صورت هوا از جاهای دیگر وارد اتاق خواهد شد. به همین دلیل طراح قبل از محاسبه بار اتاق، به الگوی سامانه جدیدی نیاز دارد.

ابتدا مهندس باید تعیین کند که هوای خشک از کجا گرفته می‌شود و آیا هوای مرطوب به خارج از ساختمان داده می‌شود یا به رطوبت‌گیر بازگردانده می‌شود. اگر به رطوبت‌گیر بازگردانده می‌شود، مستقیما از جعبه‌های خشک‌کننده آورده می‌شود و یا ابتدا از جعبه‌ها به اتاق می‌رود و سپس هوای اتاق گرفته شده و به رطوبت‌گیر آورده می‌شود؟ اگر هوا مستقیما از

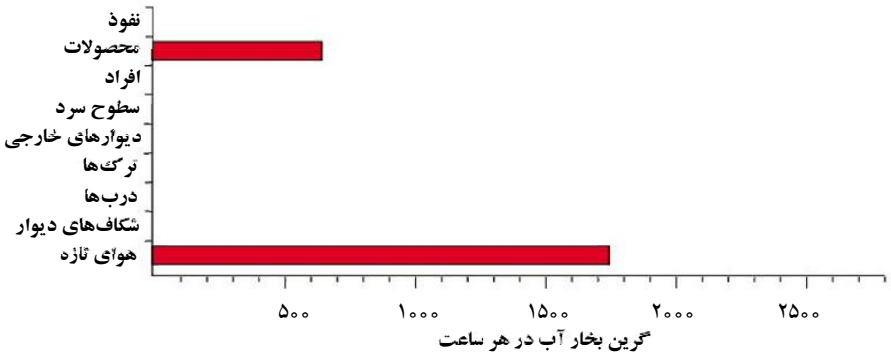
[1] Recrystallize
[2] Over drying

جعبه‌های خشک‌کننده آورده شود، فقط شامل بار رطوبی فرآیند پوشش‌دهی است. اما اگر هوا از اتاق گرفته شود، هم شامل بار محصولات و هم شامل بار رطوبی اتاق خواهد بود.

مهندس دو تصمیم اساسی می‌گیرد: هوا به جای ساختمان از محیط گرفته شود و هوای خروجی نیز مستقیما از جعبه‌های خشک‌کننده به محیط داده شود و هیچ هوایی به رطوبت‌گیر بازگردانده نشود. دلیل این کار این است که تجربه نشان می‌دهد که با گرفتن هوا از ساختمان، بار سرمایشی بیشتری به سامانه در نقاط دیگری که بیش از اندازه خشک می‌شوند، تحمیل می‌شود. با قرار دادن جعبه‌های خشک‌کننده در یک سامانه مستقل که هوای خود را کنترل و تنظیم می‌کند، هم شرایط اتاق و هم شرایط فرآیند پوشش‌دهی بهبود می‌یابد.

با عدم بازگشت هوای خروجی از جعبه‌های خشک‌کننده به رطوبت‌گیر نگهداری سامانه بسیار ساده می‌شود. اگر هوا به رطوبت‌گیر بازگردانده شود، باید از فیلترهای زیادی برای گرفتن ذرات چسبناک و غیر بهداشتی شکر استفاده شود. سامانه‌های دارای فیلتر نیز موجود است، اما تکنسین ماهر برای نگهداری دائم و همیشگی وجود ندارد. همچنین مهندس می‌داند که بودجه کافی برای به خدمت گرفتن افرادی برای نگهداری از سامانه‌های گران‌قیمت دارای فیلتر وجود ندارد.

برای این تصمیم‌گیری، مهندس به شرایط رطوبی هوای محیط در مقایسه با هوای خروجی از فرآیند پوشش‌دهی نیز توجه کرده است؛ مشخص است که اگر هوای خروجی از فرآیند پوشش‌دهی مرطوب‌تر باشد، رطوبت‌گیر انرژی بیشتری را نسبت به رطوبت‌گیری هوای محیط مصرف می‌کند. او در می‌یابد که در نیمی از سال هوای محیط از هوای خروجی از جعبه‌ها خشک‌تر است، بنابراین هوای محیط با هزینه کمتری رطوبت‌گیری می‌شود. با بکارگیری یک سامانه بهینه شده می‌توان مجرای مکش هوا را بین هوای محیط و هوای خروجی از جعبه‌ها (هر کدام که خشک‌تر باشد) تعویض کرد، اما مهندس برای سادگی و کاهش نیاز به نگهداری سامانه از این روش استفاده نمی‌کند.



شکل ۷-۳۱

با توجه به اینکه پس از رطوبت‌گیری از جعبه‌ها هوا به سامانه بازگردانده نمی‌شود، بار رطوبی فضا فقط ناشی از بار رطوبی هوای تازه و رطوبت محصولات مرطوب است.

این تصمیم‌ها محاسبات بار رطوبی را ساده می‌کند. بارهای رطوبی و حرارتی فقط ناشی از هوای محیط است. هیچ بار رطوبی و حرارتی مربوط به اتاق، افراد یا ورودی‌ها وجود ندارد. سامانه باید هوای تازه را گرفته و آن را در دمای $۱۲۰^{o}F$ و رطوبت ۴۴gr/lb برای شیرینی سفت و در $۵۰^{o}F$ و ۲۷gr/lb برای آجیل با پوشش شکلاتی منتقل کند.

بار حرارتی محسوس شامل سه جزء می‌شود:

- بار حرارتی محسوس ناشی از غلت خوردن محصولات در جعبه‌های خشک‌کننده.
- بار حرارتی محسوس هوای تازه.
- گرمای نهان هوای تازه که در رطوبت‌گیر به بار حرارتی محسوس تبدیل می‌شود.

تجربه نشان داده است که می‌توان بار حرارتی ناشی از محصولات را با استفاده از هوای فراهم شده برای پوشش شکلاتی با دمای $۵۰^{o}F$ دفع کرد. بار حرارتی محسوس هوای محیط برابر با اختلاف بین دمای طراحی تابستان و دمای $۵۰^{o}F$ منتقل‌شده به جعبه‌های خشک‌کننده است که برابر با ۱۳۳۰۰۰Btu/h می‌باشد. بار حرارتی نهان هوای تازه در رطوبت‌گیر متناسب با مقدار رطوبت گرفته شده به بار محسوس تبدیل می‌شود. هر چه رطوبت بیشتری گرفته شود، هوا گرم‌تر می‌شود. پس از اینکه مهندس اندازه رطوبت‌گیر را تعیین نمود، بار حرارتی فرآیند رطوبت‌گیری مشخص می‌شود.

در زمستان نیز بار حرارتی محسوس وجود دارد، زیرا شیرینی سفت به هوا با دمای $۱۲۰^{o}F$ نیاز دارد. در این مثال شرایط طراحی در زمستان $۱۱^{o}F$ است، بنابراین سامانه باید به مقدار محاسبه شده گرمایش تامین کند:

$$\text{بار گرمایش} = ۳۰۰۰ * ۱/۰۸ * \left(۱۲۰ - ۱۱\right) = ۳۵۳۱۶۰Btu/h \qquad ۱۴-۷$$

که

۳۰۰۰: کل جریان هوا به جعبه‌های خشک‌کننده (cfm)

۱/۰۸: گرمای مخصوص هوا (Btu بر ساعت بر درجه فارنهایت)

(۱۱-۱۲۰): اختلاف دمای هوای تازه در زمستان و هوای منتقل شده به جعبه‌های خشک‌کننده به (^{o}F)

در تئوری به دلیل اینکه رطوبت هوای محیط از شرایط ایده‌آل برای محصولات یعنی رطوبت ۲۷gr/lb و ۴۴gr/lb کمتر است، شاید به رطوبت‌زنی هوای تازه احتیاج باشد. اما در واقع تا به حال هیچ مشکلی با خشکی بیش از حد در زمستان به وجود نیامده است و بنابراین مهندس بار رطوبت‌زنی را در نظر نمی‌گیرد.

۷-۶-۴ گام چهارم – تعیین اجزا برای گرفتن بار های رطوبی و حرارتی

با توجه به اینکه رطوبت‌گیرهای دسیکنت رطوبت هوا را به حرارت محسوس تبدیل می‌کنند، قبل از آن که سامانه تبرید مشخص شود، ابتدا باید رطوبت‌گیر انتخاب شود و عملکرد آن تعیین گردد. اندازه رطوبت‌گیر به دما و رطوبت هوای ورودی بستگی دارد. از لحاظ اقتصادی بهتر است که هوای تازه قبل از ورود به رطوبت‌گیر پیش‌سرد و رطوبت‌گیری شود. حال این سوال پیش می‌آید که چه مقدار پیش‌سرد کردن مناسب است؟

پاسخ سوال به این بستگی دارد که آیا هزینه انرژی حرارتی مورد استفاده در فرآیند احیا رطوبت‌گیر دسیکنت از هزینه برق سامانه تبرید بیشتر است یا خیر. وقتی هزینه انرژی احیا زیاد

نیست، رطوبت‌گیر دسیکنت می‌تواند با هزینه کم رطوبت هوا را بگیرد. هزینه نصب سامانه افزایش می‌یابد، اما این هزینه بیشتر با صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری در عرض چند ماه جبران می‌شود. متقابلا اگر هزینه انرژی احیا زیاد باشد، تا آنجا که امکان دارد باید بار حرارتی را با استفاده از رطوبت‌گیرهای سرمایشی جدا کرد و در این صورت هزینه نصب و راه‌اندازی سامانه کمتر می‌شود.

در این مثال مهندس در نظر دارد که از حرارت تلف شده سامانه‌های تولید همزمان برای فرآیند احیا رطوبت‌گیر استفاده کند که در نتیجه هزینه بهره‌برداری سامانه رطوبت‌گیری تقریبا ناچیز خواهد بود. بنابراین به اندازه سرمایش مورد نیاز محصولات شکلاتی برای انتقال هوا با رطوبت ۲۷gr/lb پیش‌سرمایش نیاز است.

مهندس به منحنی عملکرد رطوبت‌گیر شانه زنبوری چرخان موجود در پیوست توجه می‌کند. با توجه به اینکه به ۳۰۰۰cfm هوا نیاز است، مهندس یک رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۷٫۵sq.ft انتخاب می‌کند و سپس منحنی عملکرد را از انتها به ابتدا می‌خواند. ۳۰۰۰cfm هوا در این رطوبت‌گیر با سرعت ۴۰۰ft/min حرکت می‌کند (۳۰۰۰÷۷/۵=۴۰۰). با شرایط خروجی مطلوب یعنی ۲۷gr/lb شروع کرده و سپس به سمت چپ به سرعت ۴۰۰ft/min روی منحنی عملکرد می‌رویم. سپس به ترتیب به طور عمودی به خط دمای ۱۹۰°F احیا و به سمت راست تا خط دمای ورودی ۶۵°F و به سمت پایین به شرایط ورودی حرکت می‌کنیم که در نتیجه به مقدار رطوبت ۹۵gr/lb می‌رسیم. این بدین معنی است که اگر دمای هوای ورودی به رطوبت‌گیر بیشتر از ۶۵°F و رطوبت آن بیشتر از ۹۵ گرین نباشد، رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۷٫۵sq.ft می‌تواند هوا را با رطوبت ۲۷gr/lb منتقل کند.

مهندس از دمای احیا ۱۹۰°F استفاده می‌کند، زیرا دمای آب خروجی از سامانه تولید همزمان ۲۰۰°F است و در نتیجه بیشترین دمای احیا ۱۹۰°F است. در نهایت مهندس دمای هوای ورودی را ۶۵°F در نظر می‌گیرد، زیرا در این حالت مرطوب‌ترین شرایط هوای ورودی اتفاق می‌افتد. در واقع اگر هوا تا ۶۵°F پیش‌سرد شود، اشباع خواهد شد و ۹۳gr/lb رطوبت خواهد داشت.

در این صورت مشخص می‌شود که کویل پیش‌سرمایش چه کاری باید انجام دهد؛ باید هوا را از شرایط طراحی تابستان در دمای ۹۱°F و رطوبت ۱۴۶gr/lb به دمای ۶۵°F و رطوبت ۹۲gr/lb برساند.

$$\text{پیش‌سرمایش} = \frac{۳۰۰۰ * ۴/۵ * (۴۵ - ۳۰)}{۱۲۰۰۰} = ۱۶/۹ \text{ تن تبرید} \qquad ۱۷-۷$$

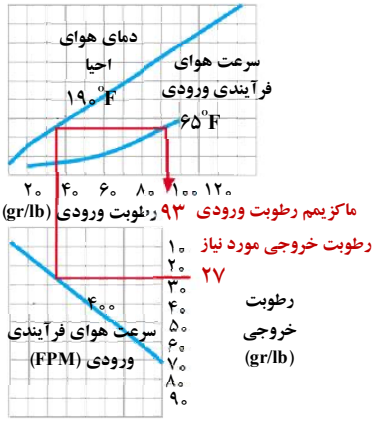
که

۸۰۰: جریان هوای تازه از محیط (cfm)

۴/۵: جریان هوا (cfm/hr)

(۳۰–۴۵): اختلاف آنتالپی هوای ورودی و خروجی کویل سرمایشی (Btu/lb)

۱۲۰۰۰: هر تن تبرید



شکل ۷-۳۲

در این مثال مهندس باید مقدار پیش‌سرمایش هوا قبل از ورود به رطوبت‌گیر را کمینه سازد. او با شرایط رطوبی که می‌داند باید به جعبه‌های خشک‌کن فرستاده شود، شروع می‌کند و به صورت معکوس به بیشینه دما و رطوبت مجاز برای ورود به رطوبت‌گیر برای شرایط خروجی مورد نظر دست می‌یابد.

سرمایش مورد نیاز در پایین‌دست رطوبت‌گیر به افزایش دمای هوا در سمت هوای فرآیندی رطوبت‌گیر بستگی دارد که به صورتی که در پیوست نیز نشان داده شده است، محاسبه می‌شود:

۱۶-۷ دمای هوای خروجی از هوای فرآیندی

$$= ۶۵ + ۰/۶۲۵\left(۹۲ - ۲۷\right) + ۰/۱\left(۱۹۰ - ۶۵\right)$$
$$= ۱۱۸^{\circ}F$$

که

۶۵: دمای هوای ورودی به هوای فرآیندی (cfm)

۰/۶۲۵: ثابت تبدیل رطوبت به دما (^{o}F بر gr/lb)

(۹۲-۲۷): رطوبت گرفته شده به کمک رطوبت‌گیر (gr/lb)

۰/۱: ضریب حرارت حمل‌شده (بی بعد)

(۱۹۰-۶۵): اختلاف دمای بین هوای ورودی به قسمت فرآیندی و هوای ورودی به احیا (^{o}F)

۱۷-۷ $$\text{سرمایش ثانویه} = \frac{۳۰۰۰ * ۱/۰۸ * \left(۱۱۸ - ۵۰\right)}{۱۲۰۰۰} = ۱۸/۴ \text{ تن تبرید}$$

که

۳۰۰۰: جریان هوا به جعبه‌های خشک‌کننده (cfm)

۱/۰۸: Btu/h بر هر فوت مکعب هوا در دقیقه

(۱۱۸-۵۰): اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کویل سرمایشی (^{o}F)

۱۲۰۰۰: هر تن تبرید

۷-۶-۵ گام پنجم – انتخاب سامانه کنترلی

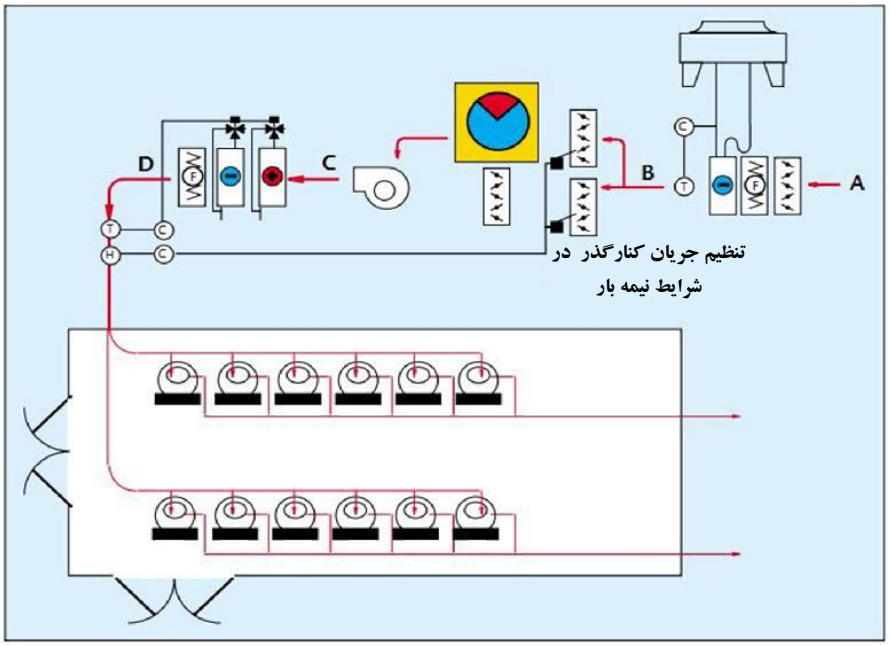
دما و رطوبت برای پاسخگویی به نیاز هر دو محصول باید کنترل شود. مصرف انرژی تجهیزات نیز باید متناسب با بار موجود تنظیم شود تا از اتلاف انرژی جلوگیری گردد.

کنترل رطوبت از طریق مجموعه‌ای از دمپرهای تنظیم‌کننده حاصل می‌شود که زمانی‌که بار رطوبی کم است، هوا را از مسیر کنارگذر عبور می‌دهند. رطوبت باید در دو نقطه ثابت کنترل شود: ۲۷gr/lb و ۴۴gr/lb. در حالی که این دو مقدار در رطوبت مطلق بسیار به هم نزدیک‌اند، در رطوبت نسبی کاملا از هم دور هستند. چون ۲۷گرین رطوبت در دمای $۵۰^{o}F$ منتقل می‌شود، نشان‌دهنده رطوبت نسبی ٪۵۰ است. ۴۴ گرین رطوبت نیز در $۱۲۰^{o}F$ منتقل می‌شود که در نتیجه نشان‌دهنده رطوبت نسبی ٪۹ است. حسگرهای رطوبت نسبی در مکانی که کالیبره می‌شوند و به طور مداوم کار می‌کنند، عملکرد خوبی دارند. اما اگر موقعیت آن‌ها تغییر کند، دوباره باید کالیبره شوند. افزون بر این برای اندازه‌گیری در رطوبت نسبی کمتر از ٪۱۰ دقت حسگرهای رطوبت نسبی از دیگر حسگرها کمتر است.

مهندس تصمیم می‌گیرد که به جای رطوبت نسبی دمای نقطه شبنم را کنترل کند و بدین

منظور از یک حسگر و کنترل‌کننده دمای نقطه شبنم نوری استفاده می‌کند. چون دمای هوا بسیار زیاد است، برای اطمینان از دقت و صحت اندازه‌گیری، حسگر نوری با ظرفیت سرمایش اضافی بکار برده می‌شود. همچنین حسگر با فاصله کافی در پایین‌دست رطوبت‌گیر دسیکنت نصب می‌شود، زیرا در مقطع چرخ دسیکنت شرایط رطوبی بسیار متفاوت است. مکان مناسب‌تر برای نصب حسگر، نصب آن دقیقا قبل از ورود هوا به کانال‌های توزیع است، زیرا در این مکان رطوبت و دمای هوا بسیار یکنواخت است.

موقعیت	جریان هوا (cfm)	دما (^{o}F)	رطوبت (gr/lb)
A	۳۰۰۰	۹۱	۱۴۶
B	۳۰۰۰	۶۵	۹۲
C	۳۰۰۰	۱۱۸	۲۷
D	۳۰۰۰	۵۰	۲۷



شکل ۷-۳۳

برای رطوبت‌گیر یک مسیر کنارگذر برای عبور هوا تعبیه شده است که در صورت خشک‌تر بودن هوای تازه نسبت به شرایط طراحی در نظر گرفته شده ظرفیت سامانه رطوبت‌گیری کاهش می‌یابد. مقاومت دمپرهای ثابت تعبیه شده در مسیر کنارگذر در برابر عبور هوا با مقاومت دمپر نصب شده در بستر دسیکنت برابر است. در نتیجه امکان تنظیم جریان هوا از رطوبت‌گیر و مسیر کنارگذر فراهم می‌شود.

دمپرهای ثابت نصب شده در ورودی سامانه برای مهندس امکان تنظیم جریان هوای سامانه را به طور دقیق فراهم می‌کند، در نتیجه تغییرات جریان هوا با تغییرات دما و فشار هوای محیط بسیار ناچیز است.

دمای جریان هوا در دو قسمت، قبل و بعد از رطوبت‌گیر، کنترل می‌شود. هوا برای رطوبت‌گیری جزئی، پیش‌سرد می‌شود. این کویل سرمایش از نوع انبساط مستقیم است که کندانسور مجزایی دارد. این کار ظرفیت سامانه آب خنک مرکزی را آزاد می‌کند. سامانه پیش‌سرمایش با یک کنترل‌کننده و حسگر دما کنترل می‌شود. این حسگر در دمای ۶۵^{o}F تنظیم شده است. هرگاه دمای هوا بیشتر از ۶۵^{o}F شود، سامانه هوای ورودی را سرد و رطوبت‌گیری می‌کند.

کویل سرمایش ثانویه توسط سامانه آب خنک مرکزی تغذیه می‌شود. برای اطمینان از اینکه آب درون کویل‌ها در زمستان یخ نمی‌زند، مهندس کویل سرمایشی را پایین‌دست کویل گرمایشی قرار می‌دهد. در تئوری، با نگهداری سامانه و تخلیه آب سامانه در زمستان می‌توان از یخ‌زدگی کویل‌ها جلوگیری کرد. اما طراح می‌داند که تغییرات آب و هوایی سریع‌تر از این اتفاق می‌افتد که پرسنل نگهداری بتوانند کویل‌ها را تخلیه و دوباره پر کنند. کویل گرمایش ثانویه همانند کویل‌های گرمایشی فرآیند احیا رطوبت‌گیر، حاوی آب ۲۰۰^{o}F حاصل از سامانه‌های تولید همزمان هستند.

هم کویل سرمایش ثانویه و هم کویل گرمایش ثانویه با استفاده از شیرهای سه-راهه کنترل می‌شوند و جریان آن‌ها در پاسخ به حسگر دما و کنترل‌کننده نوری دمای نقطه شبنم تنظیم

می‌شود. یکی دیگر از مزایای چنین سامانه گران‌قیمتی این است که سطح کنترل رطوبت و دما را می‌توان در قسمت کنترل تنظیم کرد و نیازی به فرستادن تکنسین به داخل کانال‌ها نیست.

چون تغییرات بار رطوبی هوای محیط بسیار زیاد است، انرژی مورد نیاز رطوبت‌گیر نیز بسیار متغیر است. رطوبت‌گیر باید به طور خودکار انرژی مصرفی را متناسب با این تغییرات کمتر کند. اهمیت این موضوع در تابستان کمتر است، زیرا حرارت زیادی از سامانه‌های تولید همزمان وجود دارد. اما در زمستان تمام انرژی حرارتی برای ایجاد شرایط آسایش و گرمایش مورد نیاز است.

انرژی احیا رطوبت‌گیر با تغییر جریان هوای گرم کویل‌های گرمایش در پاسخ به حسگر و کنترل کننده دما که در جریان هوای خروجی از رطوبت‌گیر نصب شده است، کنترل می‌شود. کنترل کننده در دمای $۱۲۰^{\circ}F$ تنظیم شده است. بیشتر شدن دمای هوا از این مقدار به معنی این است که رطوبت کمتری در هوای فرآیندی جذب شده است و می‌توان انرژی احیا را کاهش داد.

۷-۶-۶ ملاحظات دیگر

۷-۶-۶-۱ جلوگیری از یخ‌زدگی

در این پروژه انرژی حرارتی سامانه‌های تولید همزمان برای گرمایش هوا و فرآیند احیا بکار برده می‌شود. در زمستان خطر یخ‌زدگی آب‌های درون کویل‌ها وجود دارد که موجب ترکیدن آن‌ها می‌شود. برای جلوگیری از بروز این مشکل می‌توان به جای اینکه هوا مستقیما از هوای محیط گرفته شود، هوا را از یک موتورخانه گرم گرفت. همچنین می‌توان به کمک هیتر الکتریکی و یا گاز طبیعی هوای محیط را قبل از ورود به رطوبت‌گیر پیش‌گرم کرد. در هر صورت سامانه‌های گرمایش با آب گرم در آب و هوای سرد در معرض یخ‌زدگی هستند و اقدامات لازم برای جلوگیری از بروز این مشکل باید انجام شود.

۷-۶-۶-۲ مکان نصب فن هوا

در این مثال فن هوا در پایین‌دست رطوبت‌گیر دسیکنت نصب شده است. در این صورت هوای رطوبت‌گیری شده و هوای گذرنده از مسیر کنارگذر به خوبی ترکیب می‌شوند، اما کانال میان فن و رطوبت‌گیر تحت فشار منفی نسبت به هوای مرطوب محیط قرار می‌گیرد. این فشار منفی موجب نشت هوا از درزهای کانال و از پوشش رطوبت‌گیر می‌شود و در صورتی که فن در قسمت ذکر شده نصب شود، کانال و رطوبت‌گیر باید کاملا درزبندی شوند. با نصب فن در بالادست رطوبت‌گیر دسیکنت از مشکلات نشت هوا جلوگیری می‌شود، اما در این صورت باید مراقب بود که از دمیدن هوا به طور مستقیم به چرخ‌های دسیکنت جلوگیری شود. در غیر این صورت هوا در مواقع مورد نیاز از مسیر کنارگذر عبور نخواهد کرد.

۷-۶-۶-۳ پیش‌سرمایش

یکی از دلایل منطقی برای استفاده از حداقل پیش‌سرمایش در خشک‌کردن محصولات نیاز به هوای خشک با درجه حرارت بالا است. اینکه رطوبت‌گیر بار رطوبی را به بار حرارتی محسوس تبدیل می‌کند، سودمند است. با این حال اگر فقط رطوبت‌گیری محصولات شکلاتی حساس به حرارت مطرح باشد، می‌توان هزینه نصب و راه‌اندازی را با پیش‌سرمایش هوا تا حداکثر میزان

ممکن کاهش داد. ظرفیت سامانه تبرید را تا قبل از ایجاد مشکل یخ‌زدگی با هزینه کمتری نسبت به ظرفیت سامانه رطوبت‌گیری می‌توان افزایش داد. حداکثر میزان عملی سرد کردن هوای محیط قابل بحث است. اکثر مهندسان موافق‌اند که با استفاده از سامانه‌های تبرید انبساط مستقیم به دمای $45^{o}F$ و با استفاده از سامانه‌های آب-گلیکول به دمای $40^{o}F$ می‌توان رسید، اما در این صورت کویل‌های سرمایشی زیادی مورد نیاز است و مقاومت در برابر جریان هوا بسیار زیاد خواهد بود.

۷-۶-۶-۴ شرایط بهینه طی فرآیند رطوبت‌گیری تغییر می‌کند

در این مثال چون اندازه، شکل، نوع پوشش‌دهی و میزان خشک بودن مورد نیاز محصولات مشابه است، جریان هوا، دما و رطوبت ثابت می‌ماند. اما در کاربردهای خشک‌کنندگی که به دما حساس هستند، مثل ریخته‌گری دقیق، فیله ماهی‌ها و دانه‌ها، برای جلوگیری از خشک‌کنندگی بیش از حد باید دما، سرعت و رطوبت هوا را در فرآیند رطوبت‌گیری کنترل کرد. هنگامی‌که کنترل دقیق لازم است، مهندس می‌تواند برای دستیابی به بهترین نتایج کنترل‌های پیشرفته‌ای برای تنظیم خودکار مقدار رطوبت و دمای هوا طی رطوبت‌گیری نصب کند.

۷-۶-۶-۵ جریان هوای کل سامانه

در بسیاری از کاربردهای خشک‌سازی محصولات به دلیل نیاز به سرعت بالا در تمام سطوح محصول جریان هوای سامانه زیاد خواهد بود، اما نیازی نیست که کل هوا رطوبت‌گیری شود. برای مثال فرض کنید که به جای شیرینی‌های کوچک در جعبه‌های خشک‌کننده کوچک، هدف خشک‌کردن یک "درخت کریسمس" بزرگ ریخته‌گری شده در فضایی به طول $75'$، عرض $50'$ و ارتفاع $18'$ است. بار رطوبی ممکن است ۵۰ پوند بخار آب در هر ساعت باشد. رطوبت‌گیر در مقایسه با جریان هوای مورد نیاز برای ایجاد سرعت بالا روی سطوح پیچیده این محصول، کوچک خواهد بود. در چنین مواردی بهتر است فن‌هایی بزرگ برای چرخش هوا در فضا بکار برده شود و رطوبت‌گیر فقط بخش کوچکی از هوای در چرخش را رطوبت‌گیری کند.

۷-۶-۷ منابع- سامانه‌های خشک‌کننده محصولات

[1] Chapter 36 — Photographic materials
Chapter 38 — Drying and storing farm crops
Chapter 44 — Industrial drying systems
ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Applications 1987. American Society of Heating, Air Conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE) 1791 Tullie Circle, NE. Atlanta, GA. 30329 USA Dryer Handbook, APV Anhydro Division. 165 John Deitsch Square, Attleboro Falls, MA. 02763 USA

[2] Hall, Carl W., P.E., Drying and Storage of Agricultural Crops. 1980 AVI Division, Van Nostrand Reinhold Publishing 7625 Empire Drive, Florence, KY. 41042-9979 USA

[3] Iglesias, Hector A. and Chirife, Jorge. Handbook of Food Isotherms 1982. Academic Press, 111 Fifth Avenue, NY, NY. 10003 USA

[4] Jones, David M. Factors to consider in fluid-bed drying. Pharmaceutical Technology, April 1985 Aster Publishing Corporation. 859 Willamette St. Eugene, OR. 97440-2460 USA

[5] Van Arsdel, Wallace B. Food Dehydration, Second Edition, Volume I. 1973. AVI Division, Van Nostrand Reinhold Publishing 7625 Empire Drive, Florence, KY. 41042-9979 USA.

۸ بهینه‌سازی سامانه‌های ترکیبی

چون راه‌های جایگزین زیادی برای انجام یک میزان مشخص رطوبت‌گیری وجود دارد، در این فصل سامانه‌های رطوبت‌گیری برای ساختمان‌ها و فضاهای بزرگ را با جزئیات بیشتری بررسی خواهیم کرد.

هدف اصلی تعیین ترکیب بهینه سامانه تبرید و رطوبت‌گیری برای دستیابی به کمترین هزینه اولیه و هزینه بهره‌برداری ممکن در یک شرایط خاص است. پنج الگوی ممکن را برای یک شرایط معین بررسی و هزینه اولیه و هزینه بهره‌برداری هر یک از سامانه‌ها را برای هر الگو تعیین می‌کنیم.

معادلات و محاسبات انجام شده در این فصل با این فرض نوشته شده است که خواننده کتاب با اصول کلی گرمایش و تهویه مطبوع ساختمان و روابط مربوط به آن‌ها آشنایی دارد. در غیر این صورت پیشنهاد می‌شود که خواننده ابتدا فصل دوم و فصل هفتم این کتاب را مطالعه کند.

۸-۱ تشریح مثال نمونه

سامانه‌های کنترل رطوبت ساختمان‌ها اغلب شامل سرمایش و گرمایش و همچنین رطوبت‌زنی و رطوبت‌گیری می‌شود. چون اغلب سرمایش با استفاده از سامانه تبرید حاصل می‌شود، مهندس می‌تواند از این تجهیزات برای رطوبت‌گیری نیز استفاده کند. در این صورت سوالاتی به این شکل مطرح می‌شود که: تناسب بین تجهیزات تبرید و رطوبت‌گیری چگونه است و چیدمان سامانه‌ها برای دستیابی به حداکثر میزان بهره چگونه باید باشد؟ شرایط زیر را بررسی می‌کنیم:

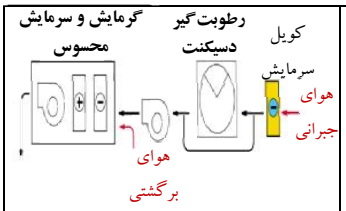
جدول ۸-۱

هدف پروژه	جلوگیری از مسدود شدن ماشین‌آلات بسته‌بندی آب‌نبات طی تولید ماکزیمم در تابستان
سطح کنترلی	$۷۰^{o}F \pm ۳^{o}F$ دمای نقطه شبنم $۳۵^{o}F$ (۳۰gr/lb) +۰ gr، -۱۰gr
بار حرارتی داخلی	۱۰۰۰۰۰Btu/h
بار رطوبی داخلی	۱۸۱۸۰۰gr/hr
هوای جبرانی	۴۰۰scfm در $۹۵^{o}F$ و ۱۴۰gr/lb (آنتالپی ۴۴٫۹Btu/lb)
حداقل دمای هوا	$۵۵^{o}F$
سرمایش مورد نیاز	آب خنک در دمای $۴۵^{o}F$؛ معادل $۱۰^{o}F$ اختلاف دما بین هوا و سیال خنک‌کن

در این مثال سطح رطوبت کنترلی کمتر از آن است که با استفاده از سامانه تبرید حاصل شود و برای ایجاد شرایط تعیین شده به سامانه رطوبت‌گیری دسیکنت نیاز است. حالات مختلفی برای سامانه‌ها وجود دارد که در زیر چهار مورد را بررسی می‌کنیم.

سامانه ۱

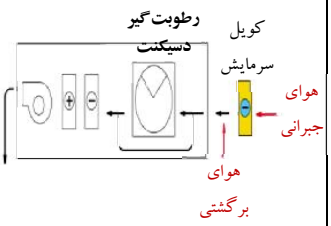
هوای جبرانی قبل از آنکه با هوای برگشتی ترکیب شود، خنک شده و سپس رطوبت‌گیری می‌شود. وقتی سامانه رطوبت‌گیری به هوای جبرانی زیادی احتیاج دارد، هزینه نصب و راه‌اندازی این سامانه بسیار کمتر است.



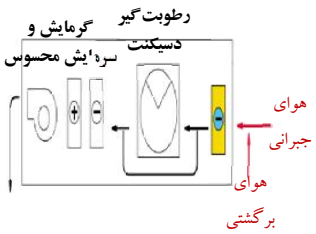
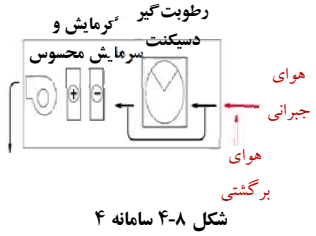
شکل ۸-۱ سامانه ۱

سامانه ۲

هوای جبرانی خنک شده و قبل از آنکه رطوبت‌گیری شود، با هوای برگشتی از اتاق ترکیب می‌شود. اگر هوای جبرانی مورد نیاز برای سامانه فراهم نباشد تا رطوبت‌گیری به طور کامل با استفاده از سامانه ۱ صورت گیرد، اغلب این سامانه با صرفه‌ترین گزینه خواهد بود.



شکل ۸-۲ سامانه ۲

سامانه ۳ قبل از خنک‌سازی و رطوبت‌گیری، هوای جبرانی با هوای برگشتی از اتاق ترکیب می‌شود. هوای سرد عملکرد رطوبت‌گیر را بهبود می‌دهد، موجب افزایش ظرفیت سامانه می‌شود و در بیشتر موارد استفاده از سامانه کوچک‌تر را برای طراح امکان‌پذیر می‌کند.	 شکل ۸-۳ سامانه ۳
سامانه ۴ هوای جبرانی و برگشتی از اتاق ترکیب شده و بدون آنکه خنک شود، رطوبت‌گیری می‌شود. اگر هوای جبرای بار رطوبی زیادی نداشته باشد، ممکن است پیش‌سرمایش قبل از رطوبت‌گیر مناسب نباشد.	 شکل ۸-۴ سامانه ۴

۸-۱-۱ سامانه ۱- فقط خشک کردن هوای جبرانی[1]

این سامانه را می‌توان به سرعت و بدون محاسبات دقیق یا انتخاب اجزا مورد بررسی قرار داد. فرض کنید می‌توان هوانی جبرانی را تا یک گرین بر پوند رطوبت‌گیری کرد. در این صورت می‌توان به اندازه مقدار زیر رطوبت از فضا گرفت:

$$\text{میزان رطوبت‌گیری} = ۴۰۰ * ۴/۵ * \left(۳۰ - ۱\right) = ۵۲۲۰۰ gr/hr \qquad ۸-۱$$

با توجه به اینکه بار رطوبی برابر با ۱۸۱۰۰۰ gr/hr است، آشکار است که فقط هوای جبرانی خشک کافی نیست. اما در شرایط دیگر مثلا در اتاق تمیزی که مقدار هوای جبرانی زیادی مورد نیاز است و یا بار رطوبی داخل فضا کم است، اغلب بهترین راهکار رطوبت‌گیری هوای بیرونی است. این مورد در بسیاری از ساختمان‌های تجاری که سطح رطوبت کنترلی بالاست و ظرفیت رطوبت‌گیری زیاد است نیز صادق است که هر فوت مکعب هوای خشک جبرانی ظرفیت بیشتری برای دفع رطوبت دارد. اما در این مثال هوای جبرانی که فقط رطوبت‌گیری شده است، به هیچ وجه کافی نخواهد بود.

۸-۱-۲ سامانه ۲- پیش‌سرد کردن هوای جبرانی و رطوبت‌گیری هوای مخلوط‌شده

با استفاده از سامانه‌های آبسردکن موجود می‌توان هوا را تا دمای $۵۵^{\circ}F$ پیش‌سرد کرد و سپس آن را با هوای برگشتی[2] ترکیب کرد. در این حالت رطوبت‌گیر باید بار رطوبی هوای داخلی و هوای جبرانی را بگیرد و بار رطوبی کل برابر با بار رطوبی داخلی و بار رطوبی هوای محیط است:

$$\text{بار کل} = ۱۸۱۸۰۰ + \left[(۴/۵ * ۴۰۰ * \left(۶۴ - ۳۰\right)\right] \qquad ۸-۲$$
$$= ۲۴۳۰۰۰ gr/hr$$

[1] Make-up air
[2] Return air

برای تعیین عملکرد رطوبت‌گیر دما و رطوبت هوای ورودی به آن را باید بدانیم و برای تعیین این مقادیر باید تعیین کنیم که چه مقدار هوای برگشتی با هوای جبرانی ترکیب شده است. مقدار هوای مخلوط‌شده[1] نیز به تجهیزات تبرید و حداقل دمای مجاز فضا بستگی دارد. بدین منظور حداقل دمای مجاز فضا ۵۵°F فرض می‌شود. اکنون می‌توان حجم هوای کل مورد نیاز برای گرفتن بار حرارتی را به شکل زیر محاسبه کرد.

$$\text{جریان هوای تهویه کل} = ۱۰۰۰۰۰ \div \left[۱/۰۸ * \left(۷۰ - ۵۵\right)\right] = ۶۱۷۳scfm \qquad ۳-۸$$

بنابراین شرایط هوای مخلوط‌شده که وارد رطوبت‌گیر می‌شود، به صورت زیر خواهد بود:

هوای جبرانی	۴۰۰scfm در دمای ۵۵°F و رطوبت ۶۴gr/lb
هوای برگشتی	۵۷۷۳scfm در دمای ۷۰°F و رطوبت ۳۰gr/lb
کل	۶۱۷۳scfm در دمای ۶۹°F و رطوبت ۳۲gr/lb

انتخاب اندازه مناسب رطوبت‌گیر فرآیندی تکراری است و طراح باید کوچک‌ترین رطوبت‌گیر ممکن برای گرفتن ۱۸۱۸۰۰gr/hr بار رطوبی را تعیین کند. با استفاده از اطلاعات موجود برای رطوبت‌گیر شانه زنبوری چرخان که در پیوست ارائه شده است، طراح یک رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۳٫۷۵sq.ft برای رطوبت‌گیری ۲۲۵۰scfm هوا با سطح رطوبت ۶٫۲gr/lb انتخاب می‌کند. عملکرد این سامانه به صورت زیر است:

شرایط هوای ورودی: ۲۲۵۰scfm هوا با دمای ۶۹°F و رطوبت ۳۲gr/lb

سرعت هوا: $\frac{۲۲۵۰}{۳/۷۵} = ۶۰۰\ fpm$

محتوای رطوبت خروجی: ۶٫۲gr/lb

میزان رطوبت‌گیری: $۴/۵ * ۲۲۵۰ * \left(۳۲ - ۶/۲\right) = ۲۶۱۲۲۵gr/lb$

افزایش دمای هوای فرآیندی: $۰/۶۲۵ * \left(۳۲ - ۶/۲\right) + \left[۰/۰۷ * \left(۲۵۰ - ۶۹\right)\right] = ۲۸/۸°F$

دمای هوای فرآیندی خروجی: $۶۹ + ۲۸/۸ = ۹۷/۸°F$

حجم هوای احیا: $۲۲۵۰ * \left[\frac{۹۷/۸-۶۹}{۲۵۰-۱۲۰}\right] = ۵۰۰scfm$

انرژی فرآیند احیا: $۵۰۰ * \left[\left(۲۵۰ - ۹۵\right) * ۱/۰۸\right] = ۸۳۷۰۰Btu/h$

بار حرارتی محسوس شامل بار حرارتی داخلی و بار حرارتی فرآیند رطوبت‌گیری می‌شود:

$$\text{بار حرارتی کل} = ۱۰۰۰۰۰ + \left[۱/۰۸ * ۲۲۵۰ * \left(۹۷/۹ - ۷۰\right)\right] = ۱۶۷۷۹۷scfm \qquad ۴-۸$$

سرمایش مورد نیاز برابر با مجموع این بار حرارتی و سرمایش مورد نیاز برای سرد کردن هوای جبرانی است:

[1] Combined air

$$\text{سرمایش کل} = ۱۶۷۷۹۷ + \left[۴/۵ * ۴۰۰ * \left(۴۴/۹ - ۲۳/۱\right)\right] = ۲۰۷۰۳۷scfm \qquad ۵-۸$$

که در نتیجه مشخصات سامانه به صورت زیر به دست می‌آید:

ظرفیت سرمایش: ۱۷٫۲ تن تبرید

اندازه رطوبت‌گیر: سطح مقطع ۳٫۷۵sq.ft

انرژی مورد نیاز فرآیند احیا: ۸۳۷۰۰Btu/hr

۸-۱-۳ سامانه ۳- پیش‌سرد کردن هوای مخلوط‌شده قبل از ورود به رطوبت‌گیر

هوای جبرانی با هوای برگشتی از اتاق ترکیب شده و سپس هوای مخلوط‌شده قبل از ورود به رطوبت‌گیر پیش‌سرد می‌شود. در این حالت چون رطوبت هوای جبرانی گرفته نشده است، بار رطوبی رطوبت‌گیر بیشتر می‌شود:

$$\text{بار رطوبی} = ۱۸۱۸۰۰ + \left[۴/۵ * ۴۰۰ * \left(۱۴۰ - ۳۰\right)\right] = ۳۷۹۸۰۰gr/hr \qquad ۶-۸$$

شرایط هوای ورودی به کویل سرمایش به صورت زیر است:

هوای جبرانی	۴۰۰scfm در دمای ۹۵°F و رطوبت ۱۴۰gr/lb
هوای برگشتی	۵۷۷۳scfm در دمای ۷۰°F و رطوبت ۳۰gr/lb
کل	۶۱۷۳scfm در دمای ۷۱/۶°F و رطوبت ۳۷gr/lb

همانند قبل، طراح یک فرآیند آزمون و خطا برای انتخاب رطوبت‌گیر انجام می‌دهد. در این شرایط به رطوبت‌گیر بزرگ‌تری نیاز است و می‌توان یک رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۷٫۵ به جای ۳٫۷۵sq.ft انتخاب کرد که عملکرد آن به صورت زیر است:

شرایط هوای ورودی: ۲۵۰۰scfm هوا با دمای ۵۵°F و رطوبت ۳۷gr/lb

$$\text{سرعت هوا: } \frac{۲۵۰۰}{۷/۵} = ۳۳۳fpm$$

محتوای رطوبت خروجی: ۱٫۵gr/lb

$$\text{میزان رطوبت‌گیری: } ۴/۵ * ۲۵۰۰ * \left(۳۷ - ۱/۵\right) = ۳۹۹۳۷۵gr/lb$$

$$\text{افزایش دمای هوای فرآیندی: } ۰/۶۲۵ * \left(۳۷ - ۱/۵\right) + \left[۰/۰۶ * \left(۲۵۰ - ۵۵\right)\right] = ۳۳/۹°F$$

$$\text{دمای هوای فرآیندی خروجی: } ۵۵ + ۳۳/۹ = ۸۸/۹°F$$

$$\text{حجم هوای احیا: } ۲۵۰۰ * \left[\frac{۸۸/۹-۵۵}{۲۵۰-۱۲۰}\right] = ۶۵۲scfm$$

$$\text{انرژی فرآیند احیا: } ۶۵۲ * \left[\left(۲۵۰ - ۹۵\right) * ۱/۰۸\right] = ۱۰۹۱۴۵Btu/h$$

در این حالت بار حرارتی محسوس شامل مجموع بار حرارتی داخلی، بار حرارتی فرآیند رطوبت‌گیری و بار سرمایش هوای مخلوط‌شده است:

$$\text{بار حرارتی کل} = ۱۰۰۰۰۰ + \left[۱/۰۸ * ۲۵۰۰ * \left(۸۸/۹ - ۷۰\right)\right] + \left[۱/۰۸ * ۶۱۷۳ * \left(۷۱/۶ - ۵۵\right)\right] = ۲۶۱۶۷۰scfm \quad ۷-۸$$

که در نتیجه مشخصات سامانه به صورت زیر به دست می‌آید:

ظرفیت سرمایش: ۲۱٫۸ تن تبرید

اندازه رطوبت‌گیر: سطح مقطع ۷٫۵sq.ft

انرژی مورد نیاز فرآیند احیا: ۱۰۹۱۴۵Btu/hr

اندازه دسیکنت سامانه سه، دو برابر دسیکنت سامانه دو و سامانه سرمایش آن ٪۲۵ بزرگ‌تر از سرمایش سامانه دو می‌باشد. این موضوع نتیجه عدم دفع رطوبت به کمک سامانه سرمایشی است. اما سامانه سه ظرفیت دفع رطوبت بسیار زیادی به صورت "ذخیره" دارد، زیرا رطوبت‌گیر دسیکنت می‌تواند در صورت لزوم به جای ۲۵۰۰cfm هوا، تا ۴۵۰۰cfm هوا رطوبت‌گیری کند.

۸-۱-۴ سامانه ٤-گرفتن تمام بار رطوبی با استفاده از رطوبت‌گیر و بدون انجام پیش‌سرمایش

چون رطوبت‌گیر انتخاب شده در سامانه ۳ ظرفیت اضافی قابل توجهی دارد، مهندس می‌تواند امکان استفاده از انرژی حرارتی ارزان‌قیمت را برای انجام رطوبت‌گیری بدون نیاز به سرمایش بررسی کند. در این مثال ما فرض می‌کنیم انرژی حرارتی حاصل از سامانه‌های تولید همزمان برای گرم کردن هوای احیا با دمای ۲۰۰°F در دسترس است.

بار رطوبی همانند حالت قبل است:

$$\text{بار رطوبی} = ۱۸۱۸۰۰ + \left[۴/۵ * ۴۰۰ * \left(۱۴۰ - ۳۰\right)\right] = ۳۷۹۸۰۰gr/hr \quad ۸-۸$$

شرایط هوای ورودی به رطوبت‌گیر نیز به صورت زیر است:

هوای جبرانی	۴۰۰scfm در دمای ۹۵°F و رطوبت ۱۴۰gr/lb
هوای برگشتی	۵۷۷۳scfm در دمای ۷۰°F و رطوبت ۳۰gr/lb
کل	۶۱۷۳scfm در دمای ۷۱٫۶°F و رطوبت ۳۷gr/lb

هدف استفاده از کمترین مقدار ممکن هوای فرآیندی است که به وسیله آن می‌توان ۳۷۹۸۰۰gr/hr رطوبت را از ۶۱۷۳scfm جریان هوا در دمای ۷۱٫۶°F و رطوبت ۳۷gr/lb دفع کرد. اگر دمای هوای احیا ۲۰۰°F باشد، رطوبت هوای فرآیندی خروجی از رطوبت‌گیر، با توجه به سرعت آن، بین ۸gr/lb تا ۱۱٫۵gr/lbخواهد بود (همانطور که تکنسین نگهداری سامانه مشاهده کرده است، هر چه سرعت کمتر باشد، رطوبت کمتر است). با فرض بدترین حالت ممکن (مرطوب‌ترین حالت خروجی) می‌توان تخمینی از مقدار جریان هوای فرآیندی مورد نیاز را به صورت زیر به دست آورد:

$$\text{جریان هوای فرآیندی تخمینی} = ۳۷۹۸۰۰ \div \left[۴/۵ * \left(۳۷ - ۱۱/۵\right)\right] = ۳۳۱۰scfm \quad ۹-۸$$

۳۳۱۰cfm هوا در رطوبت‌گیر با سطح مقطع ۷٫۵sq.ft با سرعت ۴۴۱fpm (۳۵۱۶÷۷٫۵=۴۴۱) حرکت می‌کند، که در این صورت عملکرد سامانه در بدترین شرایط (۱۱٫۵گرین) که در سرعت ۶۰۰fpm رخ می‌دهد نیز قابل قبول خواهد بود. با توجه به نمودارهای عملکرد سامانه رطوبت‌گیری انتخاب شده در سرعت ۴۴۱fpm، رطوبت هوای خروجی از رطوبت‌گیر برابر با ۱۰gr/lb است:

$$\text{میزان رطوبت‌گیری} = ۴/۵ * ۳۳۱۰ * \left(۳۷ - ۱۰\right) = ۴۰۲۱۶۵gr/hr \qquad ۸-۱۰$$

ظرفیت بسیار زیاد است. عملکرد کامل سامانه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

شرایط هوای ورودی: ۳۳۱۰scfm هوا با دمای ۷۱٫۶°F و رطوبت ۳۷gr/lb

سرعت هوا: $\frac{۳۳۱۰}{۷/۵} = ۴۴۱fpm$

محتوای رطوبت خروجی: ۱۰gr/lb

افزایش دمای هوای فرآیندی: $۰/۶۲۵ * \left(۳۷ - ۱۰\right) + \left[۰/۰۸ * \left(۲۰۰ - ۷۱/۶\right)\right] = ۲۷/۱°F$

دمای هوای فرآیندی خروجی: $۷۱/۶ + ۲۷/۱ = ۹۸/۷°F$

حجم هوای احیا: $۳۳۱۰ * \left[\frac{۹۸/۷-۷۱/۶}{۲۰۰-۱۲۰}\right] = ۱۱۲۱scfm$

انرژی فرآیند احیا: $۱۱۲۱ * \left[\left(۲۰۰ - ۹۵\right) * ۱/۰۸\right] = ۱۲۷۱۲۱Btu/h$

بار حرارتی کل برابر با مجموع بار حرارتی داخلی و بار حرارتی فرآیند رطوبت‌گیری است:

$$\text{بار حرارتی کل} = ۱۰۰۰۰۰ + \left[۱/۰۸ * ۳۳۱۰ * \left(۹۸/۷ - ۷۰\right)\right] = ۲۰۲۵۹۷scfm \qquad ۸-۱۱$$

که در نتیجه مشخصات سامانه به صورت زیر به دست می‌آید:

ظرفیت سرمایش: ۱۶٫۹ تن تبرید

اندازه رطوبت‌گیر: سطح مقطع ۷٫۵sq.ft

انرژی مورد نیاز فرآیند احیا: ۱۲۷۱۲۱Btu/hr

جالب توجه است که این سامانه به سرمایش کمتری نسبت به سامانه دوم و سوم نیاز دارد، در حالی که ظرفیت رطوبت‌گیری مورد نیاز کمی بیشتر شده است. طراح می‌تواند از دو هیتر احیا استفاده کند، هیتر اول از گرمای تلف‌شده با دمای پایین برای گرم کردن هوا تا ۲۰۰°F استفاده می‌کند. هیتر دوم نیز هوا را تا ۲۵۰°F گرم می‌کند که در این صورت ظرفیت رطوبت‌گیری برای افزایش بار رطوبی در آینده نیز افزایش می‌یابد و می‌توان سطح کنترلی فضا را برای محصولات مختلف کاهش داد. البته در این شرایط لازم است ظرفیت تبرید را نیز افزایش داد، زیرا بار حرارتی محسوس تا حدی تابع مقدار رطوبت گرفته شده است.

۸-۲ مقایسه جایگزین‌ها

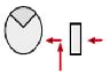
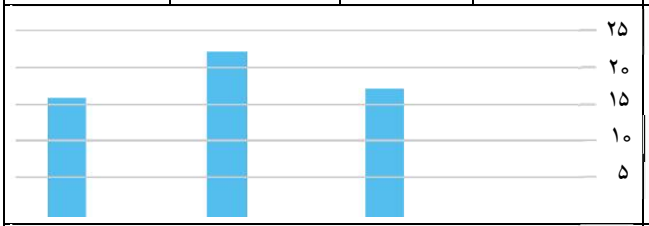
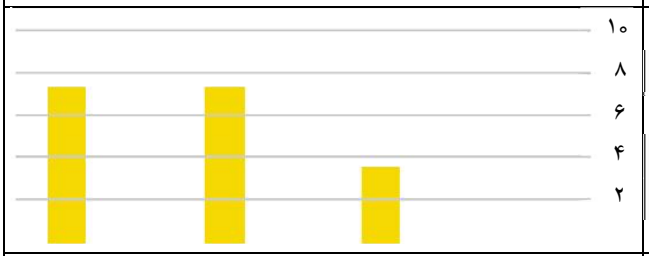
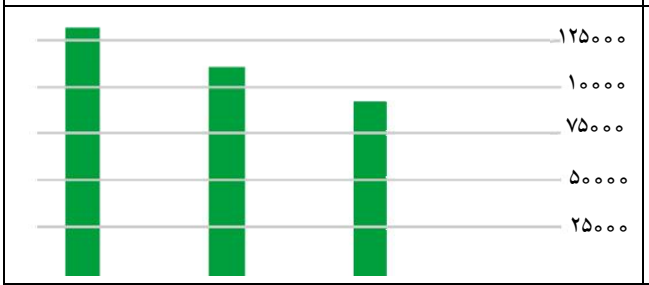
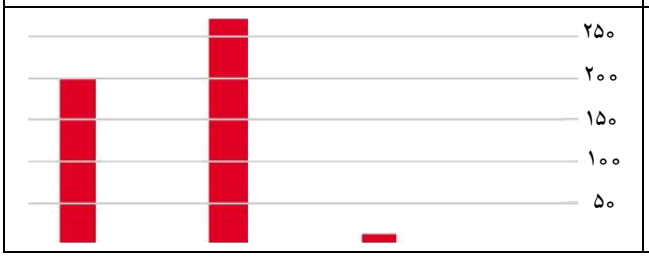
در جدول و شکل ارائه شده این چهار روش با هم مقایسه شده‌اند. هر کدام از جایگزین‌ها مزایا و معایبی دارند. برای مثال:

سامانه ۱: این سامانه ظرفیت مورد نیاز برای گرفتن بار هوای جبرانی را دارد، اما نمی‌تواند بار داخل فضا را بگیرد. در صورتی که حجم هوای جبرانی زیاد باشد، بار رطوبی فضای داخلی کم باشد و یا دمای نقطه شبنم مورد نظر بالا باشد، این سامانه کوچک‌ترین و به صرفه‌ترین سامانه برای بهره‌برداری است. اما در مثال نمونه این روش کارایی ندارد.

سامانه ۲: هزینه خرید این سامانه از دیگر سامانه‌ها کمتر است. دسیکنت این سامانه کوچک‌تر است، سامانه تبرید کوچکی نیاز دارد و انرژی احیای آن از دیگر سامانه‌ها کمتر است. اما این سامانه به سختی بار رطوبی فضا را می‌گیرد. در صورتی که طراح این سامانه را برای رطوبت‌گیری انتخاب کند، باید محاسبات بار رطوبی را دوباره بررسی کند و یا از سامانه بزرگ‌تری استفاده کند.

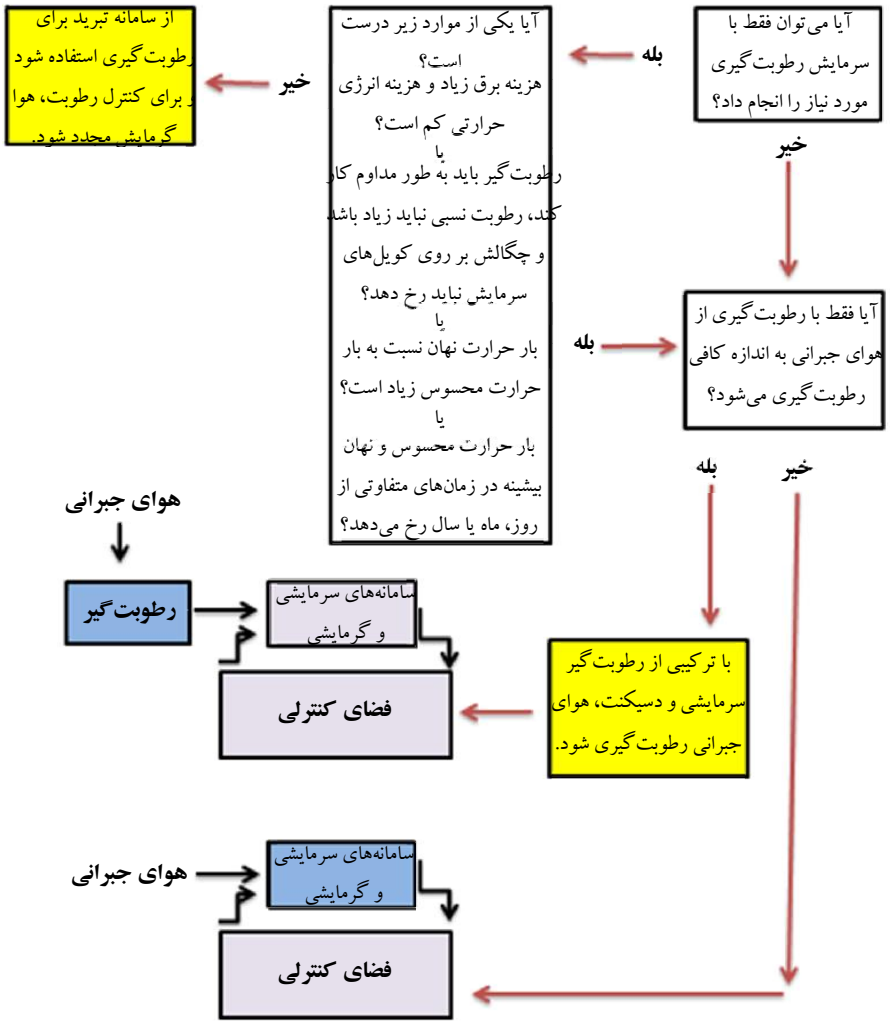
سامانه۳: با انتخاب سامانه رطوبت‌گیری بزرگ‌تر و بهبود عملکرد دسیکنت با پیش‌سردکردن هوای ورودی، ظرفیت رطوبت‌گیری این سامانه نسبت به سامانه دو بیشتر است. با اینکه هزینه نصب و راه‌اندازی این سامانه از سامانه‌های دیگر بیشتر است، اما اگر بار رطوبی به صورت تخمینی، نه از محاسبات دقیق، به دست آمده باشد و یا در صورتی که در آینده نیاز به گسترش سامانه وجود داشته باشد، انتخاب این سامانه هوشمندانه است.

سامانه ٤: هزینه نصب این سامانه از هزینه سامانه یک بیشتر و از هزینه سامانه دو کمتر است و هزینه بهره‌برداری آن از تمام سامانه‌ها کمتر خواهد بود. با استفاده از انرژی حرارتی تلف‌شده برای احیا رطوبت‌گیر، هزینه بهره‌برداری سامانه بسیار کاهش می‌یابد. کویل سرمایشی نیز از کمترین مقدار آب خنک برای گرفتن بار حرارتی محسوس، نه سرد کردن هوا برای بهبود عملکرد رطوبت‌گیر، استفاده می‌کند. بر اساس هزینه سالانه احتمالا هزینه این سامانه کمتر از نصف هزینه سامانه سه است، در حالی که اگر از هیتر با دمای بالا برای احیا و همچنین سرمایش اضافی برای استفاده در آینده استفاده شود، ظرفیت این سامانه برابر با سامانه سه خواهد بود.

	سامانه ۱	سامانه ۲	سامانه ۳	سامانه ۴
				
ظرفیت تبرید (تن تبرید)	ناکافی	۱۷٫۲	۲۱٫۸	۱۶٫۹
اندازه رطوبت گیر دسیکنت (sq.ft.)	ناکافی	۳٫۷۵	۷٫۵	۷٫۵
احیا دسیکنت (Btu/hr)	ناکافی	۸۳۷۰۰	۱۰۹۱۴۵	۱۲۷۱۲۱
ظرفیت ذخیره دفع رطوبت (lb/hr)	ناکافی	۳٫۴ (۱۳٪)	۴۱٫۸ (۱۶۱٪)	۲۸٫۸ (۱۰۱٪)
ظرفیت تبرید (تن تبرید)				
اندازه رطوبت گیر دسیکنت (sq.ft.)				
احیا دسیکنت (Btu/hr)				
ظرفیت دفع رطوبت (درصد بار اتاق)				

قابل ذکر است که با هر گونه تغییر در شرایط ذکر شده مزایا و معایب این سامانه‌ها تغییر می‌کند. به خصوص اگر میزان هوای جبرانی زیاد شود، تاثیر زیادی دارد و در این صورت سامانه یک کمترین هزینه اولیه و بهره‌برداری را خواهد داشت.

نمودار زیر نشان‌دهنده مسیر انتخاب کم‌هزینه‌ترین سامانه رطوبت‌گیری (هزینه اولیه و بهره‌برداری)است. اما همانطور که در مثال‌های قبل مشاهده شد، شرایط زیادی وجود دارد که انتخاب سامانه رطوبت‌گیری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همانطور که در فصل هفتم توضیح داده شد، بسیار مهم است که طراح سامانه هدف پروژه را به خوبی درک کرده باشد. درک کامل از هدف پروژه امکان تعیین ظرفیت مناسب، انرژی مصرفی و هزینه اولیه سامانه رطوبت‌گیری را فراهم می‌کند.


آیا می‌توان فقط با سرمایش رطوبت‌گیری مورد نیاز را انجام داد؟
بله
آیا یکی از موارد زیر درست است؟
هزینه برق زیاد و هزینه انرژی حرارتی کم است؟
یا
رطوبت‌گیر باید به طور مداوم کار کند، رطوبت نسبی نباید زیاد باشد و چگالش بر روی کویل‌های سرمایش نباید رخ دهد؟
یا
بار حرارت نهان نسبت به بار حرارت محسوس زیاد است؟
یا
بار حرارت محسوس و نهان بیشینه در زمان‌های متفاوتی از روز، ماه یا سال رخ می‌دهد؟
خیر
از سامانه ترید برای رطوبت‌گیری استفاده شود و برای کنترل رطوبت، هوا گرمایش مجدد شود.
خیر
آیا فقط با رطوبت‌گیری از هوای جبرانی به اندازه کافی رطوبت‌گیری می‌شود؟
بله
بله
خیر
هوای جبرانی
رطوبت‌گیر
سامانه‌های سرمایشی و گرمایشی
فضای کنترلی
با ترکیبی از رطوبت‌گیر سرمایشی و دسیکنت، هوای جبرانی رطوبت‌گیری شود.
هوای جبرانی
سامانه‌های سرمایشی و گرمایشی
فضای کنترلی

۹ تجهیزات اندازه‌گیری رطوبت

تجهیزات بسیار متنوعی برای اندازه‌گیری رطوبت وجود دارد. برای ارائه توضیح کامل در مورد تجهیزات رطوبت‌گیری به یک کتاب راهنمای جداگانه نیاز است. اما موضوعات اساسی و قوانین بنیادی در این مورد وجود دارد که شناخت آن‌ها برای طراحی سامانه رطوبت‌گیری مفید خواهد بود. این فصل به بررسی این اصول می‌پردازد.

چون گزینه‌های زیادی برای انتخاب تجهیزات رطوبت‌گیری وجود دارد، مهم این است که بدون توجه به جزییات بتوان درک کلی از موارد مهم در یک کاربرد خاص به دست آورد. اگر یک اتاق برای نگهداری کاغذ و اسناد مهیا شده باشد، نیازی به تکرارپذیری اندازه‌گیری تا ٪۱± وجود ندارد و مواردی چون اندازه‌گیری دقیق نقطه شبنم تا $\pm ۰/۵^{o}F$ و یا زمان اندازه‌گیری کمتر از ۴ ثانیه بی‌ربط خواهد بود. در مقابل، اگر طراح یک خط تولید فیلم عکاسی به ارزش ۵۰۰۰ دلار که هر ۳۰ ثانیه یک بارتولید می‌کند را طراحی می‌کند، نباید نگران هزینه سامانه‌های کنترلی باشد؛ زیرا در این حالت خطاهای کوچک و یا خرابی دستگاه‌ها در چند دقیقه هزینه‌ای به مراتب بیشتر از گران‌قیمت‌ترین وسایل اندازه‌گیری را در پی خواهد داشت.

در این فصل چارچوبی را برای تصمیم‌گیری درباره تجهیزات اندازه‌گیری و اصول عملیاتی دستگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهیم.

ابزار اندازه‌گیری رطوبت بر طبق نوع اندازه‌گیری که انجام می‌دهند، چرخه کاری که دارند و کارهایی که طی اندازه‌گیری انجام می‌دهند، متمایز می‌شوند. به محض مشخص شدن این متغیرها برای یک مورد مشخص، طراح سامانه می‌تواند تجهیزات رطوبت‌گیری را انتخاب کند.

۹-۱ انواع اندازه‌گیری

ابزارهایی برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی هوا، رطوبت مطلق هوا و مقدار رطوبت جامدات وجود دارد. ابزارهای هر یک از این کاربردها متفاوت‌اند.

رطوبت نسبی: این حسگرها تغییرات ماده ناشی از جذب رطوبت از هوای اطراف را اندازه‌گیری می‌کنند. بسیاری از مواد به رطوبت حساس هستند و برای این هدف مناسب‌اند. در اوایل سال ۱۵۵۰ لئوناردو داوینچی مشاهده کرد که وزن یک گلوله پشمی در یک روز بارانی بیشتر از یک روز خشک است. موی انسان و حیوان نیز با جذب رطوبت بلندتر می‌شود و به همین دلیل است که مو در یک روز گرم و مرطوب فر می‌شود. ویژگی‌ها و خواص الکتریکی پلاستیک نیز با جذب رطوبت تغییر می‌کند. تجهیزات اندازه‌گیری این تغییرات را اندازه‌گیری کرده و ارتباطی عددی با تغییرات رطوبت نسبی هوای اطراف برقرار می‌کنند.

رطوبت مطلق: این حسگرها از یک واکنش شیمیایی برای "شمارش" مولکول‌های آب استفاده می‌کنند و یا موجب چگالش بر روی یک سطح سرد با دمای معلوم می‌شوند. نخستین کاربرد ثبت شده از یک رطوبت‌سنج چگالشی[1] در سال ۱۷۵۱ بود، زمانی‌که طبیعت‌شناس فرانسوی، چارلز لروی[2]، همزمان با اندازه‌گیری دمای آب یک مخزن فلزی صیقلی به آن یخ اضافه می‌کرد. وقتی قطره‌های آب روی دیواره بیرونی مخزن تشکیل شدند، او می‌توانست دمای نقطه شبنم را اندازه‌گیری کند. امروزه نیز از همین پدیده استفاده می‌شود و با استفاده از حسگرهای الکتریکی عملکرد رطوبت‌گیرهای چگالشی بسیار دقیق‌تر شده است.

میزان رطوبت جامدات را می‌توان با اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های مواد که با محتوای رطوبی تغییر می‌کنند و یا با دفع همه آب از یک نمونه ماده و سپس اندازه‌گیری وزن آن تعیین کرد. برای مثال، آب انرژی فروسرخ را به خوبی جذب می‌کند. وقتی ماده جامدی در معرض تابش فروسرخ قرار گیرد، حسگرها می‌توانند اختلاف بین تابش جذب شده و تابش بازتاب‌شده را اندازه‌گیری کنند. این اختلاف با میزان رطوبت سطح ماده متناسب است.

اندازه‌گیری‌های دقیق اولیه، آن‌هایی که مقدار رطوبت را مستقل از دیگر متغیرها همچون دمای هوا یا ماده اندازه‌گیری می‌کنند، دقیق‌تر اما گران‌تر هستند. اغلب سامانه‌های اندازه‌گیری ارزان‌تر با استفاده از حسگرهای الکترونیکی و یافتن دو یا چند متغیر می‌توانند رطوبت را اندازه‌گیری کنند. برای مثال حسگرهایی که دما، فشار و رطوبت نسبی را اندازه‌گیری می‌کنند، می‌توانند با استفاده از این مقادیر دمای نقطه شبنم و یا نسبت رطوبت را اندازه‌گیری کنند.

به طور کلی بهتر است که مقادیر متغیرهای مورد نظر را به جای محاسبه از دیگر متغیرها به

[1] Condensation hygrometer
[2] Charles LeRoy

طور مستقیم اندازه‌گیری کرد. برای مثال موردی را در نظر بگیرید که در آن هدف، جذب رطوبت از قرص‌ها و مواد دارویی با استفاده از پودرهای رطوبت‌گیر است. در بیشتر موارد جذب رطوبت به میزان رطوبت نسبی هوای اطراف بستگی دارد، نه به دمای نقطه شبنم و یا نسبت رطوبت ماده. در این مورد باید به دنبال تجهیزاتی باشیم که به جای نقطه شبنم هوا، تغییرات رطوبت نسبی را اندازه‌گیری می‌کنند.

برعکس، چگالش روی لوله‌های سرد در یک واحد تصفیه آب را نمی‌توان با اندازه‌گیری رطوبت نسبی بر روی دیواری دور از لوله‌ها کنترل کرد. در هر رطوبت نسبی ممکن است چگالش اتفاق بیفتد و به اختلاف دمای نقطه شبنم هوا و دمای سطح لوله‌ها بستگی دارد. در این شرایط طراح به حسگری که یا دمای نقطه شبنم هوا و یا تفاوت میان دمای نقطه شبنم و دمای سطوح را اندازه‌گیری کند، نیاز خواهد داشت.

۹-۲ چرخه کار و محیط کاری[1]

دیگر تفاوت مهم میان تجهیزات، چرخه کاری است که برای انجام آن طراحی شده‌اند. برخی از آن‌ها برای نمونه‌گیری دوره‌ای مناسب‌اند و برخی دیگر به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌کنند.

برای مثال، به طور کلی پذیرفته شده است که " ترن گراویمتری[2]" دقیق‌ترین دستگاه شناخته شده اندازه‌گیری رطوبت است. آژانس‌های استاندارد ملی[3] در سراسر دنیا از این دستگاه به عنوان استاندارد اولیه و اساسی برای سنجش و کالیبره‌کردن دیگر دستگاه‌ها استفاده می‌کنند. اما این دستگاه بزرگ، کند و بسیار گران است، برای کار کردن به چندین کارشناس خبره نیاز دارد و فقط قابلیت اندازه‌گیری یک یا دو نمونه هوای کوچک را در هر روز دارد. با این که این دستگاه بسیار دقیق است، اما برای کنترل یک فرآیند صنعتی پیوسته مناسب نیست.

تجهیزاتی که برای چرخه کاری پیوسته طراحی شده‌اند، به اندازه تجهیزاتی که رطوبت یک نمونه کوچک هوا را در مدت زمان طولانی اندازه‌گیری می‌کنند، دقیق نیستند. افزون بر این، حسگرهایی که برای اندازه‌گیری پیوسته و بسیار دقیق تغییرات کوچک طراحی شده‌اند، اگر نیاز باشد در شرایط متفاوتی و دوره زمانی کمتری فعالیت کنند، ممکن است دقت کمتری داشته باشند. برای مثال حسگر دمای نقطه شبنم آلومینیم‌اکسید دستگاه دقیقی برای اندازه‌گیری پیوسته در یک بازه دمای نقطه شبنم کم است، اما اگر این حسگر باید شرایط محیطی را اندازه‌گیری کند که به سرعت بین شرایط خشک و اشباع کار می‌کند، دقت دستگاه مناسب نخواهد بود.

محیط کاری یک حسگر نیز ممکن است انتخاب را تحت تاثیر قرار دهد. برای مثال اگر علاوه بر آب، گازهای قابل چگالش دیگری نیز در جریان هوا باشد، حسگر رطوبت‌سنج چگالشی ممکن است به جای دمای نقطه شبنم آب، دمای نقطه شبنم گاز دیگری را اندازه‌گیری کند. افزون بر این، اگر بخارهای خورنده در جریان هوای گرم وجود داشته باشد، ممکن است حسگر آلومینیم اکسید با آن‌ها واکنش داده و خورده شود که موجب تغییر ویژگی‌های الکتریکی آن

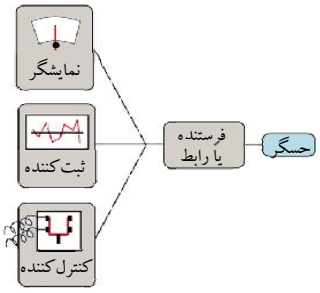
---

[1] Duty cycle & Operating environment
[2] Gravimetric train
[3] National standards agencies

می‌شود.

راهبردهای مربوط به محیط‌های کاری دشوار، بسیار گوناگون هستند و تولیدکنندگان تجهیزات می‌توانند در هر مورد راهنمایی کنند. اگر محیط از یک نظر حاد باشد-نزدیک به رطوبت صفر یا رطوبت اشباع، هوای خیلی سرد یا خیلی گرم و یا هوای بسیار خورنده- طراح می‌تواند شرایط محیط را با یک کارشناس در میان گذاشته و از او راهنمایی بگیرد. اغلب مسایل پیچیده را می‌توان به سادگی حل کرد. برای مثال در یک محیط خورنده ممکن است استفاده از یک حسگر ارزان‌قیمت و قابل تعویض نسبت به یک حسگر گران‌قیمت، مناسب‌تر و امکان‌پذیرتر باشد.

دقت اندازه‌گیری، زمان پاسخ کوتاه، محدوده وسیع اندازه‌گیری و تلرانس حسگرهای رطوبت‌سنج جزو مشخصه‌های منحصر بفرد آن‌ها نیستند، اما در صورتی که همه این ویژگی‌ها نیاز باشد، هزینه حسگر بسیار بیشتر خواهد بود.



شکل ۹-۱

کاربردهای تجهیزات

تجهیزات رطوبت‌گیری یک یا چند کاربرد دارند که طراح می‌تواند با تعیین کاربردهای مورد نیاز در یک پروژه خاص، تجهیزات مناسب را انتخاب کند.

۹-۳ کاربردهای تجهیزات

چهار کاربرد اساسی که یک رطوبت‌سنج می‌تواند داشته باشد عبارتند از:

- مشخص کردن وجود رطوبت
- نمایش اندازه‌گیری
- ثبت اندازه‌گیری
- کنترل سامانه رطوبت‌گیر یا رطوبت‌زن

با عبور یک سیگنال اندازه‌گیری از میان کاربردهای مختلف خطاها روی هم جمع می‌شوند، همانطور که یک داستان از یک فرد به فرد دیگری تغییر می‌کند. این عمل به این دلیل است که هر کاربرد چهار محدودیت دارد که نتیجه نهایی اندازه‌گیری را تحت تاثیر قرار می‌دهد:

- تکرارپذیری (دقت)[1]
- محدوده
- زمان پاسخ[2]
- ماندگاری[3] در یک محیط عملیاتی خاص و مشخص شده

با افزایش تعداد کاربردهای تجهیزات مشخصات عملکرد آن‌ها محدودتر می‌شود، هزینه آن‌ها بیشتر شده و احتمال اشتباه نیز افزایش می‌یابد. این مسأله در مورد وسایلی با یک کاربرد مطرح نیست، اما چون همواره هزینه مسأله بسیار مهمی است، طراح باید در نظر داشته باشد که اگر به نظر می‌رسد که وسیله گران است و یا استفاده از آن دشوار است، ممکن است به این دلیل باشد که کاربردهای وسیله و یا دقت و عملکرد آن بیش از حد مورد نیاز است.





شکل ۹-۲

نمایشگرها و کنترل‌کننده‌ها

نمایشگر مدرج در شکل بالایی رطوبت نسبی را نشان می‌دهد. اما برای کنترل رطوبت وسیله دیگری باید تجهیزات مکانیکی را روشن و خاموش کند که این عمل توسط هیومیدیستات که در شکل پایینی نشان داده شده است، انجام می‌شود. هر دو وسیله دارای یک نوع حسگر هستند، اما عملکرد آن‌ها متفاوت است.

[1] Repeatability (precision)
[2] Response time
[3] Durability

برای مثال در یک انبار کود نیاز مبرمی به کنترل رطوبت وجود دارد، زیرا کود مرطوب می‌تواند همانند بتن سفت شود. اما ممکن است هیچ نیازی به نمایش یا ثبت رطوبت نباشد. در این حالت، فقط تشخیص وجود رطوبت و روشن کردن سوئیچ رطوبت‌گیر کافی است. وسیله مورد نیاز یک هیومیدیستات ساده است و بهایی کمتر از ۱۰۰ (در سال ۲۰۰۲) دلار دارد. اگر نمایش مقدار رطوبت هم نیاز باشد، هزینه بیشتر می‌شود و ثبت مقدار رطوبت نیز به نوبه خود هزینه بیشتری را در پی خواهد داشت.



شکل ۹-۳

نمایشگر و ثبت‌کننده

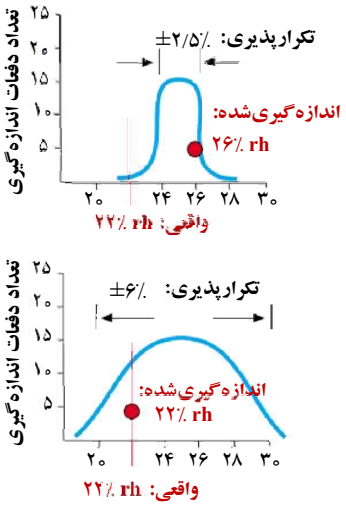
دستگاه اندازه‌گیری رطوبت و دما، دمای حباب خشک و رطوبت نسبی را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. اغلب این وسایل متغیرها را کنترل نمی‌کنند، بلکه فقط مقدار آن‌ها را نمایش می‌دهند.

خرید چندین وسیله تک-کاربرده نیز راه دیگری برای افزایش کاربردهای وسیله اصلی است. یک دماسنج برای اندازه‌گیری دمای حباب خشک و یک رطوبت‌سنج عقربه‌ای با المان پلاستیکی، اغلب ارزان‌تر از وسیله‌ای است که هر دو کار را انجام می‌دهد. استفاده از چند وسیله برای اندازه‌گیری هنگامی مهم‌تر است که دقت مورد نیاز کاربردهای مورد نظر متفاوت باشد. برای مثال در اتاق تولید باتری لیتیمی دمای نقطه شبنم بسیار اهمیت دارد، اما دمای اتاق چندان حائز اهمیت نیست. تلرانس رطوبت‌سنج باید ۰٫۰۵± گرین بر پوند باشد، زیرا رطوبت به محصولات آسیب می‌زند، اما تلرانس اندازه‌گیری دما می‌تواند بیشتر باشد.

با اینکه استفاده از وسایل مجزا برای کاربردهای مختلف هزینه کمتری دارد، اما اگر دو وسیله متغیر مشابهی را اندازه‌گیری کنند، ممکن است مقادیر به دست‌آمده با هم برابر نباشد و نتایج گیج‌کننده شود. برای مثال اگر یک وسیله ثبت‌کننده به رطوبت‌سنج مجهز باشد، مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده آن هرگز با هیومیدیستاتی که به طور مجزا رطوبت را اندازه‌گیری می‌کند، دقیقا برابر نمی‌شود. در واقع دو حسگر ظاهرا یکسان، پاسخ متفاوتی به محیط مشابه می‌دهند.

۹-۴ تکرارپذیری و دقت[1]

هر وسیله‌ای دقت، تلرانس و زمان پاسخ مخصوص به خود را دارد که اغلب با دیگر وسایل به طور دقیق برابر نیست. مغایرت آن‌ها مشابه افرادی با هوش یکسان است که یک اتفاق را از منظرهای مختلف توصیف می‌کنند. اختلاف‌های وسایل را می‌توان با کالیبره‌کردن آن‌ها در یک زمان و محدوده واقعی کاربرد آن‌ها کمینه کرد. در مواقعی که هزینه وسایل از تطابق دقیق آن‌ها مهم‌تر است، استفاده از وسایل مجزا صرفه اقتصادی بیشتری در پی خواهد داشت.



شکل ۹-۴

تکرارپذیری و دقت

وسیله اول در حال حاضر دقیق نیست، زیرا مقدار واقعی رطوبت را نشان نمی‌دهد. اما می‌توان با کالیبره کردن دقت وسیله را افزایش داد، چون تکرارپذیر است و برای هر مقدار رطوبت، عددی بین ۲٫۵٪ رطوبت نسبی را نشان می‌دهد.

وسیله دوم در این شرایط خاص دقیق است، اما چون تکرارپذیری کمی دارد در اندازه‌گیری‌های بعدی دقیق عمل نخواهد کرد و کالیبره کردن نیز دقت آن را بهبود نخواهد داد.

دانستن رابطه میان دقت و تکرارپذیری مفید است. دقت، توانایی دستگاه در نشان دادن مقدار واقعی رطوبت است. تکرارپذیری، توانایی دستگاه در نشان دادن مقدار اصلی در همان رطوبت اصلی است. اگر وسیله‌ای بسیار تکرار پذیر باشد، با کالیبره‌کردن دقیق می‌شود. اگر وسیله تکرارپذیر نباشد، هیچگاه دقیق نخواهد بود. با این اوصاف، سازندگان تکرارپذیری وسایل را در صفحات اطلاعات محصولات ارائه می‌دهند.

حسگرهای ارزان‌قیمت اغلب با "دقت" آن‌ها توصیف می‌شوند. اگر دقت وسیله در یک کاربرد خاص بسیار مهم باشد، طراح می‌تواند در صورت نیاز اطلاعات جزئی از تکرارپذیری وسیله در محدوده دمایی و رطوبتی مورد نظر را از سازندگان بگیرد. تکرارپذیری و به موجب آن

[1] Repeatability vs. Accuracy

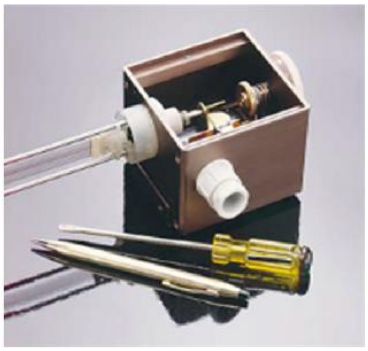
دقت وسیله در کل محدوده عملیاتی یکسان و یکنواخت نیست. به طور کلی تکرارپذیری در وسط محدوده مورد نظر بهتر از انتهای آن است.

اکنون اصول عملیاتی سه نوع از حسگرهای رطوبتی را بررسی خواهیم کرد.

۹-۵ حسگر رطوبت نسبی

به طور کلی حسگرهای رطوبت نسبی بر پایه تغییر خواص مکانیکی یا الکتریکی مواد ناشی از تغییرات رطوبت اطراف استوار هستند. در ادامه چند نمونه از این نوع حسگرها را بررسی خواهیم کرد.

۹-۵-۱ رطوبت‌سنج انبساط مکانیکی[1]



شکل ۹-۵

حسگرهای انبساطی

اغلب هیومیدیستات‌های رایج مقدار رطوبت را با انقباض و انبساط یک ماده رطوبت‌گیر می‌سنجند. در این مورد از دسته‌ای از موی حیوانی که با افزایش رطوبت افزایش طول می‌یابد، استفاده شده است. در دیگر حسگرهای انبساطی از نوارهای پلاستیکی یا رشته‌هایی که همانند موی حیوان عمل می‌کنند و با تغییر رطوبت نسبی تغییر طول می‌دهند، استفاده شده است.

شاید قدیمی‌ترین دستگاه اندازه‌گیری رطوبت بر مبنای این واقعیت است که موی انسان متناسب با رطوبت نسبی هوای اطراف تغییر طول می‌دهد. هرچه رطوبت بیشتر باشد، مو بلندتر است. سازندگان از دسته‌ای از موها استفاده می‌کنند. این کار میانگین پاسخ‌های همه موها را به دست می‌دهد، زیرا نرخ انبساط و انقباض موهای مختلف، متفاوت است.

منابع خطای اندازه‌گیری شامل واکنش موهای مختلف و واکنش رابط مکانیکی[2] که موها را به مقیاس نشان داده شده وصل می‌کند، می‌شود. معمولا دقت رطوبت‌سنج‌های مویی بین ۵± تا ٪۷ رطوبت نسبی است، اما همانند بسیاری از وسایل دیگر دقت این رطوبت‌سنج‌ها در وسط محدوده رطوبت نسبی مورد نظر بهتر از دیگر نقاط است. در رطوبت نسبی ۴۰ تا ٪۶۰ در دمای اتاق دقت این رطوبت‌سنج‌ها به ۲± تا ٪۳ نیز می‌رسد، اما خارج از این محدوده دقت کاهش می‌یابد.

به منظور افزایش دقت، دستگاه باید در اتاقی که می‌خواهد استفاده شود و در شرایط و محدوده مورد نظر برای اتاق کالیبره شود. طراحان همواره باید به نتایج رطوبت‌سنج‌های مویی[3] تا حدودی شک داشته باشند، زیرا یک ضربه کوچک با انگشت نیز می‌تواند موجب خطا در اندازه‌گیری این وسیله تا ٪۳ شود و یا طول رابط‌های مکانیکی آن‌ها با گذشت زمان تغییر می‌کند. از رطوبت‌سنج‌های مویی برای نمایش رطوبت به طور کلی، نه برای اندازه‌گیری دقیق، استفاده می‌شود.

رطوبت‌سنج انبساط پلاستیک[4] نیز همانند رطوبت‌سنج مویی است. در این وسیله مشهور و ارزان از پلیمرهای رطوبت‌گیری همچون نایلون، پلیمرهای پلاستیکی یا سلولزی به جای مو استفاده می‌شود. در رطوبت‌زن‌های مسکونی و بسیاری از کاربردهای صنعتی دیگر از این هیومیدیستات‌ها استفاده می‌شود. با اینکه پلیمرهای رطوبت‌گیر از موی انسان یکنواخت‌تر هستند، اما همچنان نباید دقتی بهتر از ٪۷± رطوبت نسبی انتظار داشت، باید به طور منظم در محیط مورد نظر کالیبره شوند و اگر در محدوده رطوبت نسبی معمول نوسان زیاد باشد، دقت دستگاه مناسب نخواهد بود.

---

[1] Mechanical expansion hygrometer
[2] Mechanical linkage
[3] Hair hygrometer
[4] Plastic expansion hygrometer

۹-۵-۲ رطوبت‌سنج انبساط الکتریکی

در رطوبت‌سنج مکانیکی تغییر در انبساط مواد با استفاده از رابط مکانیکی شامل چرخ‌دنده، اهرم و صفحه عقربه‌دار اندازه‌گیری و مشخص می‌شود. با جایگزین کردن رابط مکانیکی با قطعات الکترونیکی می‌توان عملکرد رطوبت‌سنج‌ها را بهبود داد. مو و پلاستیک به یک کرنش‌سنج الکترونیکی متصل می‌شود که فشار اعمال شده و انقباض ماده را اندازه‌گیری می‌کند. این وسیله نسبت به رطوبت‌سنج مکانیکی پیشرفته‌تر است، زیرا تکرارپذیری قطعات الکترونیکی نسبت به رابط‌های مکانیکی به خصوص با گذشت زمان طولانی بیشتر است.

۹-۵-۳ حسگر ظرفیت خازنی الکترونیکی[1]

به طور مختصر، یک خازن شارژ الکتریکی در خود ذخیره می‌کند. در ساده‌ترین شکل از دو صفحه فلزی که با یک عایق جدا شده‌اند، تشکیل شده است. اگر فاکتورهای دیگر یکسان باشند، ظرفیت خازن و مقاومتی که در یک مدار نشان می‌دهد، به ظرفیت عایق‌کنندگی جداکننده صفحات بستگی دارد، خاصیتی که ثابت دی‌الکتریک[2] نامیده می‌شود. خازن‌های بیشتر قطعات الکترونیکی کاملا عایق‌بندی می‌شوند، زیرا رطوبت موجب تغییر ثابت دی‌الکتریک جداکننده می‌شود. اگر خازن در هوای آزاد باشد، مقاومت آن با جذب و دفع رطوبت هوا تغییر می‌کند. اصل عملیاتی حسگر ظرفیت خازنی الکترونیکی نیز بر همین اساس است. مقاومت یک خازن در هوای آزاد به صورت الکترونیکی اندازه‌گیری شده و سپس به رطوبت نسبی معادل آن تبدیل می‌شود.



شکل ۹-۶

حسگر ظرفیت خازنی

خصوصیات الکتریکی بسیاری از مواد با تغییر رطوبت تغییر می‌کند. مدارهای الکتریکی متصل به مواد می‌توانند این تغییرات را اندازه‌گیری کرده و سیگنال حاصل را به مقدار رطوبت نسبی متناظر تبدیل کنند.

خازن‌های مختلفی که در حسگرهای رطوبت استفاده می‌شوند را می‌توان با انواع مختلفی از جداکننده‌ها تولید کرد. معمولا از پلیمرهای رطوبت‌گیر[3] و آلومینیم‌اکسید استفاده می‌شود. جداکننده ایده‌آل آن است که در هوای خشک ثابت دی‌الکتریک بسیار بالا و در هوای مرطوب ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین داشته باشد. هر چه این اختلاف بیشتر باشد، اندازه‌گیری راحت‌تر است.

مثل هر حسگری، برخی منابع خطا در حسگرهای ظرفیت خازنی نیز وجود دارد که عمدتا ناشی از خطی بودن سیگنال‌ها و کهنه شدن مواد حسگر است. ثابت‌های دی‌الکتریک ساخته شده از بهترین مواد نیز به طور کامل تابع خطی از رطوبت نسبی نیستند. تغییرات ثابت دی‌الکتریک در مقادیر بالا یا پایین محدوده رطوبتی مورد نظر کمتر از میانه آن است، بنابراین سیگنال قبل از اینکه به یک عدد رطوبت نسبی تبدیل شود، باید خطی‌سازی گردد. در غیر این صورت، سیگنال تغییرات رطوبت در بالا و پایین محدوده رطوبتی را کمتر اندازه گیری می‌کند. به طور معمول خطی‌سازی سیگنال در مدارهای حسگر انجام می‌شود، اما گاهی نیز به جای خطی‌سازی در منبع سیگنال، در مقصد آن انجام می‌شود.

افزون بر این، مشخصات و مواد بسیاری از جداکننده‌های حسگرهای خازنی با گذشت زمان

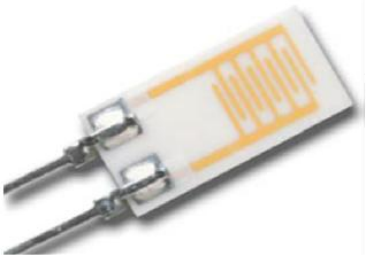
---

[1] Electronic capacitance sensor
[2] Dielectric constant
[3] Hygroscopic polymer

تغییر می‌کند، مخصوصا اگر با چگالش اشباع شود و یا حسگر در جریان هوای آلوده قرار گیرد. البته این بدین معنی نیست که این حسگرها از دیگر حسگرها نامناسب‌ترند، بلکه همانند هر وسیله دیگری، با کالیبره‌کردن منظم دقت وسیله بیشتر می‌شود، مخصوصا اگر وسیله در وسط محدوده اندازه‌گیری مورد نظر کالیبره شود. برای مثال نمی‌توان به وسیله‌ای که در دمای ۷۵°F و رطوبت نسبی ٪۶۵ کالیبره شده است و باید در ۷۰°F و رطوبت نسبی ٪۱۰ عمل کند، اطمینان کرد.

۹-۵-۴ حسگرهای مقاومتی الکترونیکی[1]

مقاومت الکتریکی برخی پلیمرهای خاص مطابق با بخار آبی که جذب می‌کنند، تغییر می‌کند و نرخ جذب آن‌ها نیز تابعی از رطوبت نسبی هوای اطراف است. در چنین سامانه‌ای دو الکترود با یک پلیمر حاوی نمک آمونیم[2] پوشش داده شده و به هم متصل می‌شوند. به محض اینکه این پلیمر بخار آب جذب کند، در ماده یون‌های متحرک ایجاد شده و موجب کاهش مقاومت ظاهری میان الکترودها می‌شود.



شکل ۹-۷

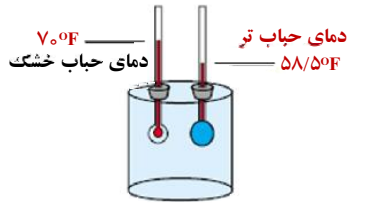
حسگر مقاومتی

این وسایل مقاومت یک پلیمر را هنگام تغییرات آن نسبت به افزایش رطوبت نسبی اندازه‌گیری می‌کنند. به جای سطوح، مقاومت داخل اجسام سنجیده می‌شود و در نتیجه این حسگر در رطوبت نسبی بالا بسیار قابل‌اطمینان است.

چون این پدیده در درون پلیمر و نه صرفا بر روی سطح آن رخ می‌دهد، این نوع حسگرها از دقت و پایداری بیشتری نسبت به حسگرهای خازنی برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی بالای ٪۹۰ برخوردار هستند. برعکس، حسگرهای خازنی در رطوبت نسبی کمتر از ٪۱۵ حساسیت بیشتری نسبت به حسگرهای مقاومتی دارند، زیرا حسگرهای خازنی جذب سطحی مقدار کم رطوبت را راحت‌تر از حسگرهای مقاومتی اندازه‌گیری می‌کنند.

۹-۵-۵ ابزارهای سایکرومتری

یکی از رایج‌ترین روش‌های اندازه‌گیری رطوبت نسبی از دو دماسنج برای اندازه‌گیری اختلاف دمای حباب خشک و دمای حباب تر هوا استفاده می‌کند. این وسیله از دو دماسنج استفاده می‌کند که یکی از آن‌ها خشک و دیگری با یک پارچه خیس پوشانده شده است. دماسنج خیس دمای کمتری را نسبت به دماسنج خشک اندازه‌گیری می‌کند، زیرا آب گرمای لازم برای تبخیر شدن را از سطح دماسنج می‌گیرد. در نتیجه دمای هوای اطراف حباب کاهش می‌یابد.



شکل ۹-۸

دماسنج‌های حباب تر و حباب خشک

اختلاف دمای حباب تر و حباب خشک هوا نشان‌دهنده میزان رطوبت است. هر چه هوا خشک‌تر باشد، دمای حباب تر کمتر است. اگر دو مقدار اندازه‌گیری شده (حباب خشک و حباب تر) یکسان باشند، هوا به حالت اشباع رسیده است (رطوبت نسبی ٪۱۰۰ است).

میزان سرمایش به نرخ تبخیر وابسته است و نرخ تبخیر نیز به مقدار رطوبت هوا بستگی دارد؛ هر چه هوا خشک‌تر باشد، سردتر می‌شود و دمای حباب تر کاهش می‌یابد. دمای حباب تر تا زمانی که میان اتلاف حرارت ناشی از تبخیر و انتقال حرارت با هوای محیط اطراف به تعادل برسد، کاهش می‌یابد. وقتی دمای حباب خشک و دمای حباب تر هوا مشخص شود، دیگر مشخصات هوا از جمله رطوبت نسبی و دمای نقطه شبنم را می‌توان با استفاده از جدول سایکرومتری که در فصل دوم توضیح داده شد، به دست آورد.

توضیحات بالا اصول کلی رطوبت‌سنج زنجیردار[3] معمولی است که وسیله‌ای ارزان و سبک برای اندازه‌گیری رطوبت هوا است. دماسنج حباب خشک و حباب تر بر روی یک زنجیر قرار داده می‌شوند. بعد از آنکه پارچه روی دماسنج حباب تر خیس شد، یک اپراتور زنجیر را به

[1] Electronic resistive sensor
[2] Ammonium salt
[3] Sling psychrometer

سرعت در مسیری دایره‌ای می‌چرخاند. آب از پارچه تبخیر شده و تا زمانی‌که تمام آب تبخیر شود، دمای حباب تر کاهش می‌یابد. سپس دمای حباب تر تا دمای حباب خشک افزایش می‌یابد. عموما اپراتور این فرآیند را سه تا پنج بار تکرار می‌کند تا اطمینان حاصل شود که کمترین و صحیح‌ترین مقدار دمای حباب تر به دست آمده است.

با توجه به اینکه متغیرهای کنترل‌نشده زیادی در بکارگیری و استفاده از یک رطوبت‌سنج زنجیردار وجود دارد، استفاده از این روش محدودیت‌های زیادی دارد. اپراتور باید دماسنج را در دمای حباب تر ماکزیمم بخواند، در حالی که هیچ تضمینی وجود ندارد که آب پارچه برای مدت کافی باقی بماند تا دمای حباب تر واقعی خوانده شود و ممکن است قبل ازآنکه نرخ تبخیر با نرخ انتقال حرارت به تعادل برسد، آب پارچه تبخیر شده باشد. پارچه باید کاملا تمیز باشد و حتی مقدار بسیار کم آلودگی پارچه نیز می‌تواند دمای حباب تر را دو یا سه درجه فارنهایت تغییر دهد. پارچه باید به طور یکنواخت و کاملا مرطوب باشد. سرعت چرخش دماسنج و در نتیجه سرعت چرخش هوا در سراسر پارچه مرطوب باید حداقل ۶۰۰ فوت در دقیقه باشد. آب نیز باید کاملا پاک باشد و برای جلوگیری از آلودگی پارچه توصیه می‌شود از آب تقطیرشده استفاده شود. به طور کلی، این وسیله برای اندازه‌گیری تقریبی مناسب است، اما فقط اپراتورهای کارآزموده و دقیق می‌توانند نتایج ثابتی را با استفاده از این وسیله به دست آورند.



شکل ۹-۹

سایکرومتر زنجیردار

دماسنج‌های حباب خشک و حباب تر بر روی یک محور چرخان و در مسیری دایره‌ای چرخانده می‌شوند و اختلاف دمای حباب تر و حباب خشک اندازه‌گیری می‌شود. با اینکه این وسیله ارزان است، برای کار با آن به تجربه نیاز است و برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی با دقت بیشتر از ٪۷±، باید تعداد زیادی اندازه‌گیری انجام شود.

برخی وسایل دمای حباب تر و دمای حباب خشک را در شرایط کنترل‌شده‌تری اندازه‌گیری می‌کنند که می‌توان به رطوبت‌سنج تنفسی[1] اشاره کرد. دماسنج‌های حباب تر و حباب خشک در یک جعبه قرار داده می‌شوند که در آن یک فن و یک مخزن آب برای خیس کردن پارچه دماسنج حباب تر نصب شده است. فن در ابتدا هوا را از دماسنج حباب خشک و سپس از دماسنج حباب تر با سرعت ثابت عبور می‌دهد. دماسنج حباب تر چون دارای یک مخزن است، دمای آن تقریبا ثابت است و خواندن مقدار آن راحت‌تر است. تمیزی پارچه اهمیت زیادی دارد و دقت رطوبت‌سنج و خوانایی آن بر دقت مقدار خوانده شده تاثیر می‌گذارد.



شکل ۹-۱۰

رطوبت‌سنج تنفسی

این وسیله حالت بهبودیافته سایکرومتر زنجیردار است، زیرا در آن سرعت هوا و بخار آب ثابت می‌ماند.

کتاب راهنمای ASHREA (جامعه مهندسان سرمایش، گرمایش و تهویه مطبوع آمریکا) بیان می‌کند که با انجام عملیات به طور دقیق، دقت رطوبت‌سنج‌های تنفسی در دمای نقطه شبنم بیشتر از $32^{\circ}F$ تقریبا برابر با ٪۵ است.

بیشترین خطا زمانی اتفاق می‌افتد که اختلاف دمای حباب تر و دمای حباب خشک هوا حداکثر یا در واقع رطوبت نسبی کم باشد. همچنین توجه داشته باشید که خطا همواره مقداری مثبت است و هرگز منفی نیست. می‌توان گفت در این روش همواره مقدار رطوبت بیشتر از مقدار واقعی به دست می‌آید. منبع این خطاها اغلب سرمایش ناکافی به دلیل محدودیت در نرخ تبخیر است و دمای حباب تر بالا موجب بیشتر شدن رطوبت هوای اندازه‌گیری شده می‌شود.

۹-۶ حسگرهای رطوبت مطلق

برخی از حسگرهای رطوبت نسبی که پیشتر به آن اشاره شد، مقدار رطوبت ویژه را با

[1] Aspirated psychrometer

محاسبات ریاضی و با استفاده از ترکیب دمای حباب تر و رطوبت نسبی اندازه‌گیری می‌کند. اما حسگرهایی که در ادامه شرح داده خواهند شد، رطوبت مطلق هوا را مستقیما اندازه‌گیری می‌کنند.

۹-۶-۱ ترن گراویمتری[1]

این وسیله برای کنترل و یا اندازه‌گیری رطوبت فضاهای کنترلی استفاده نمی‌شود و در کاتالوگ‌های وسایل اندازه‌گیری نیز یافت نمی‌شود. با این وجود فهمیدن نحوه عملکرد این وسیله مفید است، زیرا برای تعیین دقت همه دیگر وسایل اندازه‌گیری از این وسیله استفاده می‌شود. وقتی تولیدکنندگان در مورد "اندازه‌گیری‌های قابل رهگیری تا موسسه ملی استانداردها و فناوری[2]" صحبت می‌کنند، به زنجیره‌ای از اندازه‌گیری‌های که به این وسیله ختم می‌شود، اشاره می‌کنند.

در روش اندازه‌گیری وزن، یک تکنسین مقدار کمی از یک ماده رطوبت‌گیر قوی، به طور معمول آنیدرید فسفریک[3] (P_2O_5) را وزن می‌کند. سپس این ماده در معرض هوای مرطوب نمونه قرار داده می‌شود که همه بخار هوا را جذب می‌کند. سپس ماده رطوبت‌گیر دوباره وزن می‌شود. اختلاف این دو اندازه‌گیری برابر با وزن رطوبت گرفته شده از نمونه هوا است. همانطور که مشاهده می‌شود، این فرآیند پیچیده و بسیار زمانبر است. دستگاه کل فضای اتاق را در بر می‌گیرد و به چندین تکنسین کارآزموده نیاز است. یک اندازه‌گیری ساده ممکن است ساعت‌ها، روزها و یا هفته‌ها به طول انجامد؛ هر چه رطوبت کمتر باشد، زمان لازم برای اندازه‌گیری طولانی‌تر است.

موسسه ملی اطلاعات دمای نقطه شبنم وسیله‌هایی را که برای کالیبره‌کردن دستگاه‌های دیگر در صنعت و تجارت بکار می‌روند، ارائه می‌کند. بدین منظور این موسسه از " ژنراتور دو فشاره[4]" برای ایجاد هوا با دمای نقطه شبنم کنترل‌شده استفاده می‌کند.



شکل ۹-۱۱

دیوکاپ

وقتی بر روی سطوح صیقلی محفظه چگالش رخ می‌دهد، مشاهده‌گر دمای نقطه شبنم هوا را با اندازه‌گیری دمای مایع درون فنجان تخمین می‌زند.

۹-۶-۲ رطوبت‌سنج چگالشی[5]

این وسیله برای اندازه‌گیری رطوبت ویژه بر پایه پدیده نقطه شبنم عمل می‌کند. اگر دما و فشار کلی هوا در هنگام چگالش رطوبت مشخص باشد، در این صورت رطوبت ویژه هوا نیز مشخص می‌شود. در فشار ثابت، هر نقطه شبنم تنها یک مقدار فشار بخار و میزان رطوبت دارد.

رطوبت‌سنج چگالشی در ساده‌ترین شکل که دیوکاپ[6] نامیده می‌شود، بر پایه آزمایش لروی در سال ۱۷۵۱ عمل می‌کند. یک محفظه فلزی و صیقلی از مایع پر می‌شود و به طور مرتب با اضافه کردن یخ و یخ‌خشک سرد می‌شود. یک دماسنج دمای مایع را که فرض می‌شود با دمای هوای نزدیک به سطح خارجی محفظه یکسان است، اندازه‌گیری می‌کند. وقتی بر روی سطح خارجی محفظه چگالش روی می‌دهد، اپراتور دمای مایع را که فرض می‌شود با دمای نقطه شبنم هوا برابر است، یادداشت می‌کند. روش دیوکاپ نیز همانند روش استفاده از حباب تر و حباب خشک به اپراتور وابسته است، اما بسیار دقیق‌تر و تکرارپذیرتر است. متغیرهای کنترل‌نشده زیادی

---

[1] Gravimetric train
[2] Measurements traceable to National Institute of Standards and Technology
[3] Phosphoric anhydride
[4] Two-pressure Generator
[5] condensation hygrometers
[6] Dewcup

از جمله دید اپراتور، براق بودن سطح، آلودگی روی سطح، جریان هوای گذرنده از سطح، یکنواختی دمای مایع و تبخیر دوباره پس از چگالش وجود دارد. همه این موارد اندازه‌گیری دقیق با استفاده از دیوکاپ را دشوار می‌کنند.

سازندگان با استفاده از این قاعده پایه و با کنترل اتوماتیک سرد شدن سطح، براق بودن، نرخ جریان هوا و متصل کردن حسگر دما بر روی سطح، این وسیله را بهبود داده‌اند. کنترل این متغیرها، اندازه‌گیری چشمی دمای نقطه شبنم را تکرارپذیر می‌کند.

افزون بر این، مشاهده چگالش بر روی سطوح با استفاده از وسایل الکترونیکی، خودکار شده است. یک دیود ساتع کننده نور بر سطوح سرد می‌تابد. یک سلول نوری حساس، نور منعکس شده را دریافت می‌کند. وقتی سلول نوری نور کمتری را دریافت کند، فرض می‌شود که روی سطح سرد چگالش رخ داده است و دستگاه نور پخش می‌کند. دستگاه فرآیند سردسازی را کنترل می‌کند تا دمای سطح را دقیقا در دمای نقطه شبنم نگه دارد و بدین ترتیب می‌توان دمای نقطه شبنم را به دست آورد.



شکل ۹-۱۲

رطوبت‌سنج چگالش الکترونیکی

در چنین وسایلی، مشاهده شروع چگالش و سرمایش سطوح به طور خودکار به کمک قطعات الکترونیکی انجام می‌شود و در نتیجه دقت این وسایل بسیار بالاست و برای کالیبره کردن تجهیزات دیگر استفاده می‌شوند.

بسیاری از متخصصان رطوبت‌سنج نقطه شبنم الکترونیکی را دقیق‌ترین دستگاه برای اندازه‌گیری در بسیاری از شرایط به حساب می‌آورند و اغلب از این وسیله برای کالیبره‌کردن دیگر وسایل استفاده می‌شود. با این حال تعدادی منابع خطا نیز وجود دارد. یکی از آن‌ها آلودگی سطح سرد است. بیشتر تجهیزات طوری طراحی می‌شوند که خطای گرد و غبار سطوح را تصحیح می‌کنند. اما اگر خوردگی و مواد رطوبت‌گیر بر روی سطح وجود داشته باشد، دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. به علاوه ظرفیت سرمایش وسیله‌ها نیز محدود است؛ بنابراین اگر دما خیلی بالا باشد و دمای نقطه شبنم خیلی کم باشد، باید دقت داشت ظرفیت سرمایش کافی برای محدوده دمایی مورد نظر فراهم شود.

۹-۶-۳ حسگرهای آلومینیم‌اکسید

این وسیله‌ها بر اساس اصولی مشابه با حسگرهای ظرفیت خازنی که برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی بکار می‌روند، عمل می‌کنند. ظرفیت لایه نازکی از آلومینیم‌اکسید با جذب رطوبت تغییر می‌کند. حسگرهایی که به جای رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم را اندازه‌گیری می‌کنند، برای عمل کردن در رطوبت نسبی کم بهینه می‌شوند و می‌توانند کاملا دقیق باشند. یکی از مشخصات معمول آن‌ها اندازه‌گیری نقطه شبنم با دقت $\pm 3^{o}C$ است. آلومینیم‌اکسید بسیار رطوبت‌گیر است. این ویژگی برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی بسیار کم یک مزیت به شمار می‌آید و چنین وسیله‌هایی اغلب برای اندازه‌گیری دمای نقطه شبنم $-40^{o}F$ در دمای هوای بالاتر از $300^{o}F$ که از رطوبت‌گیرهای دسیکنت مورد استفاده برای رطوبت‌گیری رزین‌های پلاستیکی می‌آید، بکار می‌روند.



شکل ۹-۱۳

حسگر آلومینیم اکسید

آلومینیم اکسید شدیدا جاذب آب است که در نتیجه برای اندازه‌گیری دمای نقطه شبنم پایین که در دمای بالا اتفاق می‌افتد، بسیار مناسب است.

اکسیدها بخار آب را به شدت محصور می‌کنند و به همین دلیل باید دقت کرد. اگر جریان هوا از شرایط خیلی مرطوب به شرایط خیلی خشک تغییر کند، ممکن است زمان زیادی بگذرد تا حسگر به تغییر واکنش نشان دهد. نباید انتظار داشت که پس از اندازه‌گیری در پایین‌دست یک

کویل سرمایشی، بلافاصله در یک فضا در شرایط دمای ۷۰°F و دمای نقطه شبنم ۲۰°F- اندازه‌گیری دقیق انجام شود. همچنین، مرطوب شدن مکرر حسگرهایی که نزدیک به شرایط اشباع عمل می‌کنند، می‌تواند موجب تغییرات شیمیایی در لایه اکسیدی شود که مشخصات پاسخ حسگر را تغییر می‌دهد. این محدودیت‌ها را می‌توان با خشک نگه‌داشتن حسگر و اندازه‌گیری متناوب هوا کاهش داد. از این رو حسگر همواره از مقدار کمتر، نه مقدار بیشتر، به مقدار صحیح نزدیک می‌شود.

۹-۶-۴ حسگرهای تعادل نمک[1]

یک حسگر رطوبت ویژه دیگر، از مشخصات تعادل یک نمک رطوبت‌گیر استفاده می‌کند. لیتیم‌کلرید زمانی‌که رطوبت نسبی هوای اطراف تقریبا ٪۱۱ است، خشک است. وقتی این نمک در یک محلول قرار ندارد، مقاومتش بسیار بالاست.

یک حسگر نمک اشباع شده لایه‌ای از لیتیم‌کلرید را تا زمانی‌که کاملا خشک شود، گرم می‌کند که با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی آن تعیین می‌شود. دمای نمک اندازه‌گیری شده و سپس به رطوبت ویژه تبدیل می‌شود. برای مثال، اگر نمک باید در ۱۰۰°F باشد تا کاملا خشک شود، حسگر فرض می‌کند میزان رطوبت هوا باید ۲۶ گرین باشد، زیرا ۲۶ گرین نشان‌دهنده رطوبت نسبی ٪۱۱ در دمای ۱۰۰°F است.

این وسیله تا زمانی‌که لایه نمک تمیز و یکنواخت و حسگر دما پایدار است، بسیار تکرارپذیر است. از این حسگرها باید بسیار مراقبت و نگهداری شود، زیرا اگر در شرایط اشباع گرما از دست دهند، لایه لیتیم‌کلرید از بین می‌رود، نمک اشباع می‌شود و از حسگر بیرون می‌ریزد. اگرچه ظاهرا دیگر حسگرها به مراقبت کمتری نیاز دارند، اما مهندسان کارآزموده دریافته‌اند که همه حسگرها به مراقبت و کالیبره‌کردن منظم برای ارائه نتایج دقیق نیاز دارند.



شکل ۹-۱۴

حسگر تعادل نمک لیتیم‌کلریدی

این حسگر بر اساس خصوصیات تعادل یک نمک رطوبت‌گیر عمل می‌کند. یک هیتر نمک را کاملا خشک نگه می‌دارد و دمای نمک نیز مستقیما با مقدار رطوبت هوا متناسب است.

۹-۶-۵ رطوبت‌سنج الکترولیتی[2]

این وسیله‌ها برای اندازه‌گیری رطوبت خیلی کم و یا در دمای نقطه شبنم کمتر از ۵۰°F- بکار می‌روند. در این وسیله از جریان الکتریکی برای شکستن مولکول‌های آب به اتم های هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌شود.

جریان هوای بسیار کم و کنترل‌شده به سمت حسگر پوشیده شده با فسفریک آنیدرید که یک دسیکنت بسیار قوی است، هدایت می‌شود. دو الکترود که درون دسیکنت قرار داده شده‌اند، بخار آب جذب‌شده را الکترولیز می‌کنند. جریان مورد نیاز برای خشک نگه داشتن دسیکنت مستقیما با تعداد مولکول‌های هوای نمونه متناسب است. در دمای نقطه شبنم پایین که بکارگیری دیگر روش‌ها به دلیل ناچیز بودن مقدار رطوبت دشوار است، این روش بسیار دقیق است. وسیله‌های الکترولیتی می‌توانند تفاوت بین ۱۰۰ و ۱۲۵ قسمت در هر میلیون وزن رطوبت را که کمتر از یک چهارم درصد رطوبت نسبی در ۷۰°F است، تشخیص دهند.



شکل ۹-۱۵

رطوبت‌سنج الکترولیتی

این وسایل با استفاده از الکترولیز مولکول‌های آب را می‌شکنند. جریان الکتریکی مورد نیاز برای انجام این عمل با تعداد مولکول‌های آب موجود در هوای نمونه متناسب است.

[1] Salt equilibrium sensors
[2] Electrolytic hygrometers

از آنجایی که حسگرهای الکترولیتی بر هر یک از مولکول‌های جذب شده به وسیله آنیدرید فسفریک عمل می‌کنند، در صورت وجود آلودگی دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. به علاوه چون جریان هوای بیشتر، مقدار بیشتری مولکول آب به همراه خود به دسیکنت می‌آورد، نرخ جریان هوای نمونه باید به دقت کنترل شود.

۹-۷ حسگرهای رطوبت مواد

در بسیاری از کاربردهای رطوبت‌گیری هدف پروژه این است که یک ماده جامد را خشک کرد و یا از جذب دوباره رطوبت جلوگیری کرد. در هر دو هدف به اندازه‌گیری رطوبت جسم جامد، نه رطوبت هوا، نیاز است.

چندین روش برای اندازه‌گیری میزان رطوبت جامدات وجود دارد. در همه موارد نمونه‌گیری مناسب ضروری است و به فهم چگونگی رفتار مواد در شرایطی که کاملا خشک هستند، نیاز است. افزون بر این، این روش‌ها تغییر خواص مواد را از یک حالت خشک معلوم اندازه‌گیری می‌کنند، بنابراین اگر ماهیت ماده مشخص نباشد، اندازه‌گیری رطوبت امکان‌پذیر نخواهد بود. یکی از روش‌های معروف روش تیتراسیون کارل فیشر است.

۹-۷-۱ تیتراسیون کولنی کارل فیشر[1]

این روش بر اساس اندازه‌گیری جریان الکتریکی مورد نیاز برای واکنش آب و ید انجام می‌شود. این واکنش کاملا قابل پیش‌بینی است، برای هر میلی‌گرم آب موجود در محلول آب و ید و گوگرد دی‌اکسید به ۱۰٫۷۱ کولن نیاز است.

یک نمونه از ماده جامد در محلولی که حاوی حلال‌های رطوبت‌گیری برای گرفتن آب از ماده است، قرار داده می‌شود. سپس جریان لازم برای واکنش ید اندازه‌گیری می‌شود. این جریان متناسب با آب گرفته شده از ماده است.

با اینکه این روش کاملا دقیق است، به زمان زیادی نیاز است تا حلال کل آب را از ماده بگیرد، بنابراین تیتراسیون کولنی عموما برای توسعه داده‌های مبنای مواد که بعدا برای کالیبره‌کردن دیگر تجهیزات بکار برده می‌شود، استفاده می‌شود.



شکل ۹-۱۶

تیتراسیون کولنی

رطوبت مواد با استفاده از یک حلال گرفته می‌شود. سپس این وسیله جریان الکتریکی مورد نیاز برای واکنش رطوبت و ید را اندازه‌گیری کرده و مقدار رطوبت را محاسبه می‌کند.

۹-۷-۲ جذب امواج فروسرخ

آب پرتو فروسرخ را به خوبی جذب می‌کند. هر چه رطوبت یک ماده بیشتر باشد، پرتو فروسرخ بیشتری جذب خواهد کرد. اگر خواص جذب ماده خشک معلوم باشد، افزایش جذب مواد مرطوب متناسب با افزایش میزان رطوبت آن‌هاست.

با استفاده از این پدیده، یک ساتع‌کننده فروسرخ بر ماده جامد می‌تابد و یک سلول نوری انرژی منعکس‌شده را در دو طول موج جذب می‌کند، برای مثال طول موج ۱/۹ میکرون که توسط آب جذب می‌شود و طول موج ۱/۷ میکرون که آب آن را جذب نمی‌کند. مدارهای الکترونیکی، بزرگی این دو سیگنال را مقایسه می‌کنند و تفاوت آن‌ها متناسب با رطوبت ماده است. چون نرخ جذب رطوبت با دما تغییر می‌کند، این تجهیزات به حسگر دما مجهز هستند که به صورت خودکار اندازه‌گیری را تصحیح می‌کند.

از این روش بیشتر برای محصولات همگن و نازک استفاده می‌شود. برآمدگی‌های محصولات چون جرم بیشتری دارند، رطوبت بیشتری خواهند داشت. افزون بر این، اگر لایه‌ای که



شکل ۹-۱۷

آنالیزور فروسرخ

آب انرژی فروسرخ را جذب می‌کند. آنالیزور اختلاف انرژی جذب‌شده و منعکس‌شده از سطوح جسم را اندازه‌گیری می‌کند و سپس درصد رطوبت نسبی متناظر را نمایش می‌دهد.

[1] Coulombic Karl Fischer titration

در معرض انرژی فروسرخ قرار می‌گیرد، رطوبت بیشتر یا کمتری نسبت به لایه‌های دیگر داشته باشد، اندازه‌گیری رطوبت کل نمونه اشتباه می‌شود. ساختار و رنگ مواد نیز بر جذب رطوبت اثر می‌گذارد، بنابراین طول موج‌های بهینه برای مواد مختلف، متفاوت است. اما اگر حسگر برای یک محصول خاص طراحی شده باشد، دقت بسیار خوبی، تا ٪۰٫۱ مقدار واقعی محتوای رطوبی سطح، به دست می‌آید.

۹-۷-۳ گیرنده‌های رطوبت تعادلی[1]

حسگرهایی که رطوبت نسبی هوا را اندازه‌گیری می‌کنند، برای اندازه‌گیری تقریبی رطوبت مواد نیز بکار می‌روند. مواد جامد در صورتی‌که هوای اطراف خیلی خشک باشد، رطوبت خود را از دست می‌دهند و در هوای مرطوب رطوبت جذب می‌کنند. در نقطه‌ای بین دو حالت، ماده با رطوبت هوای اطراف در تعادل خواهد بود؛ نه رطوبت جذب می‌کند و نه از دست می‌دهد. نقطه تعادل به میزان رطوبت ماده، ساختار و ترکیب شیمیایی آن، دمای آن و رطوبت نسبی هوای اطراف بستگی دارد.



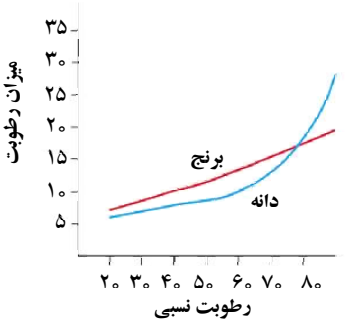
شکل ۹-۱۸

حسگر تعادلی

حسگرهای رطوبت نسبی برای تخمین سریع میزان رطوبت محصولات بکار برده می‌شوند. برای اطمینان از نتایج به دست آمده، این حسگر باید در "هوای مرده" و در تماس نزدیک با سطح محصول قرار داده شود.

اگر مشخص شود که ماده نه رطوبت می‌گیرد و نه از دست می‌دهد و رطوبت نسبی هوای اطراف نیز مشخص باشد، می‌توان میزان رطوبت ماده را به دست آورد. از آنجایی که ساختار و ترکیب شیمیایی مواد بر خواص رطوبت تعادلی تاثیر می‌گذارد، جداول مجزایی برای مواد مختلف وجود دارد که میزان رطوبت یک محصول در رطوبت نسبی مختلف را نشان می‌دهد.

برای بکارگیری یک حسگر رطوبت نسبی برای اندازه‌گیری رطوبت مواد باید ملاحظات مهمی را در نظر گرفت. نخست، حسگر باید در هوایی باشد که در تعادل کامل با محصول باشد. همچنین حسگر باید در هوای غیر چرخشی و نزدیک به سطح ماده قرار گیرد. برای مثال در یک انبار ذخیره کاغذ، حسگر باید در بین کاغذها قرار داده شود و نه اینکه در فضای انبار نصب شود. در محصولات دانه‌ای نیز حسگر باید مستقیما درون صندوق محصولات و نه بالای آن‌ها، قرار داده شود. افزون بر این، دقت اندازه‌گیری به اطلاعات تعادل ماده بستگی دارد. اگر اطلاعات تعادلی ماده خطا داشته باشد، خطای زیادی در اندازه‌گیری وارد می‌شود. همچنین اگر اطلاعات یک نوع دانه برای نوع دیگری استفاده شود، اندازه‌گیری با خطا همراه خواهد بود.



شکل ۹-۱۹

رطوبت تعادلی

در هر میزان رطوبت محصول، یک رطوبت نسبی متناظر وجود دارد که در آن،محصول نه رطوبتی می‌گیرد و نه از دست می‌دهد. اگر رطوبت نسبی سطح محصول تعیین گردد، می‌توان میزان رطوبت آن را به صورت تخمینی به دست آورد.

افزون بر این، فواید این روش نیز همانند دیگر وسایل اندازه‌گیری رطوبت مواد به یکنواختی ماده و اعتبار اطلاعات آماری ماده بستگی دارد. برای مثال حتی اگر رطوبت محصولات دانه‌ای موجود در انبار کاملا یکنواخت باشد، به دلیل اختلاف دما و انتقال حرارت جزئی پس از چند ماه ذخیره‌سازی رطوبت یکنواخت می‌شود. رطوبت دانه‌های موجود در بالای انبار ممکن است چندین درصد بیشتر از رطوبت دانه‌های ته انبار باشد. برای اندازه‌گیری دقیق اندازه‌گیری باید چندین بار انجام شود. همچنین سطح بیرونی قطعات بزرگ ممکن است از قسمت‌های درونی خشک‌تر و یا مرطوب‌تر باشد. ولی روش اندازه‌گیری رطوبت نسبی فقط رطوبت سطح بیرونی را اندازه‌گیری می‌کند.

[1] Equilibrium moisture detectors

روش تعادل اغلب در شرایطی که یافتن میزان دقیق رطوبت مد نظر نیست و موضوع اصلی تغییر مقادیر نسبت به اندازه‌گیری قبلی است، بکار می‌رود. هنگامی‌که رفتار احتمالی ماده مشخص است، با استفاده از این روش می‌توان به سرعت تغییرات را بررسی کرد.

۹-۷-۴ حسگرهای رطوبت مقاومتی[1]



شکل ۹-۲۰

حسگرهای مقاومتی

مقاومت الکتریکی مواد جامد به ساختار، ترکیب، دما و میزان رطوبت آن‌ها بستگی دارد. اگر متغیرهای دیگر معلوم باشند، تغییر در مقاومت مواد با میزان رطوبت آن‌ها رابطه دارد.

عموما مواد جامد و مرطوب رسانای الکتریسیته هستند. مقاومت آن‌ها در برابر جریان با میزان رطوبت رابطه عکس دارد. هر چه ماده خشک‌تر باشد، مقاومت بیشتری دارد.

حسگرهای مقاومتی با دو سوزن تیز که به عنوان الکترود عمل می‌کنند، به ماده نفوذ می‌کنند. جریان از یک الکترود به الکترود دیگر درون ماده عبور می‌کند و اپراتور مقدار مقاومت را یادداشت می‌کند. مقدار مقاومت ماده در حالتی که کاملا خشک یا کاملا مرطوب باشد، از قبل محاسبه شده است. از این رو اندازه‌گیری مقاومت ماده نشان می‌دهد که چند درصد رطوبت در ماده باقی مانده است.

مواد مختلف به الکترودهایی با شکل‌های متفاوت برای اندازه‌گیری نیاز دارند. برای مثال الکترود مناسب برای کاغذ را می‌توان به شکل صفحه‌ای عریض که به یک کاغذ در فاصله ثابت نسبت به دیگر کاغذها چسبیده است، ساخت. الکترود برای چوب را می‌توان به شکل سوزن و برای پودرها و دانه‌ها به شکل یک میله که الکترودها به انتهای آن متصل می‌شوند، طراحی کرد.

همانند دیگر روش‌های اندازه‌گیری رطوبت جامدات، فرض بر این است که اپراتور اطلاعات مرجعی دارد که با استفاده از آن‌ها می‌توان مقادیر مقاومت به دست آمده را به مقدار رطوبت هم‌ارز آن‌ها تبدیل کرد. به علاوه این وسیله مقاومت بین الکترودها را که معمولا روی سطح ماده هستند، اندازه‌گیری می‌کند. اگر هدف اندازه‌گیری رطوبت قطعات بزرگ و ضخیم باشد، الکترودها را باید وارد ماده کرد تا نتایج بهتری حاصل شود.

چوب مثالی خوبیست، زیرا رطوبت الوارها اغلب با استفاده از وسیله‌های مقاومتی اندازه‌گیری می‌شود. ذره انتهای الوار سریع‌تر از ذره کناری خود، رطوبت را جذب و دفع می‌کند و الوارهای بیرونی نسبت به الوارهای میانی بسیار خشک‌تر و یا مرطوب‌تر هستند. اگر هدف تعیین رطوبت میانگین کل الوارها باشد، باید در چندین نقطه از یک الوار و چندین الوار از قسمت‌های مختلف انبار اندازه‌گیری انجام شود.

در نهایت، مقاومت مواد مرطوب با دما افزایش می‌یابد، همانند آنچه در سیم‌های مسی رخ می‌دهد. از این رو وقتی دمای ماده بسیار بیشتر یا کمتر از $70^{o}F$ است، باید اصلاحات مربوط به دما را نیز در نظر گرفت.

۹-۷-۵ جذب مایکروویو[2]

یک روش دیگر اندازه‌گیری رطوبت جریان‌های پیوسته بر اساس اینکه آب مایکروویو را نیز همانند انرژی فروسرخ جذب می‌کند، عمل می‌کند. روش فروسرخ به سطح جسم محدود

[1] Resistance moisture sensors
[2] Microwave absorption



شکل ۹-۲۱

جذب مایکروویو

همانند انرژی فروسرخ، مایکروویو نیز توسط آب جذب می‌شود. از سامانه‌های مایکروویو برای اندازه‌گیری رطوبت در بسترهای عمیق و یا زمانی‌که رنگ‌های متنوع محصولات کارایی روش فروسرخ را محدود می‌کند، استفاده می‌شود.

می‌شود، اما مایکروویو می‌تواند به درون ماده نفوذ کند.

یک تولیدکننده مایکروویو در یک سمت ماده نصب می‌شود. در سمت دیگر، یک گیرنده، تغییرات دامنه و فاز مایکروویو را اندازه‌گیری می‌کند. کاهش دامنه تقسیم بر تغییر فاز با میزان رطوبت ماده متناسب است.

از آنجایی که درصد وزنی رطوبت ماده با تغییر چگالی آن تغییر می‌کند، یک فرستنده و گیرنده اشعه گاما، به طور پیوسته چگالی ماده را اندازه‌گیری کرده و مقدار به دست آمده را برای تصحیح اندازه‌گیری رطوبت استفاده می‌کند. دما نیز بر جذب مایکروویو اثر می‌گذارد، از این رو مدار دیگری نیز دمای ماده را اندازه‌گیری کرده و تصحیحات لازم را انجام می‌دهد.

دقت وسیله‌های جذب فروسرخ و جذب مایکروویو برابر است، اما وسیله‌های جذب فروسرخ ارزان‌تر هستند. به همین دلیل معمولا از روش جذب مایکروویو برای بسترهای عمیق و یا اجسام سیاه که روش جذب فروسرخ محدودیت دارد، استفاده می‌شود.

۹-۷-۶ حسگرهای فرکانس رادیویی

با توجه با اینکه خواص دی‌الکتریک آب بسیار متفاوت با جامدات است، می‌توان با اندازه‌گیری خواص ماده میزان رطوبت آن را تعیین کرد. آب ثابت دی‌الکتریک بزرگی دارد که بدین معناست که به سادگی شارژ می‌شود. اما افت دی‌الکتریک آن نیز بزرگ است و پس از قطع جریان شارژ را از دست می‌دهد.

در این روش یک تولیدکننده امواج رادیویی با یک مدار نوسان الکتریکی[1] ترکیب شده است. وقتی یک ماده در نزدیکی این وسیله قرار داده می‌شود، از امواج رادیویی انرژی دریافت می‌کند. این اتفاق موجب تضعیف مدار نوسانی شده و ولتاژ بیشینه آن متناسب با میزان رطوبت کاهش می‌یابد. همانند دیگر روش‌های جذب در این روش نیز دما بر اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارد، از این رو دما باید برای اندازه‌گیری صحیح تنظیم شود.

به طور ایده‌آل یکنواخت‌ترین و تجدیدپذیرترین حالت رطوبت باید در معرض دستگاه قرار داده شود. بنابراین برای دستیابی به بهترین نتایج ممکن، شکل تولید کننده امواج رادیویی باید متناسب با کاربرد مورد نظر طراحی شود.

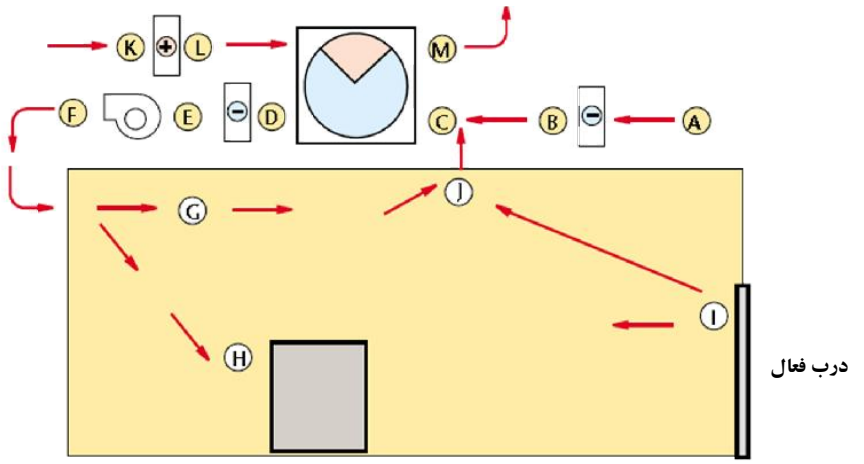


شکل ۹-۲۲

حسگرهای امواج رادیویی

متناسب با مقدار رطوبت موجود در یک ناحیه، امواج رادیویی تضعیف می‌شوند. این وسیله میزان ضعیف شدن امواج رادیویی را اندازه‌گیری می‌کند و سپس رطوبت نسبی معادل آن را نشان می‌دهد.

[1] Electrical oscillating circuit



شکل ۹-۲۳ انتخاب و نصب حسگر

موقعیت حسگر	دما (°F)	رطوبت (gr/lb)	نقطه شبنم (°F)	رطوبت نسبی
A	۹۵	۱۲۰	۷۲٫۵	۴۸
B	۵۵	۶۵	۵۵٫۰	۱۰۰
C	۶۹	۴۰	۴۲	۳۸
D	۱۰۹	۱۰	۱۲	۳
E	۵۵	۱۰	۱۲	۱۵
F	۵۸	۱۰	۱۲	۱۴
G	۶۰	۱۵	۲۰	۲۰
H	۸۲	۱۵	۲۰	۹
I	۷۰	۳۵	۳۹	۳۲
J	۷۲	۱۵	۲۰	۱۲
K	۹۵	۱۲۰	۷۲٫۵	۴۸
L	۲۵۰	۱۲۰	۷۲٫۵	<۱
M	۱۲۰	۲۵۸	۹۵	۴۹

برای اندازه‌گیری در محیط‌های مختلف و محدوده‌های مورد نظر به حسگرهای متفاوتی نیاز است. برای مثال:

موقعیت A و K: برای اندازه‌گیری رطوبت هوای محیط به حسگری نیاز است که نسبت به رطوبت بالا و چگالش مقاوم باشد. نسبت به نقاط دیگر، محدوده اندازه‌گیری در این دو نقطه بسیار وسیع است.

موقعیت B: هوا از کویل سرمایش عبور کرده است، بنابراین حسگر این نقطه باید نسبت به چگالش و قطرات آب مقاوم باشد. در این موقعیت یک دماسنج نیز اطلاعات کافی را در مورد میزان رطوبت فراهم می‌آورد، زیرا در اغلب اوقات سال، هوا در این قسمت اشباع است.

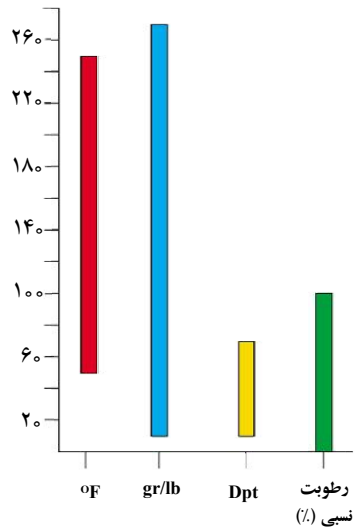
موقعیت C: اندازه‌گیری دما و رطوبت این نقطه نسبتا آسان است. فقط باید اطمینان حاصل شود که در این قسمت جریان‌های هوا به خوبی ترکیب می‌شوند.

موقعیت D: در پایین‌دست رطوبت‌گیر شانه زنبوری هوا لایه‌بندی دمایی و رطوبی شده است، دمای میانگین زیاد و رطوبت بسیار کم است. از آنجایی که هوا قبل از حسگر به خوبی ترکیب شده است، یک حسگر نقطه شبنم آلومینیم‌اکسید در این موقعیت عملکرد قابل قبولی خواهد داشت. محدوده اندازه‌گیری رطوبت در این نقطه از محدوده اندازه‌گیری حسگرهای رطوبت نسبی فراتر است.

موقعیت E و F: اندازه‌گیری رطوبت در پایین‌دست فن یا کویل سرمایش نسبت به اندازه‌گیری رطوبت بعد از رطوبت‌گیر راحت‌تر است، اما در شروع رطوبت‌گیری ممکن است این کویل سرمایش در شرایط اشباع باشد. حسگر نصب‌شده در این موقعیت باید نسبت به چگالش مقاوم باشد و هوای بعد از کویل سرمایش نیز باید به خوبی ترکیب شده باشد.

موقعیت G و H و I و J: نحوه توزیع هوا و میزان بارهای حرارتی و رطوبی، بر شرایط هوای نزدیک به حسگر تاثیر می‌گذارد. توزیع کاملا یکنواخت بار در داخل فضا امکان‌پذیر نیست، بنابراین حسگر را نباید در محل ایجاد بیشترین میزان بار رطوبی قرار داد، مگر اینکه کنترل در آن نقاط ضروری باشد.

موقعیت M: رطوبت نسبی هوای خروجی از فرآیند احیا رطوبت‌گیر در حد معمول است، اما با خاموش‌شدن رطوبت‌گیر، رطوبت زیاد در کانال چگالیده می‌شود. این محیط برای حسگر بسیار مخرب است، زیرا دمای آن بالاست، در آن چگالش رخ می‌دهد و امکان وجود مواد خورنده در این محیط زیاد است. در اکثر سامانه‌ها در این موقعیت فقط اندازه‌گیری دما مورد نیاز است.



۹-۸ ملاحظات کلی

۹-۸-۱ نصب حسگر

ارزش حسگرهای رطوبت به نتایجی است که در عمل به دست می‌دهند. مشخصات وسایل اندازه‌گیری تا زمانی‌که به درستی از آن‌ها استفاده نشود، بی‌معنی هستند. بیشتر مشکلات حسگرهای رطوبت را می‌توان با کالیبره‌کردن آن‌ها در محیط و محدوده مورد نظر برای انجام اندازه‌گیری برطرف کرد. اما مشکل بزرگ دیگر نصب نامناسب حسگر است.

در یک ماده یا فضای کنترل رطوبت مقدار رطوبت ممکن محدوده وسیعی دارد. شکل ۹-۲۳ این شرایط را نشان می‌دهد. توضیحات شکل برخی پیشنهادها برای حسگرهای مکان‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

محل نصب حسگرها حتی از میزان دقت آن‌ها نیز اهمیت بیشتری دارد. برای مثال پس از اجرای پروژه رطوبت‌گیری برای جلوگیری از خوردگی فولاد، سامانه نتوانست مشکل خوردگی را حل کند. پس از ارزیابی تکنسین‌ها مشخص شد که رطوبت‌گیر در ارتفاع ۷۵ft نصب شده است، اما هیومیدیستات کنترل‌کننده سامانه در نزدیکی هوای خشک خروجی از قرار داده شده است. رطوبت‌گیر از زنگ‌زدگی کانال تخلیه هوا جلوگیری کرد، اما قبل از اینکه محل هیومیدیستات تغییر داده شود، فولادهای موجود در انبار به ارزش ۵۰۰۰۰ دلار دچار زنگ‌زدگی شدند.

در هنگام اندازه‌گیری میزان رطوبت نیز باید پیش‌بینی‌های لازم انجام شود. باید توجه داشت که میزان رطوبت مواد بر روی سطح و درون آن‌ها الزاما یکنواخت نیست. اگر دقت اندازه‌گیری و رطوبت‌گیری یکنواخت ضروری باشد، برای تعیین میزان رطوبت باید اندازه‌گیری را چندین بار تکرار کرد.

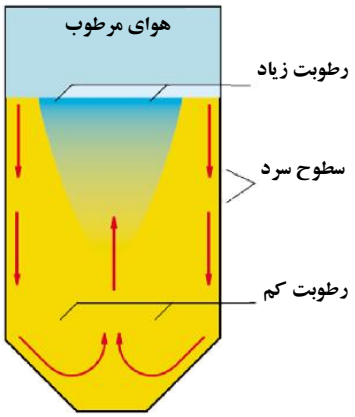
۹-۸-۲ اندازه‌گیری رطوبت در رطوبت نسبی کمتر از ٪۱۰

زمانی‌که سطح کنترل رطوبت پایین است، نحوه نصب حسگرها بسیار مهم است، زیرا اختلاف رطوبت در نقاط مختلف فضا ممکن است زیاد باشد. برای مثال تنفس افراد رطوبت فضای کاری را افزایش می‌دهد، در حالی‌که هوای خروجی از رطوبت‌گیر بسیار خشک است. افزون بر این، چون رطوبت هوا بسیار کم است، ممکن است زمان بیشتری طول بکشد تا حسگر تغییرات رطوبت را تشخیص بدهد.

شکل ۹-۲۴

جابجا شدن رطوبت در انبار

اختلاف دمای اندک انبار موجب ایجاد جریان‌های همرفت می‌شود. رطوبت می‌تواند جابجا شود و در نتیجه با اینکه در ابتدا رطوبت محصول به صورت یکنواخت بوده است، در آن اختلاف رطوبت ایجاد می‌شود.

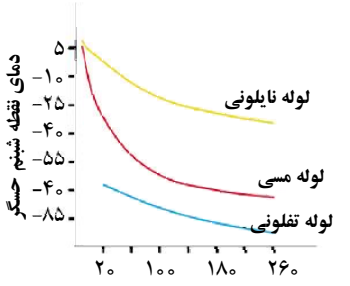


برای مثال اختلاف میزان رطوبت نسبی ٪۵۰ و ٪۵۵ در $70^{\circ}F$، برابر با ۶gr/lb است. اما در فضای تولید بخیه‌های جراحی، تفاوت بین دمای قابل قبول نقطه شبنم $-20^{\circ}F$ و دمای غیر قابل قبول $-15^{\circ}F$، کمتر از ۰/۶gr/lb است که ۱۰۰ برابر کمتر از اختلاف بین رطوبت نسبی ٪۵۰ و ٪۵۵ است. بدین معنی که مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا حسگر تغییرات را تشخیص دهد. در این حالت جزئیات ناچیز نیز بسیار مهم است و حسگر باید حساسیت بسیار بیشتری داشته باشد.

در بسیاری از اتاق‌های کم‌رطوبت حسگر گران‌قیمتی در مرکز فضا نصب شده و هوا از چندین نقطه گرفته شده و بدین ترتیب چندین نقطه به صورت همزمان اندازه‌گیری می‌شود. ولی اگر سطح کنترل رطوبت خیلی پایین باشد، ممکن است ساعت‌ها و یا حتی روزهای زیادی طول بکشد تا لوله‌های حسگرها کاملا خشک شوند و به همین دلیل خطایی وارد اندازه‌گیری نمی‌شود. شکل ۹-۲۵ نشان می‌دهد که چگونه یک لوله فلزی با گذشت زمان خشک می‌شود، اما لوله پلاستیکی بسیار طول می‌کشد تا برای اندازه‌گیری در دمای نقطه شبنم کمتر از $40^{\circ}F$ خشک شود. به همین دلیل، تولیدکنندگان ابزارهای اندازه‌گیری اغلب از فولاد ضدزنگ برای تولید لوله‌های حسگرها به منظور اندازه‌گیری در دمای نقطه شبنم کمتر از $-20^{\circ}F$ استفاده می‌کنند.

۹-۸-۳ محفظه‌های محیطی[1]

یکی از دشوارترین کارها در اندازه‌گیری رطوبت، نمایش و کنترل رطوبت محفظه‌های محیطی است. در این شرایط، محدوده دمایی و رطوبت بسیار گسترده است و شرایط بین نقاط مختلف دائما تغییر می‌کند. عملکرد حسگرها بسیار دشوار است و اگر دقت آن‌ها اهمیت زیادی داشته باشد، حسگر باید به طور مرتب کالیبره شود. به علاوه زمانی‌که محدوده اندازه‌گیری گسترده است، برای بهبود نتایج باید در چندین نقطه اندازه‌گیری انجام شود.



شکل ۹-۲۵

نمونه‌برداری از مدت زمان خشک شدن لوله‌ها

در رطوبت بسیار کم متغیرهای کوچک موجب ایجاد خطا در اندازه‌گیری رطوبت می‌شوند. این نمودار مدت زمان خشک شدن لوله‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری رطوبت را نشان می‌دهد. تا وقتی که لوله‌ها خشک نشده باشند، اندازه‌گیری دقیق رطوبت فضا در این دمای نقطه شبنم، امکاپذیر نیست.

به همین دلیل برای اندازه‌گیری دقیق در دمای کمتر از ۱۰°F-، تولیدکنندگان این تجهیزات از لوله‌های ساخته‌شده ازفولاد ضدزنگ استفاده می‌کنند.

۹-۹ منابع

[1] Cortina, Vincent. Precision Humidity Analysis. EG&G Environmental Equipment Division, 217 Middlesex Turnpike, Burlington, MA , 01803 USA

[2] General Eastern Instruments. 1982. Selecting Humidity Sensors for Industrial Processes. General Eastern Instruments, 50 Hunt st. Watertown, MA , 02172 USA

[3] Fordham, John. 1989. On-line Moisture Measurement. Moisture Systems Corporation, 117 South St. Hopkinton, MA 01748 USA.

[4] Hasegawa, Saburo 1985. National basis of accuracy in humidity measurements. Proceedings of the 1985 International Symposium on Moisture and Humidity Control in Science & Industry. Instrument Society of America, 67 Alexander Drive, Research Triangle Park, NC 27709

[6] Parameter Generation & Control, Inc. 1989. 3rd RH Sensor Compendium. Parameter Generation & Control, Inc., P.O. Box 128, Black mountain, NC 28711 USA

[7] Weisman, Sumner. 1983. Designing a sampling system for dewpoint measurements. Instruments and Control Systems magazine, April, 1983

[1] Environmental chambers

۱۰ کمینه کردن هزینه‌ها و حداکثر کردن مزایا

همانگونه که در فصل چهارم شرح داده شد، تجهیزات و سامانه‌های رطوبت‌گیری در بسیاری از کاربردها مزایای زیادی دارند. اما بدون سرمایه‌گذاری هیچ سودی وجود ندارد و در بسیاری از موارد سرمایه‌گذاری در تجهیزات رطوبت‌گیری می‌تواند قابل توجه باشد. کاهش هزینه و سرمایه تجهیزات و افزایش مزایای آن‌ها دغدغه اصلی مهندسان طراح و مالکان تجهیزات است.

هزینه‌ها و مزایای هر کاری هرگز مطلق نیست و به هزینه‌ها و مزایای جنبه‌های دیگر بستگی دارد. در بسیاری از موارد عدم سرمایه‌گذاری در پروژه‌های رطوبت‌گیری هزینه بسیار بیشتری نسبت به انجام سرمایه‌گذاری در پی خواهد داشت.

در بخش اول این فصل راهکارهایی برای شناسایی و تعیین مزایای اقتصادی پروژه رطوبت‌گیری ارائه می‌گردد. در بخش دوم نیز راه‌های کمینه کردن هزینه نصب و راه‌اندازی پروژه رطوبت‌گیری بررسی می‌شود.

۱۰-۱ شناسایی و تعیین مزایای اقتصادی

پروژه رطوبت‌گیری مزایای اقتصادی گوناگونی دارد. اما در مجموع در چهار دسته اصلی جای می‌گیرند:

- کاهش هزینه‌های بهره‌برداری
- کاهش هزینه سرمایه تجهیزات
- بهبود کیفیت محصول
- بهبود پاسخ‌های عملیاتی[1]

همه موارد بالا به معنی سود بیشتر یا امکان استفاده از منابع گران‌قیمت انرژی در کارهای دیگر است. تاثیر مزایای اقتصادی در طول عمر تقریبا ۲۰ ساله تجهیزات رطوبت‌گیر حیرت‌انگیز خواهد بود. در ادامه همه موارد بالا را به نوبت بررسی خواهیم کرد.

۱۰-۱-۱ کاهش هزینه‌های بهره‌برداری

در بازارهای رقابتی جهانی کمینه‌کردن هزینه‌های بهره‌برداری یک مزیت به شمار می‌رود. سامانه‌های رطوبت‌گیری به تحقق این امر کمک می‌کنند. برای مثال:

۱۰-۱-۱-۱ هزینه‌های توقف عملیات

بسیاری از پروژه‌های رطوبت‌گیری برای کاهش هزینه‌های توقف عملیات انجام می‌شود. چون عمده هزینه‌های عملیاتی مربوط به هزینه تجهیزات اصلی است، این وسایل باید مداوم مورد استفاده قرار گیرند تا سودآوری عملیات کاهش نیابد.

وقتی یک کشتی برای رنگ‌کردن در لنگرگاه است، خسارت‌های معطلی[2] آن می‌تواند بالای ۲۰۰۰۰ دلار در هر روز باشد. یک پروژه رطوبت‌گیری برای سرعت بخشیدن به رنگ‌کردن، خسارت معطلی چندین روز و یا حتی چندین هفته را کاهش می‌دهد. در تولید مواد دارویی و نیمه‌رساناها نیز حساسیت زیادی به میزان رطوبت وجود دارد و وجود رطوبت زیاد، موجب وقفه در عملیات می‌شود. کاهش زمان تولید هزینه‌ای بیش از ۴۰۰۰۰ دلار در هر روز خواهد داشت.

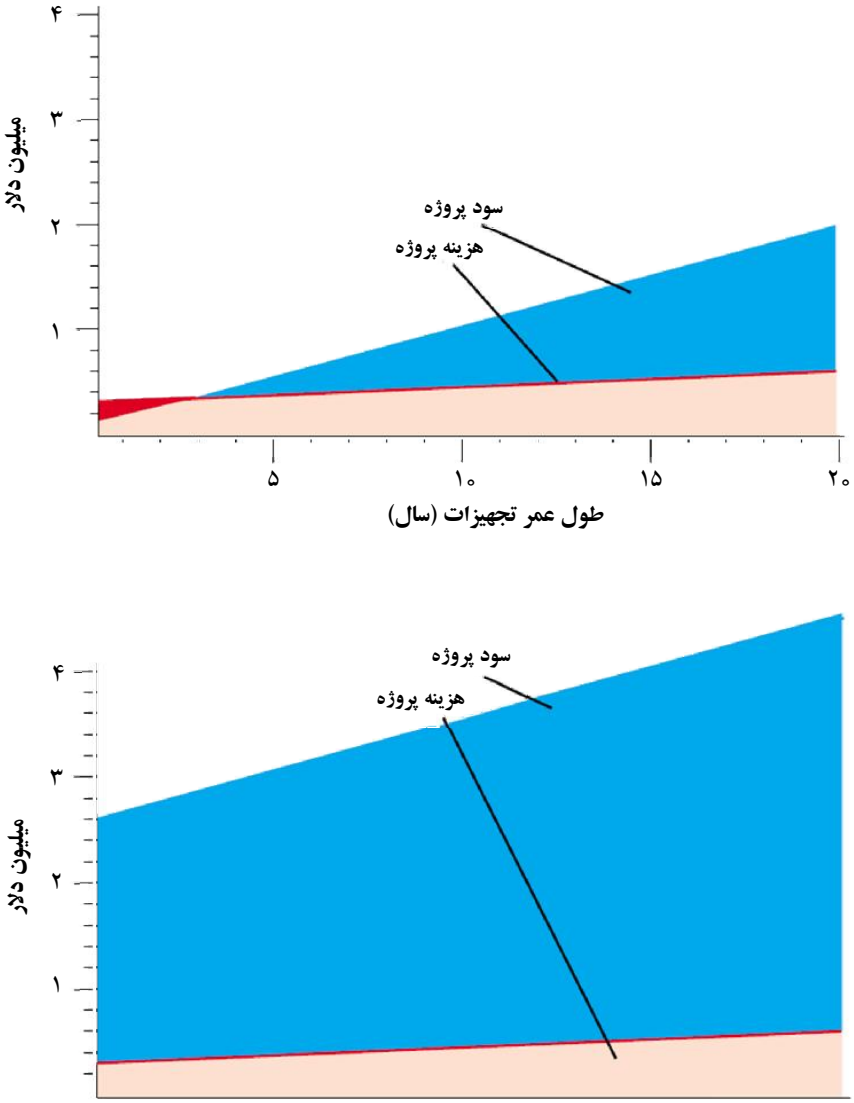
در تجارت اغلب با استفاده از "بیمه توقف عملیات[3]" سعی می‌شود خسارت ناشی از کاهش تولید به دلیل آتش‌سوزی، سیل و یا دیگر بلایای طبیعی جبران شود. اما هزینه شرکت‌های بیمه نیز بیش از ۱۰۰۰۰ دلار در هر روز است. با استفاده از یک رطوبت‌گیر برای خشک‌کردن سریع فضای کاری و تجهیزات تولید می‌توان شرایط عملیاتی مناسب را بدون توجه به مطالبات سنگین شرکت‌های بیمه ایجاد کرد و سودآوری تجارت را سرعت بخشید.

گاهی فرآیند تولید برای انجام برفک‌زدایی تجهیزات تولید و نوارهای نقاله متوقف می‌شود. اگر برفک‌زدایی در یک نوبت کاری اتفاق افتد، کارگران بیکار می‌شوند؛ در حالی که هزینه کارگر و تجهیزات با وجود توقف تولید، کاهش نمی‌یابد. استفاده از سامانه رطوبت‌گیری و تنظیم

---

[1] Operational response
[2] Demurrage charges
[3] Interruption insurance

برفک‌زدایی، بیش از ۱۰۰۰ دلار در هر ساعت صرفه اقتصادی به همراه خواهد داشت.



شکل ۱۰-۱

هزینه و مزایای پروژه رطوبت‌گیری

پروژه‌های رطوبت‌گیری یکی از فرصت‌های استثنایی برای سرمایه‌گذاری هستند که هزینه آن‌ها در مدت کوتاهی جبران می‌شود.

این نمودارها نشان‌دهنده دو دید متفاوت در مورد یک پروژه و ملاحظه یا عدم‌ملاحظه کاهش هزینه سامانه است.

نمودار بالا هزینه و مزایای پروژه رطوبت‌گیری برای کارخانه تولید قالب‌های تزریقی و شکل‌دهی پلاستیک PET برای تولید بطری‌های نوشیدنی را نشان می‌دهد. رطوبت‌گیری موجب دو برابر شدن سرعت تولید می‌شود که در نتیجه هزینه پروژه رطوبت‌گیری در کمتر از سه سال جبران می‌شود.

نمودار پایین همان پروژه قبل را نشان می‌دهد، اما در آن کاهش هزینه‌ها به کمک پروژه رطوبت‌گیری ملاحظه شده است. رطوبت‌گیر موجب دو برابر شدن ظرفیت تولید کارخانه شده است که در نتیجه نیاز به ساخت کارخانه ثانویه برطرف می‌شود.

۱۰-۱-۱-۲ کاهش کارکرد مجدد

اگر مواد به دلیل رطوبت بالا خراب شوند، ممکن است محصول و یا دستگاه قبل از فروش و استفاده، نیاز به دوباره‌کاری داشته باشد. به عنوان یک مورد مشخص می‌توان به خوردگی لبه‌های کویل‌های فولادی موجود در انبار اشاره کرد که در این صورت خواص الکتریکی فولاد برای استفاده در ترانسفورماتور از بین می‌رود. به دلیل اهمیت ابعاد مورد نیاز نمی‌توان با ساییدن خوردگی را از بین برد. بنابراین باید کویل‌ها را طی فرآیند دیگری به ابعاد مورد نیاز تبدیل کرد که موجب از بین رفتن مواد و توقف فرآیند تولید می‌شود. در یک مورد مشخص در این زمینه، استفاده از رطوبت‌گیری بیش از ۲۵۰۰۰۰ دلار در سال صرفه اقتصادی به همراه آورده است.

۱۰-۱-۱-۳ کاهش هزینه انرژی

رطوبت‌گیرهای دسیکنت می‌توانند برای گرفتن رطوبت هوا از منابع کم‌هزینه انرژی استفاده

کنند که در مقایسه با دیگر روش‌ها صرفه اقتصادی زیادی در پی خواهند داشت. یخچال‌های ویترینی موجود در یک سوپرمارکت رطوبت را دفع می‌کنند، اما عملکرد آن‌ها کارآمد نیست. با استفاده از سامانه رطوبت‌گیری هزینه انرژی سوپرمارکت‌ها تا ۳۰۰۰۰ دلار در سال کاهش می‌یابد.

سامانه‌های رطوبت‌گیر اغلب برای افزایش راندمان با سامانه‌های تبرید تراکمی ترکیب می‌شوند. اگر دمای اواپراتور بالاتر باشد، سامانه‌های تبرید بهتر عمل می‌کنند. اگر سامانه تبرید با هوای خشک خروجی از رطوبت‌گیر دسیکنت تغذیه شود، می‌تواند در دمای بالاتری عمل کند، زیرا نیازی به رطوبت‌گیری هوا ندارد. در این صورت بازده سامانه تبرید افزایش می‌یابد و هزاران دلار در ماه صرفه اقتصادی خواهد داشت.

۱۰-۱-۱-۴ کاهش نیاز به کارگر ماهر

در بسیاری از شرایط هزینه کارگران برای نگهداری و مراقبت از تجهیزات در برابر رطوبت بسیار زیاد است. برای مثال خوردگی کم مدارها و اتصالات وسایل خودکار هواپیماها نیز تنظیم آن‌ها را به هم می‌زند. تعداد افراد ماهر برای تنظیم مجدد این وسایل بسیار کم و هزینه آن‌ها بسیار زیاد است. با کنترل رطوبت می‌توان هزاران دلار در هزینه‌های کارگران صرفه‌جویی کرد.

۱۰-۱-۱-۵ هزینه‌های نگهداری

در صورت کنترل صحیح رطوبت، هزینه و بودجه مورد نیاز برای نگهداری تجهیزات بسیار کاهش می‌یابد. برای مثال شن‌زنی[1] و رنگ‌کردن کشتی‌های نفت‌کش و یا کارخانه‌های مواد شیمیایی بیش از ۱۰۰۰۰۰۰ دلار هزینه دارد. یک رطوبت‌گیر چسبندگی این پوشش را بهبود می‌بخشد و عمر آن را تا دو برابر افزایش می‌دهد که موجب کاهش هزینه‌های نگهداری از کارخانه یا کشتی در طول ۲۰ تا ۴۰ سال عمر آن‌ها می‌شود.

تجهیزات بسته‌بندی که با مواد رطوبت‌گیری همچون شیرینی، کود و پودر سروکار دارند، باید به طور مرتب تمیز شوند. هزینه این کار ممکن است بسیار گزاف باشد. با استفاده از یک سامانه رطوبت‌گیری که زمان تمیز کردن را کم می‌کند، می‌توان هزینه فرآیند را کاهش داد.

۱۰-۱-۱-۶ کاهش هزینه بیمه کارگران

در انبارهای سرد که کف آن‌ها یخ می‌زند، هزینه بیمه کارگران بیش از حد معمول است. با رطوبت‌گیری می‌توان از این هزینه‌ها جلوگیری کرده و آسیب‌دیدگی کارگران را کاهش داد.

مشکلات کیفیت هوای داخلی برخی از ساختمان‌ها به دلیل رشد میکروب‌ها در شرایط سرد و مرطوب است. با خشک‌کردن هوا با استفاده از رطوبت‌گیر می‌توان چنین مشکلاتی را کاهش داد و هزینه‌های زمان بیماری و مطالبات کارگران ناشی از بیماری‌های مربوط به رطوبت فضا را کمتر کرد.

۱۰-۱-۲ کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری

بودجه و سرمایه بسیاری از سازمان‌ها محدود است. با اینکه هزینه پروژه رطوبت‌گیری جزو

[1] Blast

هزینه سرمایه‌ای به شمار می‌رود، اما هزینه این تجهیزات اغلب کمتر از تجهیزات دیگر برای دستیابی به یک هدف مشخص است. برای مثال:

۱۰-۱-۲-۱ کاهش نیاز به توسعه کارخانه

برخی پروژه‌های رطوبت‌گیری به حدی سرعت تولید را افزایش می‌دهند که نیازی به ایجاد کارخانه ثانویه نخواهد بود. برای مثال کاهش دمای مایع خنک‌کننده "محفظه سردسازی[1]" در خط پوشش‌دهنده فیلم‌های عکاسی، سرعت تولید را تا دو برابر افزایش می‌دهد. با استفاده از یک رطوبت‌گیر و جلوگیری از چگالش بر روی سطوح سرد، ظرفیت تولید افزایش می‌یابد و نیازی به خط دوم پوشش‌دهی نخواهد بود. هزینه نصب و راه‌اندازی تجهیزات بخش پوشش‌دهی بدون لحاظ کردن پرسنل و مخارج بهره‌برداری ممکن است بین ۱۰ تا ۵۰ میلیون دلار باشد.

در قالب‌ریزی تزریقی[2] پلاستیک نیز بدون در نظر گرفتن هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه افراد، بهبود شرایط تولید معادل با کاهش هزینه برای ساخت کاخانه و تجهیزات جدید است. با استفاده از رطوبت‌گیری هزینه و زمان مورد نیاز برای توسعه کارخانه برطرف می‌شود.

۱۰-۱-۲-۲ کاهش هزینه تعویض تجهیزات

در بسیاری از صنایع تجهیزات بر اساس یک برنامه منظم تعویض می‌شوند. در صورت محدودیت بودجه و سرمایه تحمل هزینه این عمل دشوار است. برای مثال تجهیزات و اثاثیه‌های هتل‌ها و مهمان‌خانه‌ها به دلیل قارچ و کپک‌زدگی و همچنین فرسودگی وسایل به طور مرتب تعویض می‌شوند. جلوگیری از رشد قارچ و کپک موجب افزایش عمر اثاثیه‌ها شده و نیاز به تعویض آن‌ها کمتر می‌شود.

تجهیزات نظامی مثالی واضح در این مورد است. مهمات زنگ‌زده، موتورهای موشک که بر اثر رطوبت خراب شده‌اند و خوردگی اجزای بدنه هواپیما نیاز به تعویض پیش از موعد دارند که هزینه چند میلیون دلاری در پی خواهد داشت. نیروهای مسلح اغلب بودجه و منابع مالی کافی برای چنین هزینه‌ای ندارند. یک پروژه رطوبت‌گیری که از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری می‌کند، فرصت بزرگی را برای تخصیص منابع و بودجه فراهم می‌آورد.

۱۰-۱-۲-۳ کاهش هزینه اولیه سامانه‌های *HVAC*

وقتی کنترل رطوبت مهم است، هزینه سامانه‌های گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع افزایش می‌یابد. برای مثال اگر ساختمانی فضاهای معدودی داشته باشد که باید سطح رطوبت آن‌ها کنترل شود و برای همه آن‌ها یک سامانه آب خنک مرکزی تعبیه شده است، لازم است که سامانه تبرید در دمای کمتری راه‌اندازی شود تا رطوبت‌گیری نیز انجام شود. با افزودن یک رطوبت‌گیر برای کنترل رطوبت می‌توان با استفاده از سامانه تبرید بسیار کوچک‌تر، شرایط دمایی و رطوبتی آسایش ساختمان را ایجاد کرد و در هزینه اولیه نیز صرفه‌جویی می‌شود.

به علاوه در فرآیندها اغلب از حلال‌ها برای افزایش سرعت خشک‌شوندگی محصولات

---

[1] Chill box
[2] Injection molding

استفاده می‌شود. ریخته‌گری دقیق مثال بارزی در این زمینه است. هم از حلال‌ها و هم از آب می‌توان در دوغاب ریخته‌گری سرامیکی که برای تولید قالب بکار می‌روند، استفاده کرد. اما اگر از حلال استفاده شود، یک سامانه گران‌قیمت برای کنترل آلودگی هوا نیز باید نصب شود. با استفاده از دوغابی که در آن حلال اصلی آب است و کنترل پایین سطح رطوبت برای افزایش سرعت خشک شوندگی، می‌توان از هزینه‌های بسیار زیاد تجهیزات کنترل آلودگی جلوگیری کرد.

۱۰-۱-۲-۴ کاهش هزینه‌های ارتقا و بروزرسانی ساختمان‌های تجاری

در سال‌های اخیر، ساختمان‌های تجاری سرمایه‌گذاری‌های بزرگی در اتوماسیون اداری در قالب کامپیوتر، چاپگر و دستگاه‌های فاکس و کپی شخصی کرده‌اند. در بسیاری از موارد، این عمل بار حرارتی محسوس ساختمان را دو برابر کرده است. برای جلوگیری از مشکلات جسمی و سلامتی کارگران، برخی از مالکان تصمیم گرفته‌اند که نرخ هوای تهویه ساختمان را بیشتر کنند. این عمل نیز بار حرارتی محسوس و نهان را افزایش داده که بیشتر از ظرفیت سامانه‌های موجود خواهد بود.

رطوبت‌گیرهای دسیکنت برای برداشتن بار حرارتی نهان از سامانه موجود با پیش‌خشک‌کردن هوای تهویه بکار می‌روند. این هوای خشک ظرفیت رطوبت‌گیری بسیار زیادی دارد که در نتیجه نیازی به تعویض کانال‌های هوای تهویه نیست. افزون بر این، چون از انرژی حرارتی برای احیا رطوبت‌گیر دسیکنت استفاده می‌شود، از هزینه‌های سنگین بهبود تجهیزات توزیع برق نیز جلوگیری می‌شود.

۱۰-۱-۳ افزایش سود از طریق بهبود کیفیت

کیفیت بسیاری از محصولات و خدمات ارائه شده با استفاده از تجهیزات رطوبت‌گیری افزایش می‌یابد. این افزایش کیفیت موجب افزایش سود می‌شود که ممکن است در شرایط دیگر ممکن نباشد و یا در صورت امکان، هزینه آن‌ها بیشتر از هزینه سامانه‌های رطوبت‌گیری است. برخی نمونه‌ها عبارتند از:

۱۰-۱-۳-۱ بهبود بازار فروش از طریق ظاهر محصول

شکلات‌های عالی ظاهری خوب و براق دارند که توجه مشتریان را جلب می‌کند. این محصولات نسبت به شیرینی‌هایی که با چگالش در تونل تبرید[1] و روکش‌سازی تولید می‌شوند که ظاهر آن‌ها براق نیست، برای مشتریان ارزش بیشتری دارند. این تفاوت ظاهری می‌تواند فرصت سودآوری میلیون‌ها دلاری برای تولیدکنندگانی که در تکنولوژی رطوبت‌گیری سرمایه‌گذاری کرده‌اند را به همراه آورد. همچنین هزینه بازاریابی محصولات نیز بسیار زیاد است و ظاهر نامناسب محصولات، این هزینه‌ها را بی‌ثمر می‌کند.

[1] Cooling tunnels

۱۰-۱-۳-۲ کاهش ضایعات

در برخی فرآیندهای تولید، تولید کالای با کیفیت مهم نیست. بسیاری از تولیدکنندگان بین‌المللی نیز بر این عقیده هستند که " کیفیت رایگان است". بدین معنی که هزینه سرمایه‌گذاری بر تجهیزات تولید و کاهش ضایعات طی تولید محصول به سرعت جبران می‌شود. همچون سرمایه‌گذاری بر تجهیزات دیگر، سرمایه‌گذاری بر تجهیزات رطوبت‌گیری نیز موجب کاهش ضایعات می‌گردد.

برای مثال تولید نیمه‌رساناها به نوسانات بسیاری از متغیرهای تولید که یکی از آن‌ها میزان رطوبت اتمسفری است، حساس است. حتی بهبود ۲ درصدی در بازده تولید با کنترل دقیق میزان رطوبت هوا، به معنی کاهش هزاران دلاری هزینه ضایعات در یک روز است.

۱۰-۱-۳-۳ ارزش افزوده محصولات

خواص مکانیکی، شیمیایی و زیستی برخی از محصولات را می‌توان با استفاده از تجهیزات رطوبت‌گیری بهبود داد. برای مثال آنزیم‌های مورد استفاده در صنایع غذایی و کاربردهای مهندسی دیگر، با گرما از بین می‌روند. با استفاده از رطوبت‌گیر برای خشک‌کردن در دماهای پایین می‌توان به ارزش آن‌ها کمک کرد. بدین معنی است که یک مقدار مشخص از آنزیم نسبت به موادی که در دمای بالا خشک می‌شوند، تاثیر بیشتری دارند. آنزیم‌های قوی‌تر نسبت به موادی که قدرت کمتری دارند، با ارزش‌تر هستند.

سرعت رویش دانه‌ها نیز تا حد زیادی به دمای خشک‌سازی بستگی دارد. دانه‌های خشک‌شده در دمای پایین که با استفاده از رطوبت‌گیری حاصل می‌شود، سریع‌تر رشد می‌کنند و در نتیجه از دانه‌های خشک شده در دماهای بالاتر با ارزش‌تر هستند. ارزش غذایی ادویه‌ها، چای و دیگر مواد غذایی را نیز می‌توان به همین روش افزایش داد. یکی از مزایای استفاده از رطوبت‌گیر، افزایش ارزش‌افزوده محصولات و در نتیجه افزایش پتانسیل سوددهی آن‌ها است. با استفاده از چنین تجهیزاتی می‌توان سود فرآیند خشک‌سازی محصولات را برای بیش از بیست سال افزایش داد.

۱۰-۱-۴ بهبود واکنش‌های عملیاتی

برای شرکت‌هایی که در فضای تجاری کار می‌کنند، واکنش سریع به تغییرات بازار به عنوان یک مزیت به شمار می‌رود. پروژه‌های رطوبت‌گیری سرعت واکنش به تغییرات بازار را که رابطه مستقیمی با افزایش سود دارد، بهبود می‌بخشند. برای مثال:

۱۰-۱-۴-۱ تولید برق

نیاز الکتریکی در طول سال و حتی در یک ماه یا هفته تا حد زیادی تغییر می‌کند. تولید بیش از میزان مورد نیاز برق صرفه اقتصادی ندارد و از این رو ژنراتورهای زمان اوج مصرف اغلب خاموش هستند. با این حال، اجزای اصلی آن‌ها در زمان خاموشی نیز خورده می‌شوند. با رطوبت‌گیری می‌توان بدون نیاز به گریس‌کاری یا عایق‌های بخار[1]، امکان راه‌اندازی مجدد سریع ژنراتور با ظرفیت کامل را در شرایط تغییر بار فراهم آورد و از هزینه سنگین خرید برق از منابع

[1] Vapor-phase inhibitors

دیگر در شرایط اوج مصرف جلوگیری کند.

۱۰-۱-۴-۲ نگهداری برنامه‌ریزی‌نشده هواپیماهای غیر نظامی

بخش عمده مشکلات نگهداری هواپیماها مربوط به رطوبت هواست که می‌توان به خرابی وسایل ارتباطی، خوردگی بدنه و خوردگی تیغه توربین و پیچ‌ها اشاره کرد. هزینه استهلاک یک هواپیما بسیار زیاد است، مخصوصا وقتی هیچ هواپیمای جایگزینی موجود نباشد. استفاده از سامانه‌های رطوبت‌گیری و جلوگیری از اتفاقات پیش‌بینی‌نشده در نگهداری هواپیما، صرفه اقتصادی زیادی به همراه خواهد داشت.

۱۰-۱-۴-۳ آمادگی برای انجام ماموریت نظامی

در هر زمانی، برخی از تجهیزات نظامی‌توانایی انجام ماموریت‌های نظامی ندارند. استفاده از سامانه‌های رطوبت‌گیری به منظور افزایش قابلیت استفاده از این تجهیزات، به معنی این است که با تعداد تانک، هواپیما یا توپخانه کمتری می‌توان یک ماموریت را انجام داد که در این صورت هم هزینه تجهیزات و هم هزینه نگهداری آن‌ها بسیار کاهش می‌یابد. افزایش آمادگی برای انجام ماموریت ارزش زیادی در زمان جنگ دارد.

۱۰-۱-۴-۴ ذخیره محصولات کشاورزی

بسیاری از محصولات کشاورزی در زمان برداشت محصول نسبت به دیگر مواقع که این محصول موجود نیست، ارزش کمتری دارند. با استفاده از سامانه رطوبت‌گیری و محافظت از چنین محصولاتی تا زمانی‌که تقاضای بازار افزایش یابد، بهای محصول را بسیار بیشتر از هزینه سامانه رطوبت‌گیری افزایش می‌دهد.

۱۰-۲ کمینه کردن هزینه‌ها

با فرض اینکه همه کارها برای افزایش سوددهی سامانه‌های رطوبت‌گیری انجام شده است، طراح باید به کاهش منابع و هزینه‌های سامانه برای دستیابی به سود مورد نظر توجه کند. دو موضوع باید بررسی شود: هزینه اولیه و هزینه بهره‌برداری.

در شرایطی که کاهش هزینه‌های عملیاتی با بودجه محدود پروژه در تناقض است، تصمیم‌گیری دشوارتر است. متاسفانه برخی از سازمان‌ها بودجه کافی برای خرید چنین سامانه‌ای که هزینه آن طی چند ماه کارکرد جبران می‌شود، ندارند. البته بررسی این شرایط به این کتاب راهنما مربوط نمی‌شود. توجه ما به اینکه در صورت وجود منابع لازم، چه کاری باید برای کاهش هزینه انجام شود، معطوف می‌گردد.

۱۰-۲-۱ کمینه کردن هزینه اولیه

در واقع هزینه اولیه تنها با کمینه کردن میزان رطوبت‌گیری مورد نیاز برای دستیابی به شرایط مورد نظر و با انجام رطوبت‌گیری به کارآمدترین شکل ممکن، کمینه می‌گردد. به همین دلیل طراح باید به موارد زیر توجه کند:

- کمینه کردن بارهای رطوبی.

- بهینه‌سازی سطح کنترلی و ماکزیمم کردن تلرانس مورد نیاز.
- خشک‌کردن هوای محیط، قبل از آنکه به فضای کنترلی وارد شود.
- ترکیب تجهیزات رطوبت‌گیری دسیکنت و تبریدی.

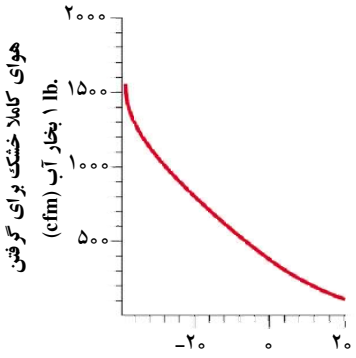
۱۰-۲-۱-۱ کمینه کردن بارهای رطوبی

انبار سرد بررسی شده در فصل هفتم مثال خوبی از چگونگی کمینه کردن بار رطوبی برای کمینه‌کردن هزینه اولیه به دست می‌دهد. در آن مثال طراح با وضعیتی روبرو شد که بار رطوبی ورودی از درب‌ها بسیار زیاد بود. در آن شرایط امکان خرید تجهیزات مورد نیاز بدون توجه به میزان سود آن‌ها وجود نداشت و انجام پروژه غیر ممکن بود. اما در آن مثال طراح با تغییر زمان مجاز ماکزیمم باز بودن درب‌های انبار، بار رطوبی را به کمتر از نصف محاسبات اولیه کاهش داد و هزینه اولیه کمتر از نصف شد.

این مثال ساختگی است و اغلب طراحان کنترلی بر فعالیت درب‌ها ندارند، اما قاعده کلی درست است؛ وقتی سرمایه محدود است، طراح باید با احتیاط کامل محاسبات بارهای رطوبی را دوباره بررسی کند. ممکن است بتوان با کاهش زمان باز و بسته شدن درب‌ها، کاهش هوای خروجی و یا بهبود پوشش ساختمان میزان رطوبت را با هزینه کمتری نسبت به خرید سامانه رطوبت‌گیری بزرگ‌تر کنترل کرد.

هودهای خروجی آزمایشگاهی هزینه زیادی در پی دارند، زیرا هوای خروجی از آن‌ها را نیز باید با هوای خشک جایگزین کرد. البته در اغلب موارد می‌توان با تنگ کردن مجرای هود بدون اینکه مشکلی ایجاد شود.

طراح نباید به تغییراتی که ممکن است در آینده در ساختمان ایجاد می‌شود، خوشبین باشد. با این وجود به راحتی می‌توان برخی از بارهای رطوبی بزرگ را با استفاده از درزگیر، نوار آلومینیمی و عایق‌های بخار کاهش داد.



شکل ۱۰-۲

رطوبت کم نیازمند جریان هوای بزرگ است.

با کاهش سطح کنترل رطوبت، به مقدار هوای بیشتری برای گرفتن بار رطوبی نیاز است. هزینه سامانه نیز با مقدار هوای مورد نیاز متناسب است. این مثال نشان‌دهنده مقدار هوای کاملا خشک مورد نیاز برای گرفتن یک پوند بخار آب در شرایط کنترلی متفاوت است.

۱۰-۲-۱-۲ بهینه‌سازی سطح کنترلی و ماکزیمم کردن تلرانس مورد نیاز

هر چه سطح کنترل رطوبت کاهش می‌یابد، طراح باید بیش از پیش دقت کند که دمای نقطه شبنم یا تلرانس مورد نظر را زیاد انتخاب نکند. این نکته به خصوص در دمای نقطه شبنم کمتر از ۰°F (۵٫۵gr/lb) اهمیت بیشتری دارد. حتی اگر بتوان هوای کاملا خشک ایجاد کرد، با کمتر شدن سطح کنترل رطوبت، مقدار هوای خشک لازم برای رطوبت‌گیری افزایش می‌یابد. این به معنی نیاز به رطوبت‌گیر بسیار بزرگ‌تر برای رطوبت‌گیری همان میزان بار رطوبی است.

برای مثال اگر بار رطوبی یک فضا برابر با یک پوند در ساعت باشد و سطح کنترلی در ۵٫۵gr/lb تنظیم شود، برای گرفتن بار رطوبی و کنترل رطوبت فضا در سطح کنترلی مورد نظر به ۲۳۸cfm هوای کاملا خشک نیاز است. اگر سطح کنترلی به دمای نقطه شبنم ۱۵°F- (۲٫۵gr/lb) کاهش یابد، سامانه رطوبت‌گیری به ۶۲۲cfm هوا نیاز دارد و در دمای نقطه شبنم ۲۷°F- (۱٫۲gr/lb) به ۱۲۹۶cfm هوا نیاز خواهد بود که در همه این شرایط هزینه اولیه بدون بیشتر شدن بار رطوبی بسیار افزایش می‌یابد.

طراح می‌تواند برای کاهش هزینه‌ها، مقادیر تلرانس را بررسی کند و مثل تعیین سطح کنترلی، با کمتر شدن سطح کنترلی و کاهش تلرانس مورد نظر، هزینه سامانه بسیار افزایش می‌یابد. افزون بر این، اشتباه در تعیین تلرانس هزینه زیادی در پی خواهد داشت.

برای مثال محفظه شبیه‌سازی را در نظر بگیرید که در آن به سطح رطوبت کنترلی ۱۵gr/lbو تلرانس ۵gr/lb± نیاز است. شرایط ذکر شده دو معنی می‌تواند داشته باشد. ممکن است یک پیمانکار مقصود طراح را اینگونه تعبیر کند که "شرایط رطوبی هوای خروجی از رطوبت‌گیر که به فضای مورد نظر تخلیه می‌شود، نباید از سطح تعیین‌شده بیش از ۵gr/lb± تغییر کند. در حالی که پیمانکار دیگری به شکلی دیگر تعبیر کند که "شرایط رطوبی در کل اتاق باید یکنواخت باشد. رطوبت در هر نقطه از اتاق نباید بیشتر از ۵gr/lb± تغییر کند".

پیمانکار اول می‌تواند شرایط مورد نظر را با هر مقدار هوا، شاید مقدار کمی هوا، با رطوبت ۱۵gr/lb تامین کند. سطح کنترلی در دیگر نقاط اتاق ممکن است بیشتر از ۲۰ گرین شود، اما در شرایط مورد نظر به وضوح بیان نشده است. پیمانکار دوم هوای کافی برای رطوبت‌گیری را فراهم می‌کند، در حالی که اختلاف میزان رطوبت ورودی و خروجی رطوبت‌گیر کمتر از ۵گرین خواهد بود. در این حالت سامانه رطوبت‌گیری بسیار گران‌تر است.

طراح می‌تواند در مورد هزینه سامانه رطوبت‌گیری در شرایط مختلف با تولیدکنندگان رطوبت‌گیر مشورت کند. به خصوص وقتی سطح کنترل رطوبت مورد نظر پایین است، این کار بسیار سودمند خواهد بود.

۱۰-۲-۱-۳ ترکیب تجهیزات رطوبت‌گیری دسیکنت و تبریدی

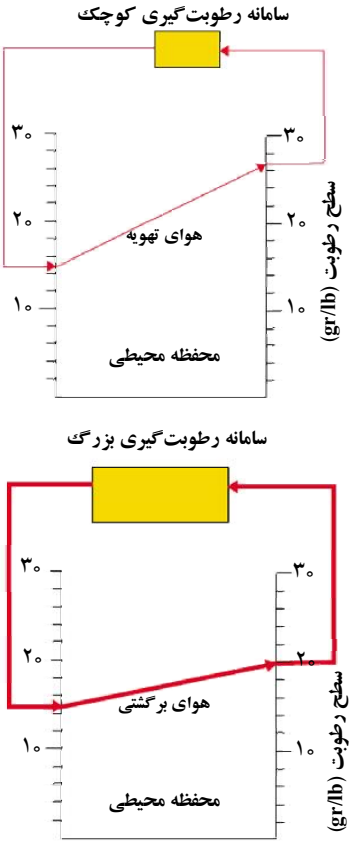
در دمای نقطه شبنم بیشتر از ۵۰°F استفاده از سامانه‌های تبرید برای انجام رطوبت‌گیری سودمندتر است. در دماهای کمتر، تجهیزات دسیکنت کارآمدتر هستند. اما هنگامی که هوای مرطوب برای تهویه به فضایی با سطح کنترلی پایین آورده شود، این معیار به هم می‌خورد و طراح باید ترکیبی از این دو سامانه را در نظر بگیرید. در بسیاری از موارد هزینه نصب و راه‌اندازی سامانه‌ای که هر دو تکنولوژی را بکار می‌برد، از هزینه سامانه‌ای که از یک تکنولوژی استفاده می‌کند، کمتر است. این ویژگی به خصوص برای سامانه‌های تهویه مطبوع ساختمان‌های بزرگ کاملا صدق می‌کند. در فصل هشتم این فرآیند بهینه‌سازی با جزئیات شرح داده شد.

۱۰-۲-۲ کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری

کاهش هزینه بهره‌برداری نیز همانند هزینه نصب، به کاهش بار رطوبی و استفاده از منابع انرژی کم‌هزینه‌تر بستگی دارد. برخی از جنبه‌های این کار در کنترل طراح سامانه نیست، زیرا به نحوه راه‌اندازی سامانه و یا نحوه تغییر فرآیندهای تولید مربوط می‌شود. با این حال، طراح مهم‌ترین روش‌های کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری همچون تنظیم انرژی مصرفی با توجه به تغییرات بار و استفاده از کم‌هزینه‌ترین منابع انرژی موجود را می‌تواند کنترل کند.

۱۰-۲-۲-۱ تنظیم انرژی مصرفی با توجه به تغییرات بار

خرید یک ماشین بدون پدال گاز و جعبه‌دنده غیر ممکن است. شاید به طور خیالی بتوان



شکل ۱۰-۳

ابهام در توضیحات

در این مثال به فضایی با شرایط کنترلی در ۱۵gr/lb±۵gr/lb نیاز است، اما مکان اندازه‌گیری مشخص نشده است (درون اتاق یا کانال‌های هوای تهویه). در سطح کنترل رطوبت پایین چنین ابهاماتی موجب طراحی متفاوت سامانه می‌شود.

ماشین را با یک کلید روشن–خاموش و ترمز برای کنترل قدرت موتور به حرکت درآورد. با این وجود تا سال‌های اخیر طراحی سامانه‌های رطوبت‌گیری بدون کنترل‌هایی برای ظرفیت رطوبت‌گیر، انرژی احیا و انرژی سردسازی انجام می‌شد.

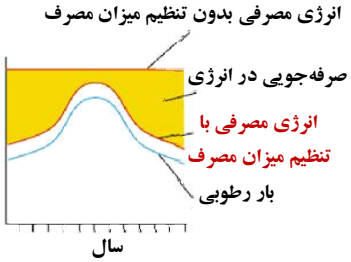
اهمیت تنظیم انرژی مصرفی به اندازه و ماهیت تغییرات بار رطوبی بستگی دارد. برخی از سامانه‌ها، مثل سامانه‌های ذخیره‌سازی طولانی مدت، فقط به یک کلید روشن–خاموش نیاز دارند، زیرا بارهای رطوبی کوچک و تقریبا ثابت هستند و کنترل دقیق صرفه اقتصادی ندارد. در برخی سامانه‌های دیگر، مثل سامانه‌های تولید نیمه‌رسانا، دقت سامانه اهمیت زیادی دارد و بیشتر بار رطوبی ناشی از هوای تهویه است که در بازه زمانی کوتاه تغییرات ناگهانی می‌کند.

حتی زمانی‌که دقت سامانه مطرح نیست، تصمیم‌گیری در مورد کنترل و یا عدم کنترل انرژی مصرفی سامانه نسبتا آسان است. می‌توان هزینه بهره‌برداری سالانه سامانه‌های بدون‌کنترل را با هزینه نصب آن‌ها مقایسه کرد. اگر هزینه سالانه درصد بالایی از هزینه نصب باشد، باید انرژی مصرفی سامانه را با توجه به تغییرات بار کنترل کرد. در این صورت با کنترل انرژی مصرفی، می‌توان هزینه سالانه انرژی را حدود ٪۲۵ تا ٪۵۰ کاهش داد.

در یک رطوبت‌گیر دسیکنت چرخان انرژی مصرفی احیا را می‌توان با کاهش نرخ جریان هوا یا کاهش دمای هوای ورودی به سمت احیا تنظیم کرد. برای کاهش انرژی، حسگر نصب‌شده در جریان هوای خروجی از احیا سیگنال می‌دهد. چون هوا در سمت احیا رطوبت می‌گیرد، دمای محسوس آن کاهش می‌یابد، همانطور که دمای هوای اطراف یک آب‌پاش در تابستان با جذب رطوبت کاهش می‌یابد. کاهش دما با میزان جذب رطوبت متناسب است. اگر میزان رطوبت کم باشد، دمای هوای احیا زیاد می‌شود که نشان‌دهنده این است که سامانه به انرژی کمتری نیاز دارد. از این رو هر چه دمای هوای خروجی از احیا بیشتر شود، حسگر دما به سامانه کنترل برای کاهش انرژی مصرفی سیگنال می‌دهد.

برای تنظیم انرژی مصرفی رطوبت‌گیر دسیکنت دو روش وجود دارد. روش اول را می‌توان "تعقیب بار احیا[1]" نامید که همان سامانه کنترلی است که در بالا شرح داده شد. انرژی احیا با کاهش بار رطوبی هوای فرآیندی، کاهش می‌یابد. این سامانه کنترلی کمترین هزینه و بیشترین سود را در پی دارد.

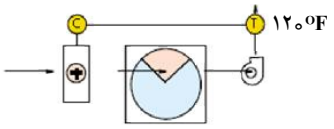
روش دیگر را می‌توان "پیکربندی مجدد تجهیزات[2]" نامید. وقتی بار رطوبی فضا کمتر از مقدار طراحی است، بازده سامانه (اندازه‌گیری شده بر حسب BTU بر پوند بخار آب گرفته شده) پایین می‌آید. این حالت مثل استفاده از یک کامیون بزرگ برای انتقال یک جعبه میوه است؛ کامیون باید کل مسیر را طی کند، در حالی که بار آن بسیار کمتر از توان کامیون است. اما برخلاف این مثال، در شرایط بار رطوبی کم می‌توان با استفاده از حسگرهای مختلف، ریزپردازنده‌ها و استفاده از موتورهای با سرعت متغیر برای فن، اجزای تبرید و گرداننده دسیکنت، عملکرد تجهیزات رطوبت‌گیری را بهبود داد. هزینه چنین سامانه‌ای در مقایسه با فواید آن بسیار



شکل ۱۰-٤

تنظیم انرژی مصرفی متناسب با بار رطوبی

ظرفیت سامانه‌های رطوبت‌گیری اغلب برای گرفتن ماکزیمم بار رطوبی تعیین می‌شود. اما بارهای رطوبی ماکزیمم فقط در بازه زمانی کوتاهی اتفاق می‌افتند. با اینکه سامانه دارای کنترل‌کننده برای تنظیم انرژی مصرفی است، اما بدون توجه به بار رطوبی، انرژی مصرفی سامانه ثابت است؛ دقیقا مشابه اتومبیلی که دارای کلید روشن–خاموش است، اما پدال گاز ندارد.



شکل ۱۰-۵

تنظیم انرژی مصرفی در فرآیند احیا

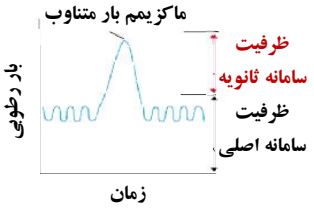
در رطوبت‌گیرهای چرخان حاوی دسیکنت لیتیم کلریدی، زمانی‌که دمای هوای خروجی از احیا بیشتر از ۱۲۰°F شود، انرژی مصرفی احیا کاهش می‌یابد. دمای بالای هوای خروجی از احیا نشان‌دهنده این است که در فرآیند احیا تبخیر کمی صورت گرفته است که به معنی این است که رطوبت کمتری در سمت هوای فرآیندی رطوبت‌گیر جذب شده است.

[1] Reactivation load following
[2] Equipment reconfiguration

زیاد است، اما ممکن است برای سامانه‌های بسیار بزرگ به صرفه باشد. برای کاهش هزینه نصب راه حل ذکر شده در پاراگراف بعد نسبت به روش "پیکربندی مجدد تجهیزات" مناسب‌تر است.

۱۰-۲-۲-۲ سامانه‌های چندگانه برای بارهای نامساوی

راه دیگر برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سامانه‌های بزرگ، مطابقت دادن تجهیزات و میزان بار است. مثلا مزایای استفاده از کامیون و راه‌آهن را در حمل ونقل در شرایط مختلف در نظر بگیرید. وقتی بارها زیاد و متوالی هستند و باید از یک مسیر یکسان بگذرند، استفاده از راه‌آهن باصرفه‌تر است. اما وقتی مقدار بارها و مکان آن‌ها متناوب و متفاوت است، استفاده از کامیون مناسب‌تر است. برای حالت دوم راه‌آهن بسیار بزرگ و گران است. همانند این مثال، سامانه‌های رطوبت‌گیری مرکزی بزرگ برای زمانی‌که بارهای رطوبی زیاد و متوالی هستند، مناسب است. اما وقتی شرایط متنوع است، استفاده از سامانه‌های مجزای کوچک‌تر صرفه اقتصادی بیشتری دارد.



شکل ۱۰-۶

بارهای متناوب

اگر در یک فضا بارهای رطوبی بزرگ و متناوب ایجاد می‌شود، استفاده از دو سامانه کوچک به جای یک سامانه بزرگ بسیار باصرفه‌تر است. سامانه ثانویه در صورت نیاز روشن می‌شود. سامانه اصلی به طور مرتب کار می‌کند و هزینه آن نسبت به یک سامانه بزرگ که در شرایط نیمه-بار کار می‌کند، کمتر است.

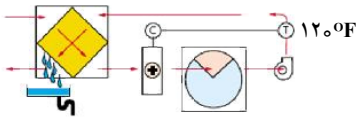
برای مثال انبار سرد آبجوسازی که رطوبت آن کنترل می‌شود را در نظر بگیرید که برای گرفتن گاز کربن‌دی‌اکسید ناشی از تخمیر، هوای تهویه با بار رطوبی ثابتی وارد فضا می‌شود. وسایل موجود در انبار نیز گهگاه شسته می‌شوند که بدین جهت بار رطوبی زیادی در فضا ایجاد می‌شود. اگر طراح سامانه اصلی را برای شرایط اوج بار رطوبی و اوج رطوبت داخلی طراحی کند، سامانه مورد نیاز بزرگ می‌شود و کنترل آن در شرایط کنترلی پایین دشوار است. اما بسیار به صرفه‌تر خواهد بود اگر سامانه اصلی برای شرایط آب و هوایی بیشینه طراحی شود و یک سامانه مجزای کوچک‌تر برای شرایطی که سامانه اصلی نمی‌تواند به صورت همزمان اوج بار تهویه و بار داخلی فضا را تحمل کند، به سامانه اصلی اضافه شود.

۱۰-۲-۲-۳ استفاده از انرژی‌های کم‌هزینه برای احیا سامانه

در سه بخش از رطوبت‌گیر دسیکنت انرژی مصرف می‌شود: انرژی الکتریکی برای فن‌ها و پمپ‌ها، انرژی الکتریکی یا حرارتی برای سرمایش و انرژی حرارتی برای فرآیند احیا رطوبت‌گیر. بیشترین انرژی برای فرآیند احیا صرف می‌شود (بر حسب BTU) و به همین دلیل روش‌های خلاقانه زیادی برای کمینه‌سازی هزینه این فرآیند ایجاد شده است.

به عنوان کم‌هزینه‌ترین منبع انرژی طراح می‌تواند گرمای سامانه‌های تولید همزمان، گرمای کندانسور سامانه‌های تبرید و یا گرمای خروجی از فرآیند احیا را بازیافت کند. در یک رطوبت‌گیر دسیکنت چرخان هوای خروجی از رطوبت‌گیر بسیار گرم و مرطوب است. می‌توان با استفاده از یک مبدل حرارتی هوا به هوا بین هوای خروجی و ورودی به سمت احیا، انرژی خروجی از سامانه را برای استفاده مجدد بازیافت کرد. با سرمایه‌گذاری کم برای خرید مبدل حرارتی می‌توان ٪۶۰ تا ٪۸۰ انرژی خروجی از سامانه، که مطمئنا کم‌هزینه‌ترین منبع انرژی است، را بازیافت کرد.

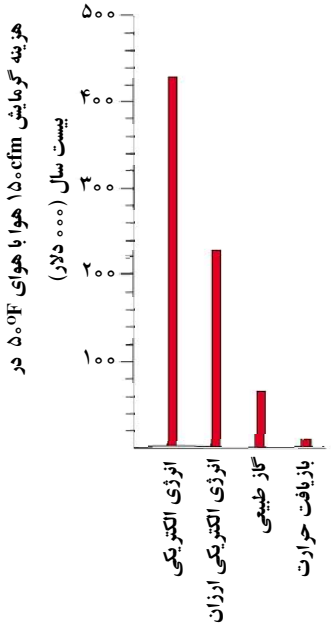
در یک رطوبت‌گیر دسیکنت مایع نیز می‌توان از مبدل حرارتی مایع به مایع بین دسیکنت گرم خروجی و دسیکنت سردتر ورودی به احیا استفاده کرد. این کار بسیار سودمند است، زیرا از آنجایی که دسکینت قبل از ورود به احیا پیش‌گرم می‌شود، انرژی مصرفی احیا کاهش می‌یابد. به



شکل ۱۰-۷

بازیافت حرارت احیا

کم‌هزینه‌ترین انرژی برای احیا رطوبت‌گیر، انرژی تلف‌شده در فرآیند احیا است. در این طراحی، یک مبدل‌حرارتی هوا به هوا بین جریان هوای فرآیندی ورودی و خروجی رطوبت‌گیر نصب شده است. حرارت تلف‌شده، هوای ورودی به سامانه را پیش‌گرم می‌کند و در قسمت دیگر مبدل حرارتی، رطوبت مازاد چگالیده و تخلیه می‌شود.



شکل ۱۰-۸

هزینه انرژی مصرفی احیا

انرژی بازیافت‌شده از احیا، سامانه‌های تبرید یا سامانه‌های تولید همزمان، تاکنون ارزان‌ترین منابع انرژی در طول بیست سال عمر معمول تجهیزات هستند. این نمودار شامل هزینه تجهیزات بازیافت و هزینه انرژی مصرفی فن مبدل‌حرارتی می‌شود.

علاوه چون دمای دسیکنت قبل از ورود به جریان هوای فرآیندی کمتر می‌شود، انرژی کمتری برای سرد کردن هوای فرآیندی نیاز است.

کندانسور سامانه‌های تبرید با خنک‌کردن هوای عبوری گرمای آن را بیرون می‌دهد. از این گرما می‌توان برای پیش‌گرم کردن هوای ورودی به سمت احیا رطوبت‌گیر استفاده کرد. سامانه‌های تبرید دارای کویل "بخار فوق‌گرم[1]" برای سردکردن مبرد بین کمپرسور و کندانسور هستند. می‌توان این کویل را طوری طراحی کرد که گرمای خروجی کندانسور را به سمت احیا رطوبت‌گیر انتقال دهد.

در سامانه‌های تولید همزمان نیز گرما تولید می‌شود که می‌توان از آن برای فرآیند احیا رطوبت‌گیر استفاده کرد. گرمای تولیدی موتورهای این فرآیند به آب خنک داده می‌شود. می‌توان از این آب گرم خروجی برای پیش‌گرم کردن هوا قبل از ورود به سمت احیا رطوبت‌گیر دسیکنت جامد استفاده کرد. در رطوبت‌گیر دسیکنت مایع می‌توان به کمک مبدل حرارتی مایع به مایع دسیکنت را قبل از پمپاژ به هیتر پیش‌گرم کرد.

به طور خلاصه، گرمای خروجی از هر فرآیندی را می‌توان برای کاهش هزینه فرآیند احیا رطوبت‌گیر بکار برد. منابع کم‌هزینه دیگری نیز وجود دارد. برای مثال با توجه به میزان عرضه و تقاضا در یک زمان مشخص هزینه انرژی مصرفی در طول سال متغیر است. در برخی کشورهای اروپایی انرژی الکتریکی در فصل تابستان، زمانی‌که انرژی مصرفی فرآیند احیا زیاد است، هزینه کمتری دارد. در بخش‌هایی از آمریکا و بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته در فصل تابستان منابع فراوانی از گاز طبیعی وجود دارد که می‌توان با هزینه کم از آن‌ها برای فرآیند احیا رطوبت‌گیر دسیکنت استفاده کرد.

بسیاری از کارخانه‌های صنعتی و همچنین ساختمان‌های تجاری و سازمانی دارای دیگ‌های بخاری هستند که برای تامین نیازهای گرمایشی در طول سال کار می‌کنند. با توجه به اینکه در تابستان نیازهای گرمایشی وجود ندارد، می‌توان از انرژی تولیدی دیگ‌های بخار برای فرآیند احیا رطوبت‌گیر دسیکنت استفاده کرد. می‌توان هوای پاک و گرم خروجی را برای بازیافت دسیکنت نیز بکار برد. برای مثال بسیاری از فضاهای بزرگ به وسیله فن‌های تهویه در زمستان خشک می‌شوند. می‌توان از این هوا به جای هوای سردتر محیط برای بازیافت دسیکنت استفاده کرد که در این صورت هزینه انرژی مصرفی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۱۰-۲-۲-۴ احیا مرحله‌ای

برای احیا کامل دسیکنت باید آن را تا دمای بسیار بالا گرم کرد. اما این دمای بالا فقط برای گرفتن آخرین قسمت آب که شدیدا در دسیکنت محدود شده است، نیاز است. بخش عمده آب را می‌توان در اثر گرما در دمای پایین‌تر جدا کرد که هزینه کمتری نسبت به گرما در دماهای بالاتر دارد. تولیدکنندگان سامانه‌های رطوبت‌گیری می‌توانند برای کاهش هزینه مصرفی این سامانه‌ها فرآیند احیا را به صورت دو مرحله‌ای انجام دهند که در آن ٪۷۰ تا ٪۸۰ آب با گرمای با

[1] De-superheating

دمای پایین[1] و مقدار باقیمانده با گرمای با دمای بالا[2] گرفته می‌شود.

۱۰-۲-۲-۵ ذخیره انرژی دسیکنت

در یک رطوبت‌گیر دسیکنت مایع می‌توان مقدار دسیکنت و مخزن نگهدارنده بیشتری نسبت به مقدار مورد نیاز تهیه کرد و زمانی‌که هزینه انرژی کم است، دسیکنت را بازیافت کرده و سپس در شرایط مورد نیاز از آن استفاده کرد. در این صورت ظرفیت رطوبت‌گیری در دسیکنت خشک ذخیره می‌شود؛ همانطور که می‌توان با استفاده از یک سامانه تبرید و تولید یخ ظرفیت سردسازی ایجاد کرد.

۱۰-۲-۲-۶ استفاده از سرمایش کم‌هزینه

اگر علاوه بر رطوبت باید دما را نیز کنترل کرد، سامانه رطوبت‌گیری به سرمایش نیاز دارد. در این صورت باید با استفاده از سرمایش تبخیری غیر مستقیم و با استفاده از انرژی حرارتی برای راه‌اندازی یک سامانه سرمایش جذبی و یا افزایش بازده سامانه از طریق افزایش دمای تبخیر مبرد، هزینه انرژی مصرفی را کاهش داد.

در سرمایش تبخیری غیر مستقیم هوا با افزودن آب به آن از طریق عبور دادن هوا از یک اسپری یا یک سطح مرطوب، خنک می‌شود. این هوای سرد نیز جریان هوا یا آب دیگری را به کمک مبدل حرارتی خنک می‌کند. در ساختمان‌های بزرگ می‌توان با استفاده از برج‌خنک‌کن، که نوعی سرمایش تبخیری غیر مستقیم است، سرمایش مورد نیاز سامانه‌های تبرید و یا فرآیندهای صنعتی را ایجاد کرد. از برج خنک‌کن نیز می‌توان برای سرد کردن هوا و یا مایع دسیکنت رطوبت‌گیر استفاده کرد.

سامانه سرمایش جذبی از انرژی حرارتی کم‌هزینه برای سردکردن هوا یا آب استفاده می‌کند. این سامانه نیز همانند سامانه تبرید تراکمی از یک حلقه بسته تشکیل می‌شود. به جای گازهای هالوکربن[3]، آب مبرد این سامانه است. در داخل سامانه آب با گرفتن حرارت از هوا تبخیر می‌شود و دمای هوا کاهش می‌یابد. از این سرمایش می‌توان برای گرفتن حرارت سامانه رطوبت‌گیری دسیکنت استفاده کرد، همانطور که سامانه تبرید تراکمی گرمای هوا و سیالات دیگر را می‌گیرد.

سامانه‌های رطوبت‌گیری از سرمایش سامانه تبرید تراکمی نیز استفاده می‌کنند. سامانه تبرید اغلب هوا را تا دمای نقطه شبنم پایین برای رطوبت‌گیری سرد می‌کند. وقتی رطوبت هوا به وسیله رطوبت‌گیر گرفته شود، سامانه تبرید می‌تواند در دمای اواپراتور بالاتری کار کند که در این صورت بازده سامانه تبرید بهبود یافته و هزینه آن کاهش می‌یابد.

۱۰-۲-۲-۷ ملاحظات عملیاتی

اگر طراح مسئولیت راه‌اندازی سامانه را نیز بر عهده داشته باشد، برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سامانه می‌تواند کارهای زیادی انجام دهد. حتی اگر این مسئولیت بر عهده طراح

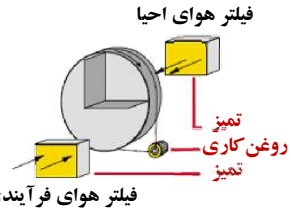
---

[1] Low-grade heat
[2] High-grade heat
[3] Halocarbon gases

نباشد، وظیفه دارد که عملکرد و نتایج اقتصادی سامانه در شرایط مختلف را بررسی کند.

اگر درب یک فریزر باز باشد، نمی‌توان انتظار داشت که بستنی داخل آن یخ زده باقی بماند. به همین صورت اگر درب‌های فضای کنترلی به طور مرتب باز شوند، سطح رطوبت فضا افزایش می‌یابد و در نتیجه سامانه رطوبت‌گیری برای گرفتن بار رطوبی به انرژی بیشتری نیاز دارد. نصب دستگاه ساده‌ای همچون دستگاه هشدار به پرسنل برای بستن درب‌ها، هزینه بهره‌برداری سامانه رطوبت‌گیری را بسیار کاهش می‌دهد.

افزودن هود گازی به فضای تحت کنترل رطوبت به معنای این است که هوای بیشتری برای جایگزین کردن هوای خروجی از هود باید به فضا آورده شود. در این صورت بار رطوبی فضا افزایش یافته و هزینه بهره‌برداری سامانه رطوبت‌گیری بیشتر می‌شود. برای کمینه کردن هزینه بهره‌برداری سامانه باید از خروج هوا از فضا جلوگیری شود.



شکل ۱۰-۹

مدیریت عملیات

پرسنل به دو روش می‌توانند هزینه سامانه را کاهش دهند: با بستن درب‌های فضا که موجب کاهش بار رطوبی می‌شود و همچنین تعویض دوره‌ای فیلترهای هوا و روغن‌کاری سامانه. اگر به طور منظم از رطوبت‌گیرهای دسیکنت نگهداری شود، این سامانه‌ها بسیار ماندگار و بدون مشکل هستند.

رطوبت‌گیرهای دسیکنت دستگاه‌های بسیار ساده و مطمئنی هستند، اما اغلب از نگهداری و محافظت آن‌ها غفلت می‌شود. همانطور که اگر موتور خودرو در ۲۴ ساعت روز و ۷ روز هفته بدون تعویض روغن کار کند، از کار می‌افتد، اگر اجزای اصلی سامانه رطوبت‌گیری به دلیل سهل‌انگاری از کار بیفتد، هزینه بسیار زیادی در پی خواهد داشت. صرفنظر از نوع رطوبت‌گیر، دو وظیفه باید به طور مرتب انجام شود: تعویض فیلترهای کثیف و روغن‌کاری موتور، فن و پمپ دستگاه.

عدم نگهداری از رطوبت‌گیر موجب مسدود شدن دسیکنت، سوختن هیترها و خرابی موتور می‌شود که هزارها یا ده‌ها هزار دلار هزینه دارد. اما می‌توان با کمتر از صد دلار در سال و نگهداری و حفاظت از سامانه، از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری کرد.

۱۰-۳ خلاصه

پروژه‌های رطوبت‌گیری بدون هزینه نیستند. مثل کارهای دیگر، قبل از رسیدن به سود به سرمایه‌گذاری زمانی و پولی نیاز است. اگر طراح بتواند میزان سود را شناسایی و ارزیابی کند، می‌تواند به راحتی هزینه بهره‌برداری سامانه را کمینه کند. مفاهیم و پیشنهاداتی که در این فصل ارائه شد، در چک لیست ادامه خلاصه شده است.

کاربرگ منفعت رطوبت‌گیری

کاهش هزینه بهره‌برداری

هزینه توقف عملیات	صرفه‌جویی توقف عملیات ساعت در سال هزینه هر ساعت ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش کارکرد مجدد	صرفه‌جویی کارکرد مجدد قطعه در سال هزینه هر قطعه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش هزینه انرژی	صرفه‌جویی انرژی ساعت در سال صرفه‌جویی ساعتی متوسط ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش نیاز به کارگر ماهر	صرفه‌جویی هزینه کارگر ساعت در سال هزینه ساعتی متوسط ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
	صرفه‌جویی استخدام کارگر کارگر در سال هزینه استخدام ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری	صرفه‌جویی هزینه کارگر ساعت در سال هزینه ساعتی متوسط ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
	صرفه‌جویی هزینه قطعات قطعه در سال هزینه جایگزینی قطعه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش هزینه بیمه کارگران	صرفه‌جویی بیمه کارگر بیمه هر سال هزینه بیمه متوسط ..... = ۲۰ سال × ..... × .....

کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری

کاهش نیاز به توسعه کارخانه	صرفه‌جویی در کارخانه و تجهیزات تعداد کارخانه هزینه کارخانه و تجهیزات جدید ..... = ... × .....
کاهش هزینه تعویض تجهیزات	صرفه‌جویی در تعویض دستگاه در سال هزینه دستگاه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش هزینه اولیه سامانه‌های HVAC	صرفه‌جویی سامانه HVAC هزینه‌های پروژه هزینه راه‌اندازی هزینه تجهیزات ..... = ... − ..... + ...

بهبود ارزش محصولات

بهبود ارزش بازاری	بهبود ارزش قطعه در سال افزایش ارزش هر قطعه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش ضایعات	ارزش کاهش ضایعات قطعه در سال منفعت هر قطعه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
بهبود خواص مواد	بهبود ارزش قطعه در سال افزایش ارزش هر قطعه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....

بهبود واکنش‌های عملیاتی

جلوگیری از خرید تجهیزات گران‌قیمت برای ظرفیت اوج	کاهش هزینه عملیات قطعه در سال هزینه خرید قطعه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
پیشگیری از تعمیرات پیش‌بینی نشده	کاهش هزینه عملیات حادثه در سال هزینه هر حادثه ..... = ۲۰ سال × ..... × .....
کاهش تجهیزات مورد نیاز	کاهش هزینه تجهیزات تعداد مورد هزینه هر مورد تجهیزات اضافی ..... = ... × .....
افزایش ارزش با ذخیره‌سازی	افزایش ارزش در اوج تقاضا قطعه در سال تغییر ارزش محصول ..... = ۲۰ سال × ..... × .....

منفعت اقتصادی کلی پروژه رطوبت‌گیری = ...

راهنمای کمینه‌سازی هزینه‌های پروژه

کمینه‌سازی هزینه‌های اولیه

- بارهای رطوبی کمینه شود.
  - اتصالات و درزها با نوار گرفته شود تا از نشت هوا جلوگیری گردد.
  - از فعالیت مازاد درب‌ها جلوگیری شود.
  - از نوار و رنگ عایق بخار بر روی پوشش ساختمان استفاده شود.
  - مقداری هوای تهویه برای کاهش نفوذ وارد فضا شود.
  - درب‌ها دارای راهرو طراحی شود.
  - از پوشش پلاستیکی، هوای پر فشار و ورودی کانال‌کشی‌شده برای کاهش نفوذ استفاده شود.
  - سطح باز هودهای خروجی کمینه شود.
- سطوح کنترلی بهینه شوند.
  - بالاترین سطح رطوبی که منفعت اقتصادی مطلوب را حاصل می‌کند، تعیین شود.
  - بالاترین سطح دمایی که منفعت اقتصادی مطلوب را حاصل می‌کند، تعیین شود.
- تلرانس‌ها به طور مشخص تعیین شود.
  - کمینه و بیشینه رطوبت بطور مطلق تعیین شود.
  - زمانی که رطوبت نسبی باید تعیین شود، اطمینان حاصل شود که محدوده دمایی نیز تعیین شده باشد.
- رطوبت‌گیرهای دسیکنت و سرمایشی ترکیب شود.
  - در دمای بالا و دمای نقطه شبنم بالا از سرمایش برای رطوبت‌گیری استفاده شود.
  - در دمای پایین و دمای نقطه شبنم پایین از دسیکنت‌ها برای رطوبت‌گیری استفاده شود.

کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری

- انرژی در پاسخ به تغییرات بار تنظیم شود.
  - گرمای احیا دسیکنت
  - ظرفیت سرمایش
- از سامانه‌های چندگانه برای بارهای متناوب استفاده شود.
  - رطوبت‌گیرها.
  - خنک‌کننده‌ها.
- از انرژی احیا با هزینه کم استفاده شود
  - بازیافت انرژی از احیا.
  - بازیافت حرارت از سامانه‌های تبرید.
  - گاز طبیعی.
  - استفاده از ظرفیت مازاد بویلر یا چگالش بخار با هزینه کم.
  - از هوای گرم و تمیز خروجی از فضاهای مکانیکی استفاده شود.
- از منابع سرمایشی با کمترین هزینه استفاده شود.
  - خنک‌کننده‌های تبخیری غیر مستقیم.
  - آب برج خنک‌کن.
  - تبرید با اواپراتور با دمای بالا.
- عملیات سامانه کمینه شود.
  - با کمینه‌سازی فعالیت درب‌ها، بارها کمینه شود.
  - با جایگزینی منظم فیلترها و روانکاری گرداننده، هزینه تعمیرات کمینه شود.

۱۱ پیوست

۱- اطلاعات آب و هوایی برای طراحی
۲- راهنمای انتخاب فیلتر
۳- اطلاعات بخار
۴- ضریب‌های تبدیل
۵- دمای نقطه شبنم در مقابل محتوای رطوبی در ارتفاع یا فشار بالا
۶- عملکرد رطوبت‌گیر شانه‌زنبوری چرخان
۷- برگه‌های محاسبات بار رطوبی
۸- نمودار سایکرومتری

جدول ۱ اطلاعات آب و هوایی برای طراحی

مکان	ارتفاع (ft)	فشار (psia)	٪۰/۴ (۳۵ ساعت بالاتر ...)			٪۱ (۸۸ ساعت بالاتر ...)			باد تابستانی			٪۹۹/۶ (۳۵ ساعت کمتر ...)	٪۰/۴ (۳۵ ساعت بالاتر ...)	
			gr/lb	°F	in. hg.	gr/lb	°F	in. hg.	mph	fpm	PWD	°F	°F (DB)	°F (MCWB)
ALABAMA														
Birmingham	۶۳۰	۱۴/۳۶	۱۳۵	۸۳	۰/۸۷۶۸	۱۳۱	۸۲	۰/۸۵۰۴	۹	۷۹۲	۳۲۰	۱۸	۹۴	۷۵
Huntsville	۶۴۳	۱۴/۳۶	۱۳۵	۸۳	۰/۸۷۶۴	۱۳۰	۸۲	۰/۸۴۵۶	۱۰	۸۴۵	۲۷۰	۱۵	۹۴	۷۵
Mobile	۲۲۰	۱۴/۵۸	۱۴۲	۸۳	۰/۹۳۴۵	۱۳۹	۸۳	۰/۹۱۲۲	۹	۷۶۶	۳۲۰	۲۶	۹۴	۷۷
ALASKA														
Anchorage	۱۳۱	۱۴/۶۳	۶۸	۶۲	۰/۴۵۵۶	۶۴	۶۱	۰/۴۳۲۴	۸	۷۳۰	۲۹۰	−۱۴	۷۱	۵۹
Juneau	۲۳	۱۴/۶۸	۷۰	۶۳	۰/۴۷۱۲	۶۷	۶۱	۰/۴۵۱۴	۹	۷۹۲	۲۳۰	۴	۷۴	۶۰
ARIZONA														
Phoenix	۱۱۰۶	۱۴/۱۲	۱۱۸	۸۲	۰/۷۵۳۲	۱۱۱	۸۴	۰/۷۱۳۹	۹	۸۲۷	۲۷۰	۳۴	۱۱۰	۷۰
Tucson	۲۵۵۶	۱۳/۳۹	۱۱۶	۷۶	۰/۷۰۲۱	۱۱۱	۷۶	۰/۶۷۳۱	۱۲	۱۰۲۱	۳۰۰	۳۱	۱۰۴	۶۵
ARKANSAS														
Little Rock	۳۱۲	۱۴/۵۳	۱۴۱	۸۶	۰/۹۲۶۹	۱۳۷	۸۵	۰/۹۰۰۳	۹	۷۸۳	۲۰۰	۱۶	۹۷	۷۷
CALIFORNIA														
Los Angeles	۱۰۵	۱۴/۶۴	۹۹	۷۵	۰/۶۶۲۷	۹۵	۷۳	۰/۶۳۵۳	۱۰	۸۷۱	۲۵۰	۴۳	۸۵	۶۴
Merced	۱۸۷	۱۴/۶۰	۹۰	۸۱	۰/۵۹۹۶	۸۲	۸۴	۰/۵۴۷۳	۹	۷۹۲	۳۲۰	۳۰	۹۹	۶۹
Sacramento	۲۳	۱۴/۶۸	۸۴	۸۲	۰/۵۶۳۷	۷۹	۸۰	۰/۵۳۱۴	۸	۷۳۹	۲۲۰	۳۱	۱۰۰	۶۹
San Diego	۱۰	۱۴/۶۸	۱۱۱	۷۷	۰/۷۳۷۵	۱۰۴	۷۶	۰/۶۹۶۵	۱۰	۹۱۵	۳۱۰	۴۴	۸۵	۶۷
San Francisco	۱۶	۱۴/۶۹	۷۶	۶۷	۰/۵۰۸۴	۷۳	۶۶	۰/۴۸۹۹	۱۳	۱۱۰۰	۳۰۰	۳۷	۸۳	۶۳
COLORADO														
Colorado Springs	۶۱۷۱	۱۱/۷۰	۹۲	۶۶	۰/۴۹۳۶	۸۸	۶۶	۰/۴۶۸۰	۱۲	۱۰۶۵	۱۶۰	−۲	۹۰	۵۸
Denver	۵۳۳۱	۱۲/۰۸	۹۶	۶۹	۰/۵۲۸۴	۹۰	۶۸	۰/۴۹۴۴	۹	۸۱۰	۱۶۰	−۳	۹۳	۶۰
CONNECTICUT														
Hartford	۲۰	۱۴/۶۸	۱۲۱	۸۱	۰/۸۰۵۳	۱۱۶	۸۰	۰/۷۷۴۸	۱۱	۹۵۹	۲۵۰	۲	۹۱	۷۳
DELAWARE														
Dover	۳۰	۱۴/۶۸	۱۴۱	۸۴	۰/۹۳۳۸	۱۳۵	۸۲	۰/۸۹۵۳	۹	۷۹۲	۲۴۰	۱۴	۹۳	۷۶
DISTRICT OF COLUMBIA														
Washington/Reagan	۶۶	۱۴/۶۶	۱۳۷	۸۳	۰/۹۰۷۰	۱۳۲	۸۳	۰/۸۷۴۸	۱۱	۹۶۸	۱۷۰	۱۵	۹۵	۷۶
FLORIDA														
Jacksonville	۳۰	۱۴/۶۸	۱۴۲	۸۵	۰/۹۴۰۹	۱۳۸	۸۴	۰/۹۱۳۹	۹	۷۶۶	۲۳۰	۲۹	۹۴	۷۷
Miami	۱۳	۱۴/۶۸	۱۴۴	۸۳	۰/۹۵۴۹	۱۴۱	۸۳	۰/۹۳۲۴	۱۱	۹۸۶	۱۵۰	۴۶	۹۱	۷۷
Tampa	۱۰	۱۴/۶۹	۱۴۴	۸۵	۰/۹۵۰۵	۱۴۰	۸۴	۰/۹۲۸۰	۱۰	۸۶۲	۲۷۰	۳۶	۹۲	۷۷
GEORGIA														
Atlanta	۱۰۳۳	۱۴/۱۵	۱۳۳	۸۲	۰/۸۵۱۱	۱۲۸	۸۱	۰/۸۲۰۷	۹	۸۰۱	۳۰۰	۱۸	۹۳	۷۵
Macon	۳۶۱	۱۴/۵۰	۱۳۶	۸۳	۰/۸۸۹۸	۱۳۲	۸۲	۰/۸۶۷۵	۹	۸۱۸	۲۷۰	۲۳	۹۶	۷۶
Savannah	۴۹	۱۴/۶۷	۱۳۹	۸۴	۰/۹۱۷۸	۱۳۵	۸۳	۰/۸۹۵۳	۹	۸۱۸	۲۷۰	۲۶	۹۵	۷۷
HAWAII														
Honolulu	۱۶	۱۴/۶۹	۱۲۵	۸۰	۰/۸۲۸۶	۱۲۰	۸۰	۰/۸۰۱۵	۱۵	۱۳۰۲	۶۰	۶۱	۸۹	۷۳
IDAHO														
Boise	۲۸۶۷	۱۳/۲۴	۷۹	۷۲	۰/۴۷۹۳	۷۲	۷۱	۰/۴۳۷۶	۱۱	۹۲۴	۳۲۰	۲	۹۶	۶۳
ILLINOIS														
Belleville/Scott AFB	۴۵۳	۱۴/۴۶	۱۴۱	۸۷	۰/۹۱۹۷	۱۳۶	۸۵	۰/۸۸۸۱	۷	۶۱۶	۱۹۰	۳	۹۵	۷۸
Chicago/Miegs	۶۲۳	۱۴/۳۷	۱۳۲	۸۴	۰/۸۵۷۵	۱۲۱	۸۰	۰/۷۸۸۰	۱۳	۱۱۴۴	۲۲۰	−۴	۹۲	۷
Springfield	۶۱۴	۱۴/۳۷	۱۳۹	۸۶	۰/۹۰۳۸	۱۳۲	۸۴	۰/۸۵۹۷	۱۲	۱۰۴۷	۲۳۰	−۴	۹۳	۷۶
INDIANA														
Fort Wayne	۸۲۷	۱۴/۲۶	۱۳۱	۸۳	۰/۸۴۴۴	۱۲۴	۸۱	۰/۸۰۰۵	۱۲	۱۰۲۱	۲۳۰	−۴	۹۰	۷۴

Terre Haute	۵۸۴	۱۴/۳۹	۱۴۴	۸۶	۰/۹۳۴۳	۱۳۶	۸۴	۰/۸۸۳۹	۱۱	۹۶۸	۲۳۰	−۳	۹۳	۷۶
IOWA														
Des Moines	۹۶۵	۱۴/۱۹	۱۳۳	۸۵	۰/۸۵۳۲	۱۲۶	۸۳	۰/۸۰۹۶	۱۲	۱۰۸۲	۱۸۰	−۹	۹۳	۷۶
Souix City	۱۱۰۲	۱۴/۱۲	۱۳۵	۸۶	۰/۸۶۲۰	۱۲۷	۸۴	۰/۸۱۴۳	۱۴	۱۲۵۸	۱۸۰	−۱۱	۹۴	۷۵
KANSAS														
Whichita	۱۳۳۹	۱۴/۰۰	۱۲۹	۸۳	۰/۸۱۶۰	۱۲۳	۸۲	۰/۷۸۱۵	۱۶	۱۴۲۶	۲۰۰	۲	۱۰۰	۷۳
KENTUCKY														
Fort Knox	۷۵۵	۱۴/۳۰	۱۳۸	۸۵	۰/۸۹۱۰	۱۳۲	۸۳	۰/۸۵۳۵	۶	۵۲۸	۲۷۰	۹	۹۴	۷۶
Louisville	۴۸۹	۱۴/۴۴	۱۳۴	۸۵	۰/۸۷۶۹	۱۲۹	۸۴	۰/۸۴۱۴	۱۰	۸۸۹	۲۵۰	۶	۹۳	۷۶
LOUISIANA														
New Orleans	۳۰	۱۴/۶۸	۱۵۱	۸۶	۰/۹۹۴۶	۱۴۶	۸۵	۰/۹۶۷۷	۸	۶۹۵	۳۶۰	۳۰	۹۳	۷۹
Shreveport	۲۵۹	۱۴/۵۶	۱۳۹	۸۴	۰/۹۱۵۳	۱۳۵	۸۳	۰/۸۸۸۶	۸	۷۳۹	۱۸۰	۲۲	۹۷	۷۷
MAINE														
Bangor	۱۹۴	۱۴/۵۹	۱۱۱	۷۸	۰/۷۳۵۸	۱۰۴	۷۵	۰/۶۹۰۵	۱۰	۸۸۰	۲۴۰	−۷	۸۷	۷۱
MASSACHUSSETTS														
Boston	۳۰	۱۴/۶۸	۱۱۹	۸۰	۰/۷۹۲۰	۱۱۳	۷۹	۰/۷۵۵۷	۱۴	۱۲۳۲	۲۷۰	۷	۹۱	۷۳
Worcester	۱۰۱۰	۱۴/۱۷	۱۱۹	۷۸	۰/۷۶۴۶	۱۱۲	۷۶	۰/۷۲۰۸	۱۰	۸۴۵	۲۷۰	۰	۸۵	۷۱
MICHIGAN														
Detroit	۶۶۳	۱۴/۳۵	۱۲۵	۸۳	۰/۸۰۹۶	۱۱۸	۸۰	۰/۷۶۵۴	۱۳	۱۱۰۹	۲۳۰	۰	۹۰	۷۳
MINNESOTA														
Minneapolis	۸۳۷	۱۴/۲۶	۱۲۴	۸۳	۰/۸۰۰۲	۱۱۶	۸۱	۰/۷۵۱۸	۱۴	۱۲۵۰	۱۸۰	−۱۶	۹۱	۷۳
MISSIPPI														
Jackson	۳۳۱	۱۴/۵۲	۱۴۲	۸۴	۰/۹۳۰۷	۱۳۸	۸۳	۰/۹۰۴۱	۸	۷۱۳	۲۷۰	۲۱	۹۵	۷۷
MISSOURI														
Kansas City	۱۰۲۴	۱۴/۱۶	۱۳۷	۸۶	۰/۸۷۳۱	۱۳۰	۸۴	۰/۸۳۴۰	۱۳	۱۱۱۸	۱۹۰	−۱	۹۶	۷۵
MONTANA														
Great Falls	۳۶۵۸	۱۲/۸۵	۸۱	۶۹	۰/۴۷۳۷	۷۴	۶۷	۰/۴۳۷۲	۱۲	۱۰۶۵	۲۳۰	−۱۹	۹۲	۶۱
NEBRASKA														
Lincoln	۹۸۱	۱۴/۰۸	۱۳۶	۸۴	۰/۸۶۴۹	۱۳۰	۸۳	۰/۸۲۷۹	۱۵	۱۳۲۰	۱۸۰	−۷	۹۷	۷۴
Omaha	۹۸۱	۱۴/۱۸	۱۳۶	۸۵	۰/۸۷۰۱	۱۲۸	۸۴	۰/۸۲۲۲	۱۲	۱۰۸۲	۱۸۰	−۷	۹۵	۷۵
NEVADA														
Las Vegas	۲۱۷۸	۱۳/۵۷	۱۰۲	۷۹	۰/۶۲۷۶	۹۲	۸۱	۰/۵۷۲۵	۱۲	۱۰۹۱	۲۳۰	۲۱	۱۰۸	۶۶
NEW HAMPSHIRE														
Concord	۳۴۴	۱۴/۵۱	۱۱۸	۷۹	۰/۷۷۴۲	۱۱۱	۷۷	۰/۷۳۳۸	۱۰	۸۹۸	۲۳۰	−۸	۹۰	۷۱
Portsmouth	۱۰۲	۱۴/۶۴	۱۲۳	۸۵	۰/۸۱۸۵	۱۱۳	۷۷	۰/۷۵۱۲	۸	۷۰۴	۲۷۰	۴	۸۹	۷۲
NEW JERSEY														
Trenton	۱۳۵	۱۴/۶۲	۱۳۲	۸۳	۰/۸۷۲۷	۱۲۷	۸۲	۰/۸۴۰۶	۸	۷۰۴	۲۴۰	۱۱	۹۳	۷۵
NEW MEXICO														
Albuquerque	۵۳۱۵	۱۲/۰۸	۹۸	۶۸	۰/۵۴۰۰	۹۳	۶۹	۰/۵۱۳۶	۱۰	۸۸۰	۲۴۰	۱۳	۹۶	۶۰
NEW YORK														
Binghamton	۱۶۳۱	۱۳/۸۵	۱۱۸	۷۷	۰/۷۳۹۰	۱۱۱	۷۵	۰/۷۰۰۵	۱۱	۹۴۲	۲۲۰	−۲	۸۵	۷۰
Buffalo	۷۰۵	۱۴/۳۲	۱۱۸	۷۸	۰/۷۶۸۶	۱۱۳	۷۷	۰/۷۳۳۲	۱۳	۱۱۳۵	۲۴۰	۲	۸۶	۷۰
New York/LGA	۳۰	۱۴/۶۸	۱۲۹	۸۱	۰/۸۵۶۷	۱۲۵	۸۰	۰/۸۳۰۸	۱۲	۱۰۵۶	۲۸۰	۱۳	۹۲	۷۴
Syracuse	۴۰۷	۱۴/۴۸	۱۲۰	۸۰	۰/۷۹۰۳	۱۱۳	۷۸	۰/۷۴۵۶	۱۱	۹۵۰	۲۵۰	−۳	۸۸	۷۲
NORTH CAROLINA														
Asheville	۲۱۶۹	۱۳/۵۸	۱۲۸	۷۹	۰/۷۸۷۵	۱۲۱	۷۸	۰/۷۵۴۱	۹	۷۷۴	۳۴۰	۱۱	۸۸	۷۲
Charlotte	۷۶۸	۱۴/۲۹	۱۳۰	۸۲	۰/۸۳۷۴	۱۲۵	۸۰	۰/۸۱۱۰	۹	۷۴۸	۲۴۰	۱۸	۹۴	۷۴
Greensboro	۸۸۶	۱۴/۲۳	۱۳۲	۸۲	۰/۸۵۱۳	۱۲۷	۸۱	۰/۸۲۰۷	۸	۷۳۹	۲۳۰	۱۵	۹۲	۷۵
Fayetteville	۲۴۳	۱۴/۵۷	۱۳۹	۸۴	۰/۹۱۹۰	۱۳۵	۸۳	۰/۸۸۸۵	۶	۵۲۸	۲۴۰	۲۲	۹۶	۷۷
NORTH DAKOTA														
Bismark	۱۶۶۰	۱۳/۸۳	۱۰۹	۷۹	۰/۶۸۲۵	۱۰۰	۷۷	۰/۶۳۰۹	۱۳	۱۱۶۲	۱۸۰	−۲۱	۹۳	۶۸

Fargo	۸۸۹	۱۴/۲۲	۱۲۲	۸۲	۰/۷۸۵۲	۱۱۲	۸۰	۰/۷۲۳۷	۱۴	۱۲۶۷	۱۶۰	-۲۲	۹۱	۷۱
OHIO														
Akron	۱۲۳۷	۱۴/۰۵	۱۲۵	۸۰	۰/۷۹۳۰	۱۱۸	۷۸	۰/۷۴۹۷	۱۰	۹۱۵	۲۳۰	۰	۸۸	۷۲
Dayton	۱۰۰۴	۱۴/۱۷	۱۲۹	۸۲	۰/۸۲۵۹	۱۲۳	۸۰	۰/۷۸۶۶	۱۱	۹۴۲	۲۴۰	-۱	۹۰	۷۴
Toledo	۶۹۲	۱۴/۳۳	۱۲۹	۸۲	۰/۸۳۵۲	۱۲۲	۸۰	۰/۷۹۱۱	۱۱	۹۷۷	۲۳۰	-۲	۹۰	۷۳
OKLAHOMA														
Oklahoma City	۱۳۰۲	۱۴/۰۲	۱۲۹	۸۳	۰/۸۱۷۰	۱۲۵	۸۲	۰/۷۹۱۲	۱۳	۱۱۷۰	۱۸۰	۹	۹۹	۷۴
Tulsa	۶۷۶	۱۴/۳۴	۱۳۸	۸۷	۰/۸۸۸۶	۱۳۲	۸۵	۰/۸۵۳۴	۱۲	۱۰۵۶	۱۸۰	۹	۱۰۰	۷۶
OREGON														
Portland	۳۹	۱۴/۶۷	۸۳	۷۵	۰/۵۵۴۱	۷۸	۷۲	۰/۵۲۶۵	۱۱	۹۸۶	۳۴۰	۲۲	۹۰	۶۷
Salem	۲۰۰	۱۴/۵۹	۸۱	۷۵	۰/۵۳۷۲	۷۶	۷۳	۰/۵۰۵۱	۱۰	۸۷۱	۳۶۰	۲۰	۹۲	۶۷
North Bend	۱۳	۱۴/۶۹	۷۶	۶۵	۰/۵۱۳۱	۷۳	۶۴	۰/۴۹۰۰	۱۴	۱۲۱۴	۳۴۰	۳۰	۷۱	۶۰
Pendleton	۱۴۹۶	۱۳/۹۲	۷۴	۷۱	۰/۴۶۸۹	۶۸	۶۹	۰/۴۳۳۷	۹	۸۱۰	۳۱۰	۳	۹۷	۶۴
PENNSYLVANIA														
Harrisburg	۳۰۸	۱۴/۵۳	۱۳۰	۸۲	۰/۸۵۵۸	۱۲۳	۸۰	۰/۸۱۱۱	۱۰	۸۳۶	۲۵۰	۹	۹۲	۷۴
Philadelphia	۳۰	۱۴/۶۸	۱۳۳	۸۳	۰/۸۷۳۴	۱۲۶	۸۱	۰/۸۳۷۳	۱۱	۹۴۲	۲۳۰	۱۱	۹۲	۷۵
Pittsburgh	۱۲۲۴	۱۴/۰۶	۱۲۱	۸۰	۰/۷۷۱۷	۱۱۵	۷۸	۰/۷۳۲۶	۱۱	۹۶۸	۲۳۰	۲	۸۹	۷۲
SOUTH CAROLINA														
Charleston	۴۹	۱۴/۶۷	۱۴۵	۸۴	۰/۹۵۸۱	۱۳۹	۸۳	۰/۹۱۷۸	۱۰	۸۸۹	۲۳۰	۲۵	۹۴	۷۸
Columbia	۲۲۶	۱۴/۵۸	۱۳۴	۸۲	۰/۸۸۵۲	۱۳۰	۸۱	۰/۸۵۸۳	۹	۸۰۱	۲۴۰	۲۱	۹۶	۷۶
SOUTH DAKOTA														
Rapid City	۳۱۶۹	۱۳/۰۹	۱۰۴	۷۶	۰/۶۲۱۵	۹۸	۷۵	۰/۵۸۴۸	۱۳	۱۱۵۳	۱۶۰	-۱۱	۹۵	۶۵
Sioux City	۱۴۲۷	۱۳/۹۵	۱۲۷	۸۴	۰/۸۰۰۵	۱۱۹	۸۲	۰/۷۵۳۱	۱۵	۱۳۲۹	۱۸۰	-۱۶	۹۴	۷۳
TENNESSEE														
Knoxville	۹۸۱	۱۴/۱۸	۱۳۱	۸۲	۰/۸۳۹۷	۱۲۷	۸۱	۰/۸۱۳۵	۸	۶۷۸	۲۵۰	۱۳	۹۲	۷۴
Memphis	۲۸۵	۱۴/۵۴	۱۴۳	۸۷	۰/۹۳۶۷	۱۳۷	۸۶	۰/۹۰۱۱	۹	۸۱۱	۲۴۰	۱۶	۹۶	۷۸
Nashville	۵۹۱	۱۴/۳۸	۱۳۴	۸۳	۰/۸۷۳۷	۱۳۰	۸۲	۰/۸۴۲۷	۹	۸۲۷	۲۳۰	۱۰	۹۴	۷۶
TEXAS														
Amarillo	۳۶۰۶	۱۲/۸۸	۱۱۲	۷۶	۰/۶۵۵۶	۱۰۷	۷۵	۰/۶۲۷۶	۱۵	۱۳۲۰	۲۰۰	۶	۹۶	۶۷
Dallas/Fort Worth	۵۹۷	۱۴/۳۸	۱۳۲	۸۲	۰/۸۵۸۳	۱۳۰	۸۲	۰/۸۴۵۷	۱۰	۸۸۰	۱۷۰	۱۷	۱۰۰	۷۴
Houston	۴۶	۱۴/۶۷	۱۴۷	۸۴	۰/۹۷۱۷	۱۴۴	۸۳	۰/۹۵۲۵	۷	۶۱۶	۱۹۰	۲۹	۹۴	۷۷
Lubbock	۳۲۴۱	۱۳/۰۵	۱۲۰	۷۷	۰/۷۰۸۹	۱۱۵	۷۶	۰/۶۸۰۶	۱۴	۱۲۲۳	۱۶۰	۱۱	۹۷	۶۷
San Antonio	۷۹۴	۱۴/۲۸	۱۳۹	۸۱	۰/۸۹۷۹	۱۳۵	۸۱	۰/۸۷۱۷	۱۰	۸۷۱	۱۶۰	۲۶	۹۸	۷۳
UTAH														
Cedar City	۵۶۲۳	۱۱/۹۴	۹۳	۶۸	۰/۵۰۷۷	۸۵	۶۸	۰/۴۶۶۵	۱۲	۱۰۳۸	۲۰۰	۲	۹۳	۵۹
Salt Lake City	۴۲۲۶	۱۲/۵۹	۹۲	۷۳	۰/۵۲۷۰	۸۴	۷۳	۰/۴۸۳۶	۱۱	۹۹۴	۳۴۰	۶	۹۶	۶۲
VERMONT														
Burlington	۳۴۱	۱۴/۵۲	۱۱۵	۷۹	۰/۷۵۶۳	۱۰۹	۷۷	۰/۷۱۵۸	۱۱	۹۵۹	۱۸۰	-۱۱	۸۷	۷۱
VIRGINIA														
Richmond	۱۷۷	۱۴/۶۰	۱۳۷	۸۴	۰/۹۰۰۱	۱۳۱	۸۲	۰/۸۶۴۳	۱۰	۸۷۱	۲۳۰	۱۴	۹۴	۷۶
Roanoke	۱۱۷۵	۱۴/۰۸	۱۲۳	۸۰	۰/۷۸۶۱	۱۱۸	۷۹	۰/۷۵۵۷	۱۰	۸۷۱	۲۹۰	۱۲	۹۲	۷۳
WASHINGTON														
Seattle	۴۴۹	۱۴/۴۶	۷۸	۷۱	۰/۵۱۴۲	۷۴	۶۹	۰/۴۹۱۵	۱۰	۸۸۹	۳۵۰	۲۳	۸۵	۶۵
Spokane	۲۴۶۱	۱۳/۴۳	۷۷	۶۸	۰/۴۷۳۸	۷۱	۶۸	۰/۴۳۵۷	۹	۷۹۲	۲۴۰	۱	۹۲	۶۲
WISCONSIN														
Madison	۸۶۶	۱۴/۲۴	۱۲۶	۸۳	۰/۸۱۲۵	۱۱۸	۸۰	۰/۷۵۹۸	۱۲	۱۰۵۶	۲۳۰	-۱۱	۹۰	۷۳
Milwaukee	۶۹۲	۱۴/۳۳	۱۲۷	۸۳	۰/۸۲۶۴	۱۱۹	۸۰	۰/۷۷۳۴	۱۵	۱۲۸۵	۲۲۰	-۷	۸۹	۷۴
WYOMING														
Casper	۵۲۸۹	۱۲/۱۰	۸۵	۶۶	۰/۴۷۲۴	۷۸	۶۶	۰/۴۳۴۴	۱۳	۱۱۴۴	۲۴۰	-۱۳	۹۲	۵۹
Cheyenne	۶۱۴۲	۱۱/۷۱	۹۰	۶۶	۰/۴۸۳۲	۸۵	۶۵	۰/۴۵۳۸	۱۳	۱۱۱۸	۲۹۰	-۷	۸۷	۵۸
PUERTO RICO														
Ceiba/RR	۳۹	۱۴/۶۸	۱۵۰	۸۵	۰/۹۹۱۱	۱۴۳	۸۴	۰/۹۴۶۳	۱۱	۹۶۸	۸۰	۶۸	۹۰	۷۸

جدول ۲ راهنمای انتخاب فیلتر

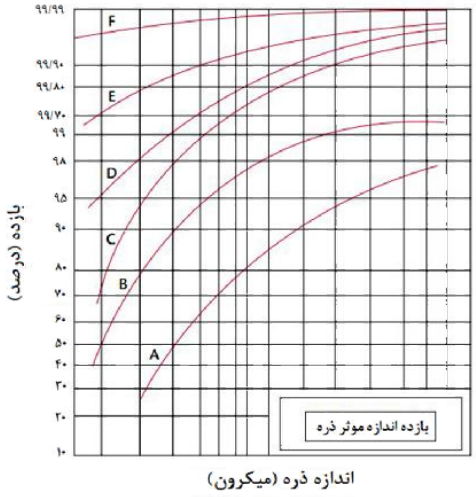
	توصیف فیلتر	بیشینه سرعت ورودی fpm	بیشینه افت فشار (آب)		بازده [۱] (٪)	بازدارندگی [۲]	توضیحات کاربردها و محدودیت‌ها
			تمیز	کثیف			
A	شبکه فلزی، عمق ۲ اینچ، روغنکاری شده (قابل تمیز شدن)	۵۲۰	۰/۳۵	۰/۵	۲۰-۱۵	۵۰٪	به مقدار قابل قبولی موثر بر الیافی مثل پرز. به طور کلی بی اثر بر ذرات گرده، دود و گرد و غبار.
B	فیبر شیشه با شبکه سیمی، عمق ۲ اینچ (یکبار مصرف)	۵۰۰	۰/۳۰	۰/۹۰	۳۵-۳۰	۹۰٪	برای سامانه‌های گرمایش و سرمایش مرکزی داخلی. پیش‌فیلتر برای فیلترهای با بازده بالا. اثر محدود بر روی دود و ذرات خاک.
C	فیبر شیشه با چگالی بالا با شبکه سیمی و نگهدارنده ، عمق ۱۲ اینچ (یکبار مصرف)	۵۰۰	۰/۳۵	۱/۵	۵۵-۵۰	۹۵٪	برای سامانه‌های تجاری چرخش هوای تازه و برگشتی. موثر بر ذرات گرده و ذرات ریز گرد و غبار. اثر محدود بر دود و بخار. بی اثر بر دود سیگار.
D		۵۰۰	۰/۵	۱/۵	۸۵-۸۰	۹۹٪	برای سامانه‌های تجاری چرخش هوای تازه و برگشتی. موثر بر همه ذرات گرده و گرد و غبار، اغلب ذرات خاک، بخار زغال‌سنگ و دود حاصل از سوختن نفت.
E		۵۰۰	۰/۶۵	۱۵	۹۵-۹۰	۱۰۰٪	بخش‌های دارویی و بیمارستان‌های تمیز. موثر بر ذرات خاک، دود حاصل از سوختن زغال‌سنگ و نفت و باکتری‌ها، موثر برای دود سیگار.
F	ورق پیوسته کاغذی از الیاف شیشه در ابعاد میکرون با جداکننده موجدار. قاب چوبی دارای واشر ، عمق ۱۲ اینچ (یکبار مصرف)	۲۷۵	۱/۰	۴/۰-۳	[۳] ۹۹/۹۷	۱۰۰٪	حفاظت عالی در برابر همه دودها و بخارها، باکتری‌ها و همه انواع گرد و غبار. اتاق عمل، بخش مراقبت ویژه، اتاق‌های تمیز داروسازی و بسته‌بندی مواد دارویی.

توجهات:

۱- بازده بر اساس آزمایش تعیین بازده ASHRAE غبارگیری با استفاده از غبار اتمسفر.

۲- بازدارندگی بر اساس روش آزمایش بازدارندگی ASHRAE با استفاده از غبار مواد مصنوعی.

۳- بر اساس آزمایش DOP (دود با قطر ۳ میکرون).



جدول ۳ اطلاعات کاربردی بخار

فشار psig	دما ^{O}F	گرمای نهان Btu/lb
۲	۲۱۹	۹۶۵
۵	۲۲۷	۹۶۰
۱۰	۲۳۹	۹۵۲
۱۵	۲۵۰	۹۴۵
۲۰	۲۵۹	۹۳۹
۲۵	۲۶۷	۹۳۳
۳۰	۲۷۴	۹۲۸
۴۰	۲۸۷	۹۱۹
۵۰	۲۹۸	۹۱۱
۶۰	۳۰۷	۹۰۴
۷۰	۳۱۶	۸۹۷
۸۰	۳۲۴	۸۹۱
۹۰	۳۳۱	۸۸۵
۱۰۰	۳۳۸	۸۸۰
۱۲۵	۳۵۳	۸۶۸
۱۵۰	۳۶۶	۸۵۷
۱۷۵	۳۷۷	۸۴۷
۲۰۰	۳۸۸	۸۳۸

توجهات:

مصرف بخار=(۱/۰۸×scfm×افزایش دمای هوا/گرمای نهان بخار

برای مثال:

جریان هوا: ۵۰۰scfm؛ افزایش دما: $۱۸۵^{O}F$؛ فشار بخار: ۳۰psig؛ گرمای نهان: ۹۲۸Btu/lb

مصرف بخار=(۱/۰۸×۵۰۰×$۱۸۵^{O}F$)/۹۲۸Btu/lb=۱۰۷/۷ lb/hr

جدول ۴ ضریب تبدیل‌های کاربردی

تبدیل واحد	به واحد	ضریب تبدیل
اتمسفر	کیلوپاسکال	۱۰۱/۱
بی‌تی‌یو	ژول	۱۰۵۵
بی‌تی‌یو	کیلووات بر ساعت	$۲/۹۲۸\times۱۰^{-۴}$
بی‌تی‌یو بر ساعت	اسب بخار	$۳/۹۲۹\times۱۰^{-۴}$
بی‌تی‌یو بر ساعت	وات	۰/۲۹۳
بی‌تی‌یو بر ساعت بر فوت مربع	وات بر متر مربع	۳/۱۵
بی‌تی‌یو بر پوند	کیلوژول بر کیلوگرم	۲/۳۳
سانتیگراد	فارنهایت	$(^{o}C\times۹/۵)+۳۲$
هزینه، دلار بر پوند	دلار بر کیلوگرم	۲/۲۰۵
هزینه، دلار بر تن تبرید	دلار بر کیلووات	۰/۲۸۴
فوت مکعب	متر مکعب	۰/۰۲۸۳۲
فوت مکعب	لیتر	۲۸/۳۲
فوت مکعب بر دقیقه، cfm	لیتر بر ثانیه	۰/۴۷۲۰
اینچ مکعب	میلیمتر	۱۶/۴
متر مکعب	فوت مکعب	۳۵/۳۱
متر مکعب	لیتر	۱۰۰۰
فارنهایت	سانتیگراد	$(^{o}F-۳۲)\times۵/۹$
فوت	متر	۰/۳۰۴۸
فوت بر دقیقه، fpm	متر بر ثانیه	$۵/۰۸\times۱۰^{-۳}$
فوت بر دقیقه، fpm	مایل بر ساعت	۰/۰۱۱۳۶
گالن	فوت مکعب	۰/۱۳۳۷
گالن	لیتر	۳/۷۸۵
گالن بر ساعت	میلیمتر بر ثانیه	۱/۰۵
گالن بر دقیقه	لیتر بر ثانیه	۰/۰۶۳۰۸
گرین (۱ به ۷۰۰۰ پوند)	گرم	۰/۰۶۴۸۰
گرین بر پوند	گرم بر کیلوگرم	۰/۱۴۳
گرم	گرین	۱۵/۴۳
گرم	پوند	$۲/۲۰۵\times۱۰^{-۳}$

اسب بخار	بی‌تی‌یو بر ساعت	۲۵۴۷
اسب بخار	کیلووات	۰/۷۴۵۷
اینچ	میلیمتر	۲۵/۴۰
اینچ جیوه	اینچ آب	۱۳/۵۹۶
اینچ جیوه	کیلوپاسکال (kPa)	۳/۳۸
اینچ آب (در $4^{O}C$)	اینچ جیوه	۰/۰۷۳۵۵
اینچ آب (در $4^{O}C$)	پوند بر اینچ مربع	۰/۰۳۶۱۳
اینچ آب (در $4^{O}C$)	پاسکال (Pa)	۲۹۴
ژول	بی‌تی‌یو	$۹/۴۸\times۱۰^{-۴}$
ژول	وات ساعت	$۲/۷۷۸\times۱۰^{-۴}$
کیلوگرم	پوند	۲/۲۰۵
کیلوگرم بر متر مربع	پوند بر فوت مکعب	۰/۰۶۲۴۳
کیلومتر	فوت	۳۲۸۱
کیلومتر	مایل	۰/۶۲۱۴
کیلومتر بر ساعت	مایل بر ساعت	۰/۶۲۱۴
کیلووات	بی‌تی‌یو بر ساعت	۳۴۱۴
لیتر	فوت مکعب	۰/۰۳۵۳۱
لیتر	گالن	۰/۲۶۴۲
لیتر بر ثانیه	گالن بر دقیقه	۱۵/۸۵۲
متر	فوت	۳/۲۸۱
متر بر ثانیه	فوت بر دقیقه	۱۹۶/۸
متر بر ثانیه	کیلومتر بر ساعت	۳/۶
متر بر ثانیه	مایل بر ساعت	۲/۲۳۷
مایل	متر	۱۶۰۹
مایل بر ساعت	فوت بر دقیقه	۸۸
مایل بر ساعت	کیلومتر بر ساعت	۱۶۰۹
میلیمتر	اینچ	۰/۰۳۹۳۷
نیوتن	پوند (نیرو)	۰/۲۲۵

نیوتن بر متر مربع	پاسکال (Pa)	۱/۰
پاسکال (Pa)	اینچ جیوه	$۲/۹۵۹\times۱۰^{-۴}$
پاسکال (Pa)	اینچ آب	$۴/۰۱۶\times۱۰^{-۳}$
پاسکال (Pa)	پوند بر اینچ مربع	$۱/۴۵۱\times۱۰^{-۴}$
پوند (نیرو)	نیوتن	۴/۴۴۸
پوند (جرم)	گرین	۷۰۰۰
پوند (جرم)	کیلوگرم	۰/۴۵۳۶
پوند آب	فوت مکعب	۰/۰۱۶۰۳
پوند آب	گالن	۰/۱۱۹۱
پوند بر فوت مکعب	کیلوگرم بر فوت مکعب	۱۶/۰۲
پوند بر اینچ مربع	اینچ جیوه	۲/۰۳۶
پوند بر اینچ مربع	کیلوپاسکال (kPa)	۶/۸۹
پوند بر اینچ مربع	اینچ آب	۲۷/۶۸
تن تبرید	بی‌تی‌یو بر ساعت	۱۲۰۰۰
تن تبرید	کیلووات	۳/۵۲
وات	بی‌تی‌یو بر ساعت	۳/۴۱۴
وات	اسب بخار	$۱/۳۴۱\times۱۰^{-۳}$
وات ساعت	بی‌تی‌یو	۳/۴۱۴
وات ساعت	ژول	$۳/۶۰\times۱۰^{۳}$

جدول ۵ دمای نقطه شبنم در مقابل محتوای رطوبی در ارتفاع یا فشار بالا

		محتوای رطوبی (گرین بر پوند) در فشارهای مطلق				
دمای نقطه شبنم (°F)	فشار بخار (جیوه)	سطح دریا ۲۹/۹۲in. Hg	۳۰۰۰ft ۲۶/۸۲in. Hg	۵۰۰۰ فوت ۲۴/۹۰in. Hg	۷۰۰۰ فوت ۲۳/۰۹in. Hg	۱۰۰psig ۲۳۳/۴in. Hg
−۶۰	۰/۰۰۱۰۱	۰/۱۴۸	۰/۱۶۴	۰/۱۷۷	۰/۱۹۰	۰/۰۱۸۸
−۵۵	۰/۰۰۱۴۳	۰/۲۰۹	۰/۲۳۲	۰/۲۵۰	۰/۲۷۰	۰/۰۲۶۷
−۵۰	۰/۰۰۱۹۹	۰/۲۹۱	۰/۳۲۳	۰/۳۴۸	۰/۳۷۵	۰/۰۳۷۱
−۴۵	۰/۰۰۲۷۶	۰/۴۰۴	۰/۴۴۸	۰/۴۸۳	۰/۵۲۰	۰/۰۵۱۵
−۴۰	۰/۰۰۳۷۹	۰/۵۵۵	۰/۶۱۵	۰/۶۶۲	۰/۷۱۵	۰/۰۷۰۷
−۳۵	۰/۰۰۵۱۸	۰/۷۵۸	۰/۸۴۱	۰/۹۰۶	۰/۹۷۷	۰/۰۹۶۶
−۳۰	۰/۰۰۷۰۰	۱/۰۲	۱/۱۴	۱/۲۲	۱/۳۲	۰/۱۳۱
−۲۵	۰/۰۰۹۴۴	۱/۳۸	۱/۵۳	۱/۶۵	۱/۷۸	۰/۱۷۶
−۲۰	۰/۰۱۲۶	۱/۸۴	۲/۰۵	۲/۲۰	۲/۳۸	۰/۲۳۵
−۱۵	۰/۰۱۶۷	۲/۴۴	۲/۷۱	۲/۹۲	۳/۱۵	۰/۳۱۲
−۱۰	۰/۰۲۲۰	۳/۲۲	۳/۵۷	۳/۸۵	۴/۱۵	۰/۴۱۰
−۵	۰/۰۲۸۹	۴/۲۳	۴/۷۰	۵/۰۶	۵/۴۶	۰/۵۳۹
۰	۰/۰۳۷۶	۵/۵۱	۶/۱۱	۶/۵۹	۷/۱۰	۰/۷۰۱
۵	۰/۰۴۸۸	۷/۱۴	۷/۹۴	۸/۵۵	۹/۲۲	۰/۹۱۰
۱۰	۰/۰۶۲۹	۹/۲۰	۱۰/۲	۱۱/۰	۱۱/۹۰	۱/۱۷
۱۵	۰/۰۸۰۶	۱۱/۸	۱۳/۱	۱۴/۱	۱۵/۳	۱/۵۰
۲۰	۰/۱۰۳	۱۵/۱	۱۶/۸	۱۸/۱	۱۹/۵	۱/۹۲
۲۵	۰/۱۳۰	۱۹/۱	۲۱/۲	۲۲/۹	۲۴/۷	۲/۴۳
۳۰	۰/۱۶۵	۲۴/۲	۲۶/۹	۲۹/۰	۳۱/۳	۳/۰۸
۳۵	۰/۲۰۳	۲۹/۹	۳۳/۲	۳۵/۸	۳۸/۶	۳/۷۹
۴۰	۰/۲۴۷	۳۶/۵	۴۰/۵	۴۳/۶	۴۷/۱	۴/۶۱
۴۵	۰/۳۰۰	۴۴/۳	۴۹/۳	۵۳/۱	۵۷/۳	۵/۶۰
۵۰	۰/۳۶۲	۵۳/۶	۵۹/۶	۶۴/۲	۶۹/۳	۶/۷۶
۵۵	۰/۴۳۶	۶۴/۶	۷۲/۰	۷۷/۶	۸۳/۸	۸/۱۵
۶۰	۰/۵۲۲	۷۷/۶	۸۶/۴	۹۳/۲	۱۰۱	۹/۷۶
۶۵						

۷۰	۰/۶۲۲	۹۲/۸	۱۰۳	۱۱۲	۱۲۱	۱۱/۶
۷۵	۰/۷۳۹	۱۱۱	۱۲۳	۱۳۳	۱۴۴	۱۳/۸
۸۰	۰/۸۷۵	۱۳۲	۱۴۷	۱۵۹	۱۷۱	۱۶/۴
۸۵	۱/۰۳	۱۵۶	۱۷۴	۱۸۸	۲۰۳	۱۹/۳
۹۰	۱/۲۱	۱۸۵	۲۰۶	۲۲۲	۲۴۱	۲۲/۷
۹۵	۱/۴۲	۲۱۸	۲۴۳	۲۶۳	۲۸۵	۲۶/۶
۱۰۰	۱/۶۶	۲۵۷	۲۸۷	۳۱۰	۳۳۷	۳۱/۲
	۱/۹۳	۳۰۲	۳۲۵	۳۶۶	۳۹۷	۳۶/۳

جدول ۶ عملکرد رطوبت‌گیر شانه‌زنبوری چرخان

مدل	ظرفیت خشک‌کنندگی متوسط lb/hr	ماکزیمم هوای خشک فرآیندی scfm	سطح مقطع فرآیندی اسمی ft^2	ماکزیمم هوای احیا مورد نیاز scfm	ماکزیمم ظرفیت هوای احیا scfm
HC-۱۱۲۵	۴۰-۳	۱۱۲۵	۱/۸۸	۱۰۰	۴۰۰
HC-۲۲۵۰	۶۰-۱۰	۲۲۵۰	۳/۷۵	۲۵۰	۶۰۰
HC-۴۵۰۰	۱۲۰-۲۰	۴۵۰۰	۷/۵۰	۵۰۰	۱۳۰۰
HC-۹۰۰۰	۳۰۰-۴۰	۹۰۰۰	۱۵/۰	۱۰۰۰	۲۸۰۰
HCE-۱۵۰۰۰	۷۵۰-۱۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵/۰	۲۰۰۰	۷۵۰۰
HCE-۲۰۰۰۰	۱۰۰۰-۱۳۰	۲۰۰۰۰	۳۳/۳	۲۷۰۰	۱۰۰۰۰
HCE-۳۰۰۰۰	۱۵۰۰-۲۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰/۰	۴۰۰۰	۱۵۰۰۰
HCE-۴۰۰۰۰	۲۰۰۰-۲۶۰	۴۰۰۰	۶۷/۷	۵۴۰۰	۲۰۰۰۰

علائم و اختصارات:

TRI = **دمای هوای احیای ورودی گرم شده،** ^{O}F

TRU = **دمای هوای احیای ورودی گرم نشده،** ^{O}F

TPI = **دمای هوای فرآیندی ورودی،** ^{O}F

TPO = **دمای هوای فرآیندی خروجی،** ^{O}F

MPI = **رطوبت هوای فرآیندی ورودی، Grains/lb**

MPO = **رطوبت هوای فرآیندی خروجی، Grains/lb**

K = **ضریب متغیر از شکل ۳**

روابط:

۱–**حجم هوای فرآیندی (scfm): سرعت ورودی (fpm) × سطح مقطع اسمی (ft^2)** = VP

۲–**نرخ دفع رطوبت (Grains/hr):** $W = ٤/٥ \times VP \times (MPI-MPO)$

۳–**افزایش دمای هوای فرآیندی:** $(TPO-TPI) = ٠/٦٢٥\ (MPI-MPO) + K\ (TRI-TRU)$

٤–**حجم هوای احیا (scfm):** $VR = (VP/(TRT-١٢٠)) \times (TPO-TPI)$

٥–**انرژی احیا (Btu/hr):** $QR = ١/٠٨ \times VR \times (TRI-TRU)$

٦– $TPO = TPI + (TPO-TPI)$

مثال:

داده: $VP=١٨٧٥scfm$ ،$MPI=٥٥grains/lb$ ،$TPI=٧٠^{O}F$ ،

$TRI=٢٦٠^{O}F$ ،$TPU=٩٥^{O}F$، **سطح مقطع=** $٣/٧٥ft^2$

بیابید: TPO، MPO، W، QR

۱– **سرعت ورود** $= ٥٠٠fpm = ٣/٧٥ \div ١٨٧٥$

۲– **از نمودارها،** $MPO = ١٣grains/lb$

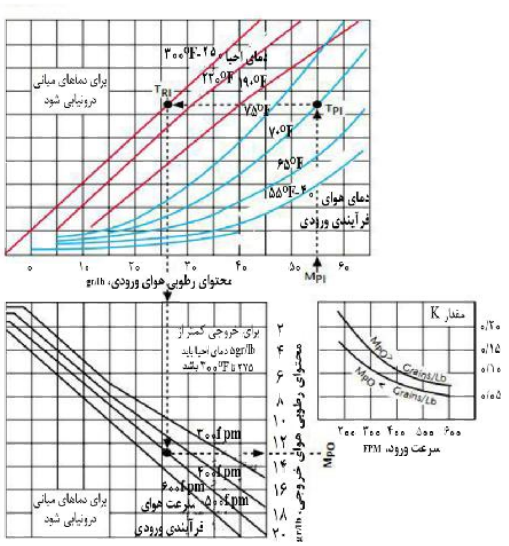
۳– $W = ٤/٥ \times ١٨٧٥ \times (٥٥-١٣) = ٣٥٤٣٧٥grains/hr$

٤– $TPO-TPI = ٠/٦٢٥\ (٥٥-١٣) + ٠/٠٨\ (٢٦٠-٧٠) = ٤١/٤٥^{O}F$

٥– $VR = ((١٨٧٥/(٢٦٠-١٢٠)) \times ٤١/٤٥ = ٥٥٥scfm$

٦– $QR = ١/٠٨ \times ٥٥٥ \times (٢٦٠-٩٥) = ٩٨٩٠١Btu/hr$

۷– $TPO = ٧٠ + ٤١/٤٥ = ١١١/٤^{O}F$



جدول ۷ برگه‌های محاسبات بار رطوبی

اطلاعات پروژه

اسم پروژه:

_____

مکان:

_____

کاربرد:

_____

محاسبه‌گر: تاریخ:

_____

ناظر: تاریخ:

_____

هدف پروژه:

شرایط طراحی

	حالت حاد آب و هوا		آب	شرایط داخلی	
	تابستان	زمستان	زیرزمینی	اتاق	ساختمان
دمای حباب خشک					
دمای نقطه شبنم					
نسبت رطوبت					
فشار بخار					

ارتفاع ..... بالاتر از سطح دریا؛ چگالی استاندارد هوا = ...lb/ft3

نفوذ

	بار نفوذ (gr/hr)		فشار بخار کمتر (in. hg)	فشار بخار بزرگ‌تر (in. hg)		ضریب نفوذ (gr/hr/sq. ft.)		سطح مقطع (sq. ft.)
دیوار ۱:	..... gr/lb	= (	.....	–	.....)	×	×	.....
دیوار ۲:	..... gr/lb	= (	.....	–	.....)	×	×	.....
دیوار ۳:	..... gr/lb	= (	.....	–	.....)	×	×	.....
دیوار ۴:	..... gr/lb	= (	.....	–	.....)	×	×	.....
سقف:	..... gr/lb	= (	.....	–	.....)	×	×	.....
کف:	..... gr/lb	= (	.....	–	.....)	×	×	.....

مقدار کل: ..... gr/lb

محصولات، بسته‌بندی و لباس‌ها

	بار رطوبی (gr/hr)		گرین بر پوند	محتوای رطوبی نهایی (gr/lb)		محتوای رطوبی اولیه (gr/lb)	نرخ ورود (gr/lb)
مورد ۱:	..... gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	.....	–	.....	×.....
مورد ۲:	..... gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	.....	–	.....	×.....
مورد ۳:	..... gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	.....	–	.....	×.....
مورد ۴:	..... gr/lb	=	۷۰۰۰ ×	.....	–	.....	×.....

مقدار کل: ..... gr/lb

اجاق‌های سرباز

	بار رطوبی (gr/hr)		تولید بخار آب (gr/ft³)		نرخ سوختن گاز (ft³/hr)
..... gr/lb	.....	=	.....	×	.....

مقدار معمول ۶۵۰gr/ft3

افراد

	بار رطوبی (gr/hr)		بار رطوبی (gr/hr) برای هر فرد		تعداد افراد
نشسته:	..... gr/lb	=	.....	×	.....
ایستاده:	..... gr/lb	=	.....	×	.....
کار سبک:	..... gr/lb	=	.....	×	.....
کار متوسط:	..... gr/lb	=	.....	×	.....
بازدیدکننده اتاق:	..... gr/lb	=	.....	×	.....

مقدار کل: ..... gr/lb

سطوح مرطوب

	بار رطوبی (gr/hr)		گرین بر پوند	فشار بخار هوا (in. hg)		فشار بخار سطح آب (in. hg)	نرخ انتقال گرمای نهان (Btu/ sq.ft. in.hg)	سطح مقطع مرطوب (sq. ft.)
..... gr/lb	.....	=	۷۰۰۰ ×	(.....	–	.....) ×	.....	× .....
						.....		

دیوارهای خارجی

	بار رطوبی (gr/hr)		چگالی هوا (lb/ft^3)	رطوبت داخلی (gr/hr)	رطوبت خارجی (gr/hr)	نرخ نفوذ هوا ($ft^3/hr/ft.$)	سطح مقطع (sq. ft.)
دیوار ۱:	..... gr/lb	=	× (.....	–	) ×	×	
دیوار ۲:	..... gr/lb	=	× (.....	–	) ×	×	
مقدار کل:	..... gr/lb						

شکاف‌ها

	بار رطوبی (gr/hr)		چگالی هوا (lb/ft^3)	رطوبت داخلی (gr/hr)	رطوبت خارجی (gr/hr)	نرخ نفوذ هوا ($ft^3/hr/ft.$)	طول شکاف یا مساحت اجزای آن (sq. ft. یا ft)
قاب درب:	..... gr/lb	=.....	× (.....	–	) ×	×	
پنجره‌ها:	..... gr/lb	=	× (.....	–	) ×	×	
کانال‌ها:	..... gr/lb	=	× (.....	–	) ×	×	
مقدار کل:	..... gr/lb						

ورودی درب‌ها

	بار رطوبی (gr/hr)		رطوبت هوای داخل (gr/hr)	رطوبت هوای خارج (gr/hr)	زمان باز بودن (min/hr)	چگالی هوا (lb/ft^3)	سطح مقطع باز (sq. ft.)	سرعت جریان هوا (fpm)
درب ۱:	..... gr/lb	= (.....	–	) ×	×	×	×	
درب ۲:	..... gr/lb	= (.....	–	) ×	×	×	×	

	بار رطوبی (gr/hr)	رطوبت هوای داخل (gr/hr)	رطوبت هوای خارج (gr/hr)	تعداد باز شدن (تعداد در ساعت)	چگالی هوا (lb/ft^3)	طول، عرض و ارتفاع هوابند (ft)
راهرو هوابند:	..... gr/lb	= $\left[\frac{(\text{.....} - \text{.....})}{2}\right]$ ×	×	×	× (.....	× ..... × .....)
مقدار کل:	..... gr/lb					

ورودی از دیوارها

	بار رطوبی (gr/hr)		دقیقه	چگالی هوا (lb/ft^3)	رطوبت داخلی (gr/hr)	رطوبت خارجی (gr/hr)	سرعت هوای ورودی (fpm)	سطح مقطع (sq. ft.)
ورودی نقاله‌ها:	..... gr/lb	= ..... × ۶۰ ×	.....	× (.....	–	) ×	×	
راهرو و حفره‌های باز:	..... gr/lb	= ..... × ۶۰ ×	.....	× (.....	–	) ×	×	
مقدار کل:	..... gr/lb							

هوای تازه مقدار هوای تازه برای افراد، هوای جبرانی و تنظیم فشار اتاق:

	بار رطوبی (gr/hr)		دقیقه	چگالی هوا (lb/ft^3)	سطح رطوبت کنترلی (gr/hr)	رطوبت خارجی (gr/hr)	نرخ جریان هوای تازه (cfm)
	..... gr/lb	= ..... ×	۶۰ ×	× (.....	–	) ×	

خلاصه

نفوذ: .....

محصولات: .....

افراداجاق گاز: .....

اجاق گاز: .....

سطوح مرطوب: .....

دیوارهای خارجی: .....

شکاف‌ها: .....

ورودی درب‌ها: .....

ورودی درب‌ها: .....

بار رطوبی داخلی کل: .....

هوای تازه: .....

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

Absolute Humidity Sensors	حسگرهای رطوبت مطلق
Absolute moisture	رطوبت مطلق
Absorbents	عامل جاذب
Accuracy	دقت
Active storage	انبار فعال
Adsorbents	جاذب سطحی
Adsorption-desorption cycle	چرخه جذب و دفع
Air boundary layer	لایه مرزی هوا
Air circulation	چرخش هوا
Air conditioning	تهویه مطبوع
Air density	چگالی هوا
Air distribution system	سامانه توزیع هوا
Air leakage	نشت هوا
Air lock vestibules	دالان هوابند
Air washer	هواشو
Airflow	جریان هوا
Airflow dampers	دمپرهای جریان هوا
Ambient pressure	فشار محیطی
Aspirated psychrometer	رطوبت‌سنج تنفسی
Blended air	هوای مخلوط‌شده
Bypass	مسیر کنارگذر
Calibration	کالیبره کردن
Capacitance sensor	حسگر ظرفیت خازنی
Capital investments	هزینه‌های سرمایه‌گذاری
Central system	سامانه مرکزی
Chilled liquid cooling	سرمایش مایع خنک‌کننده
Chilled water	آب خنک
Chiller	چیلر
Coating	پوشش‌دهی
Cogeneration system	سامانه تولید همزمان
Coil	کویل
Comfort condition	شرایط آسایش
Compressor	کمپرسور
Condensation	چگالش
Condensation-based hygrometer	رطوبت‌سنج چگالشی
Condenser	کندانسور
Continuous loads	بارهای پیوسته
Control level and tolerance	سطح کنترل و تلرانس
Controlled space	فضای کنترل شده
Controller	کنترل‌کننده
Conveyor	نوار نقاله
Cooling coil	کویل سرمایش
Cooling dehumidifiers	رطوبت‌گیرهای سرمایشی
Cooling-based dehumidification systems	سامانه‌های رطوبت‌گیری سرمایشی
Corrosion	خوردگی
Coulombic titration	تیتراسیون کولنی
Defrost	برفک‌زدایی
Dehumidification	رطوبت‌گیری
Dehumidification equipment	تجهیزات رطوبت‌گیری
Dehumidified air	هوای رطوبت‌گیری شده
Dehumidifier	رطوبت‌گیر
Desiccant capacity	ظرفیت دسیکنت
Desiccant wheel	چرخ دسیکنت
Dew point temperature	دمای نقطه شبنم
Direct expansion cooling	سرمایش انبساط مستقیم
Dry Bulb Temperature	دمای حباب خشک
Ductwork	کانال
Duty Cycle	چرخه کار
Electrolytic hygrometer	رطوبت‌سنج الکترولیتی
Energy modulation	تنظیم انرژی
Entering air	هوای ورودی

Enthalpy	آنتالپی
Epoxy paint	رنگ اپوکسی
Equilibrium diagram	نمودار تعادل
Equilibrium point	نقطه تعادل
Evaporation	تبخیر
Evaporator	اواپراتور
Fresh air	هوای تازه
Fresh air intake	مجرای مکش هوای تازه
Frost	برفک
Grains of water vapor	گرین بخار آب
Granular desiccant	دسیکنت‌های دانه‌ای
Heating and air conditioning systems	سامانه‌های گرمایش و تهویه مطبوع
Humidistat	هیومیدیستات
Humidity	رطوبت
Humidity control	کنترل رطوبت
Humidity control levels	سطوح کنترل رطوبت
Humidity pump	پمپ رطوبت
Humidity Ratio	نسبت رطوبت
Hygrometer	رطوبت‌سنج
Hygroscopic	رطوبت‌گیر
Ice storage	مخزن یخ
Inches of mercury	اینچ جیوه
Indicator	نمایشگر
Indoor air quality	کیفیت هوای داخل
Injection molding	قالب‌گیری تزریقی
Inlet conditions	شرایط ورودی
Installation	نصب و راه‌اندازی
Installed cost	هزینه نصب و راه‌اندازی
Internal condition	شرایط داخلی
Internal moisture load	بار رطوبی داخلی
Latent heat	گرمای نهان
Leaving air	هوای خروجی
Liquid spray-tower	برج اسپری مایع
Loading dock	فضای بارگیری
Make-up air	هوای جبرانی
Mechanical expansion hygrometer	رطوبت‌سنج انبساط مکانیکی
Mixture	مخلوط
Moist air	هوای مرطوب
Moist environments	محیط‌های مرطوب
Moist surface	سطح مرطوب
Moisture	رطوبت
Moisture content	محتوای رطوبت
Moisture load	بار رطوبی
Moisture removal capacity	ظرفیت رطوبت‌گیری
Moisture removal performance	عملکرد دفع رطوبت
Multiple vertical bed	بستر قائم چندگانه
Negative pressure	فشار منفی
Operating costs	هزینه‌های بهره‌برداری
Operating Environment	محیط کاری
Operational reliability	قابلیت اطمینان عملیاتی
Optimum condition	شرایط بهینه
Outlet moisture content	محتوای رطوبت خروجی
Outside condition	شرایط خارجی
Part-load conditions	شرایط نیمه-بار
Passive storage	انبار غیر فعال
Peak conditions	شرایط اوج
Periodic loads	بارهای متناوب
Permeance factor	ضریب نفوذ
Permeation	نفوذ
Plastic resins	رزین‌های پلاستیکی
Plastic strip	پوشش پلاستیکی
Positive pressure	فشار مثبت
Post-cooling	سرمایش ثانویه
Post-heating	گرمایش ثانویه

Pre-cooling	پیش-سرمایش
Pressure	فشار
Pressure difference	اختلاف فشار
Process air	هوای فرآیندی
Psychrometric chart	نمودار سایکرومتری
Psychrometrics	سایکرومتری
Radio frequency sensor	حسگر امواج رادیویی
Reactivation air	هوای احیا
Reactivation energy control	کنترل انرژی احیا
Reactivation heater	هیتر احیا
Reactivation temperature	دمای احیا
Recalibration	کالیبره کردن مجدد
Recorder	ثبت‌کننده
Refrigerant gas	گاز مبرد
Refrigerated display cases	یخچال‌های ویترینی
Refrigeration system capacity	ظرفیت سامانه تبرید
Refrigeration systems	سامانه‌های تبرید
Reheat	گرمایش مجدد
Relative humidity	رطوبت نسبی
Repeatability	تکرارپذیری
Residential air conditioner	سامانه‌های تهویه خانگی
Resistive sensor	حسگر مقاومتی
Response time	زمان پاسخ
Return airflow	جریان هوای برگشتی
Rotating Honeycombe	شانه زنبوری چرخان
Rotating horizontal bed	بستر افقی چرخان
Rotating wheel	چرخ چرخان
Salt equilibrium sensor	حسگر تعادل نمک
Saturation curve	منحنی اشباع
Sensible heat	گرمای محسوس
Sensible heat ratio (SHR)	نسبت گرمای محسوس
Sensible temperature	دمای محسوس
Sensor	حسگر
Sesiccant	دسیکنت
Sesiccant dehumidifier	رطوبت‌گیر دسیکنت
Sling psychrometer	رطوبت‌سنج زنجیره‌ای
Solid desiccants	دسیکنت‌های جامد
Solid packed tower	برج جامد فشرده
Specific humidity	رطوبت ویژه
Surrounding air	هوای اطراف
Surrounding environment	محیط اطراف
Temperature	دما
Thermal stratification	لایه‌بندی گرمایی
Thermometer	دماسنج
Vapor barrier	عایق بخار
Vapor pressure	فشار بخار
Vapor-retarder paint	رنگ عایق بخار
Vapor-retarder tape	نوار عایق بخار
Warehouse dehumidification	رطوبت‌گیری انبار
Water cooler	آبسردکن
Wet-bulb temperature	دمای حباب تر

Lewis G. Harriman III EDITOR

1989 EDITORIAL ADVISORY BOARD

Enno Abel

Professor of Mechanical Engineering Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden

Nick Baranov

Technical Executive, Mechanical Engineering Glaxo Ltd, Stevenage, United Kingdom

Bruce Bonner

President Bonner Systems Chelmsford, MA USA

Steven Brickley

Director of R&D, Munters Dehumidification Division Amesbury, MA USA

Luiz Felipe de Carvalho

Professor Emeritus of Thermal Technology University of Rio de Janeiro Rio de janeiro, Brasil

Douglas Kosar

Senior Project Manager, Desiccant Technology Gas Technology Institute Chicago, IL USA

Hansi Kruger

General Manager Munters Mexico

Ralph Lahmon

Architecture & Engineering Services Eastman Kodak Rochester, NY USA

Milton Meckler

President, The Meckler Group Ventura, CA USA

Mohamed Moledina

Senior Process Engineer, Atomic Energy Commission of Canada, Mississauga, ONT Canada

Terry Penny

Manager, Building Research Branch, US DOE National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado USA

Ing. Eugenio E. Sanchez

Engineering Manager Midas Consultores Caracas, Venezuela

Daniel Schroeder

Naval Aviation Protection Program US Navy Aviation Depot San Diego, CA USA

James Staunton

Machine Process Engineering Eastman Kodak Rochester, NY USA

Steven Toth

Chief Mechanical Engineer Miles Pharmaceuticals Elkhart, IN USA

Kenneth Welter

Chief Mechanical Engineer Stop & Shop Supermarkets Boston, MA USA

Sumner Weisman

Director of Application Engineering General Eastern Instruments Woburn, MA USA

Roland Wimmerstedt

Professor of Chemical Engineering Lund University Lund, Sweden

Jose Zulueta

Mechanical Engineering Project Manager Pfizer Pharmaceuticals New York, NY USA

The Dehumidification Handbook

Second Edition

Editor

Lewis G. Harriman III

Translated by

Reza Mirzaei

and

Dr. Rouhollah Fatehi

(Faculty Member at Persian Gulf University)

Persian Gulf University Press

Bushehr, 2018

Persian Gulf University

The Dehumidification Handbook

Second Edition

Editor
Lewis G. Harriman III

Translated by
Reza Mirzaei
Rouhollah Fatehi