وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

دستنامه فنی:

مدیریت رطوبت در گلخانه‌ها

سیدمعین‌الدین رضوانی، مزدشت گیتی،
جلال جوادی‌مقدم و داود مومنی

AERI

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، کدپستی: ۳۱۳۵۹۱۳۵۳۳، مؤسسه تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی
تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۶۱۵۰۰۰۰ (۰۲۶)
دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)، آدرس دسترسی: www.aeri.ir (بخش انتشارات الکترونیکی)

سال انتشار: ۱۴۰۴

بسم الله الرحمن الرحیم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

دستنامهٔ فنی:
مدیریت رطوبت در گلخانه‌ها

تهیه و تدوین:

سیدمعین‌الدین رضوانی، مزدشت گیتی،
جلال جوادی‌مقدم و داود مؤمنی

اعضای هیئت علمی به‌ترتیب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

سال انتشار:
۱٤۰٤

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نوع نوشتار: دستنامهٔ فنی
عنوان نوشتار: مدیریت رطوبت در گلخانه‌ها
نگارندگان: سیدمعین‌الدین رضوانی، مزدشت گیتی، جلال جوادی‌مقدم و داود مؤمنی
ویراستار ادبی: محمدرضا داهی
صفحه‌آرا: شبنم جباری
طراح جلد: سمیه وطن‌دوست
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۴۰۴

مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ٦٧٥٨٢ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ١٤٠٤/٠٤/١٧

مخاطبان دستنامهٔ فنی

کارشناسان و مروجان پهنه‌های تولیدی، گلخانه‌داران و مهندسان مشاور و ناظر طرح‌های گلخانه‌ای

هدف‌های آموزشی

شما خوانندگان گرامی در این دستنامه با:

- مفاهیم رطوبت در گلخانه‌ها
- محدوده بهینه رطوبت در محصولات گلخانه‌ای
- اثر رطوبت بر محصولات گلخانه‌ای
- راهکارهای مدیریت رطوبت در گلخانه‌ها

آشنا خواهید شد.

فهرست

عنوان **شماره صفحه**

مقدمه ۱
فصل اول ۱
مبانی و تعاریف ۱
تعریف رطوبت ۱
ترکیب هوای مرطوب ۱
فشار بخار آب ۲
رطوبت‌سنجی ۵
دمای هوای خشک ۵
دمای حباب مرطوب ۵
رطوبت مطلق ۶
هوای خشک ۶
مقدار رطوبت یا نسبت رطوبت ۷
رطوبت نسبی ۷
دمای نقطهٔ شبنم ۹
گرمای محسوس ۱۲
گرمای نهان ۱۲
کمبود فشار بخار ۱۲
اندازه‌گیری رطوبت در گلخانه ۱۴
فصل دوم ۲۱
محدودهٔ رطوبتی محصولات گلخانه‌ای ۲۱
حدود بهینهٔ رطوبت در محصولات گلخانه‌ای ۲۱
کمبود فشار بخار بهینه برای نشاها و قلمه‌ها ۲۷

کمبود فشار بخار بهینه برای مرحلهٔ رویشی ۲۸
کمبود فشـــار بخار بهینه در انتهای مرحلهٔ گلدهی و رســـیدگی محصول ۳۱
کمبود فشار بخار در شب ۳۳
فصل سوم ۳۶
تغییرات رطوبت محیط و گیاه ۳۶
اثر تغییرات رطوبت محیط بر گیاه ۳۶
تاثیر رطوبت بر مدیریت آفات و بیماری‌های گیاهان گلخانه‌ای ۳۷
فیزیولوژی گیاهی و کمبود فشار بخار ۳۹
رطوبت کم ۴۲
رطوبت زیاد ۴۸
نوسان‌های کمبود فشار بخار ۶۰
فصل چهارم ۶۶
کنترل رطوبت در گلخانه ۶۶
رطوبت‌زدایی ۷۰
مرطوب سازی ۷۳
سامانه‌های خنک‌سازی در گلخانه‌ها ۷۵
خنک‌سازی به‌روش غیرفعال ۷۶
کنترل دما با سایبان ۷۷
تهویه ۷۹
تهویه طبیعی ۸۰
تهویه اجباری ۸۳
رطوبت‌زنی ۸۵

خنک‌کنندهٔ تبخیری ۸۵
استفاده از مه‌پاش پرفشار ۸۶
استفاده از سامانه‌های تبخیری سقف ۹۴
روش‌های رطوبت‌زدایی ۹۶
تهویه–گرمایش ۹۹
پمپ حرارتی رطوبت‌زدا ۱۰۰
سامانهٔ رطوبت‌زدای پیشرفته با فناوری ترکیبی ۱۰۳
سامانه‌های با مواد جاذب رطوبت ۱۰۶
شرح سامانهٔ جاذب رطوبت مایع ۱۰۹
چگالش با استفاده از سطح سرد ۱۱۲
توصیه‌های کاربردی مدیریت رطوبت در گلخانه‌ها ۱۱۳
منابع مورد استفاده ۱۱۸

مقدمه

رطوبت هوا جزء کلیدی کنترل محیطی گلخانه‌هاست که بر تنش‌های محیطی، رشد آفات و بیماری‌های گیاهی و عملکرد کمی و کیفی محصول تاثیر مهمی دارد (سوزکی[1] و همکاران، ۲۰۱۵). رطوبت هوا بر فرآیندهای تعرق و فتوسنتز تأثیر می‌گذارد و هنگامی که مقدار آن بسیار زیاد می‌شود، به عنوان یکی از عوامل اصلی ظهور قارچ‌ها و دیگر عوامل بیماری‌زای گیاهی در نظر گرفته می‌شود (سوسی[2] و همکاران، ۲۰۲۲؛ رضوانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ زارعی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رضوانی و همکاران، ۱۴۰۱). در شرایط رطوبتی نامناسب، رشد برخی از محصولات کاهش می‌یابد و تغییرات کالبدشناختی[3] و تغییر یا تاخیر در نمو گیاهان ممکن است رخ دهد (گایر[4]، ۲۰۲۲). مقادیر رطوبت بهینه برای هر گیاه بستگی زیادی به تنش‌های آبی، شرایط نامساعد اقلیمی، خطر حملهٔ قارچ/آفت/حشره، مرحلهٔ رسیدگی محصول و مرحلهٔ رشد گیاه دارد (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). مدیریت مناسب رطوبت گلخانه به دلایل متعدد زیر به‌عنوان عامل حیاتی در نظر گرفته می‌شود:

1- Suzuki
2- Soussi
3- Anatomical
4- Geyer

- سبب ایجاد شرایط بهینهٔ رشد گیاه، از جمله رشد سالم و فتوسنتز می‌شود.
- به پیشگیری از رشد عوامل بیماری‌زا و آفات گیاهی و کاهش وابستگی به استفاده از سموم شیمیایی کمک می‌کند.
- سبب افزایش بهره‌وری انرژی می‌شود.
- با جلوگیری از آسیب ناشی از رطوبت بالا به حفظ یکپارچگی سازهٔ گلخانه‌ای کمک می‌کند.

برای نمونه، اگر برای کاهش میزان رطوبت، تهویه از طریق باز شدن دریچه‌ها همزمان با گرمایش باشد، انرژی اضافی مصرفی به حدود ۲۰ درصد از نیاز انرژی گلخانه می‌رسد (دی زوارت[1]، ۱۹۹۶). اگر شرایط خیلی مرطوب شود، گیاهان نمی‌توانند تعرق کنند یا نفس بکشند. رطوبت شدید یا کمبود آن گرده افشانی را چالش برانگیز می‌کند (ویلیامز[2]، ۲۰۱۷). در گلخانه‌های ایران نیز مشکل رطوبت زیاد، رطوبت کم و نوسان‌های آن طی شبانه روز وجود دارد (رضوانی، ۱۴۰۰). در اواسط پاییز، زمستان و اوائل بهار به دلیل کاهش دما و جلوگیری از تلفات انرژی، گلخانه عایق‌بندی می‌شود به گونه‌ای که تهویه به‌خوبی انجام نمی‌شود. تهویهٔ نامناسب به‌همراه تعرق گیاهان سبب افزایش رطوبت در گلخانه خواهد شد که به همراه کاهش دما منجر به افزایش شدید رطوبت

1- De Zwart
2- Williams

نسبی در گلخانه می‌شود. در فصل‌های گرم به دلیل تهویهٔ نامناسب و نبود سامانه‌های خنک‌سازی در گلخانه‌ها، افزایش شدید دما و کاهش رطوبت در گلخانه‌ها مشاهده می‌شود (رضوانی و سلگی، ۱۳۹۴). به دلیل تغییرات دما طی شبانه روز نیز تغییرات رطوبت از شرایط نزدیک به اشباع در ساعات نزدیک به پگاه تا رطوبت نسبی زیر ۳۰ درصد در حدود ظهر، به‌ویژه از اواسط اردیبهشت تا اوائل تیرماه، مشاهده می‌شود (رضوانی و سلگی، ۱۳۹۴؛ رضوانی، ۱۴۰۰). این نوسان‌ها در ماه‌های دیگر نیز وجود دارد ولی به دلیل فعال بودن کوره‌های هوای گرم در شب‌های زمستانی و بالا بودن دمای شبانه از اواسط تیر تا اواسط شهریور در اغلب نقاط کشور، افزایش رطوبت شبانه کمتر مشاهده می‌شود (رضوانی، ۱۳۹۹). با توجه به مباحث مطرح شده و اهمیت مدیریت رطوبت در گلخانه، توجه ویژه به مفاهیم رطوبت و اثرهای آن بر محصول و رشد بیماری‌ها و آفات و نیز مدیریت آن، به صورتی که در دسترس اغلب کارشناسان این حوزه قرار گیرد و بتوانند به شناخت درستی از مفاهیم رطوبت و شیوه‌های کنترل آن در گلخانه‌ها برسند، موضوعی ضروری به نظر می‌رسد.

فصل اول
مبانی و تعاریف

تعریف رطوبت

مقدار آب موجود در هوا به صورت بخار را رطوبت می‌گویند. بخار آب نامرئی است و یک تا چهار درصد حجم جو را تشکیل می‌دهد (لندیس و نیزلی[1]، ۱۹۹۰). مه[2]، مه رقیق[3] و دیگر قطره‌های ریز آب، بخار آب نیستند. حداکثر مقدار بخار آب در هر نمونه هوای معین، به دما و تا حدی به‌فشار هوا بستگی دارد.

مقدار واقعی بخار آب موجود نیز با در دسترس بودن آب آزاد برای تبخیر تعیین می‌شود. بخار آب همیشه از ناحیه‌ای با غلظت بالا (مانند داخل حفره‌های برگ) به ناحیه‌ای با غلظت پایین (هوای گلخانه) حرکت می‌کند. این اصل محرک فرآیند تعرق تبخیری است.

ترکیب هوای مرطوب

هوای مرطوب ترکیبی از هوای خشک و بخار آب است. بخش هوای خشک مخلوطی از چندین گاز است، اما ترکیب

1- Landis and Nisley
2- Fog
3- Mist

هوای خشک که اساساً در سراسر اتمسفر زمین ثابت است به عنوان یک جزء واحد در نظر گرفته می‌شود و برای اهداف تهویهٔ مطبوع هیچ نگرانی در مورد احتمال شروع متراکم شدن یا مایع شدن یک یا چند گاز خشک تشکیل دهنده وجود ندارد (تاکر[1]، ۱۹۹۴). بنابراین، هوای مرطوب را می‌توان مخلوطی تک فاز و دو جزئی از بخار آب و هوای خشک در نظر گرفت.

فشار بخار آب[2]

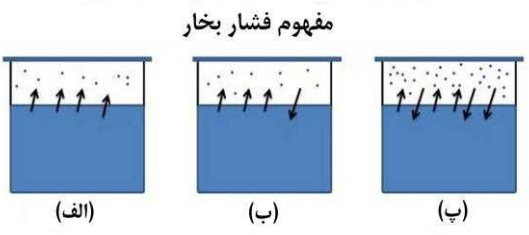
جوّ مخلوطی است از گازهایی که هر یک دارای فشار جزئی است. فشار هوا در هر نقطه برابر مجموع فشارهای جزئی وارد شده از طرف هر گاز به انضمام بخار آب است. ترکیب این گازها، از جمله بخار آب، در سطح دریا فشاری در حدود ۱۰۱۳ میلی‌بار (۱۰۱/۳ کیلوپاسکال) ایجاد می‌کند. در این مخلوط، فشار بخار آب از حدود ۲ میلی بار (۰/۲ کیلوپاسکال) در شرایط بسیار خشک و سرد تا حدود ۴۲ میلی بار (۴/۲ کیلوپاسکال) در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد متغیر است (وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا[3]، ۲۰۱۵، انجمن مهندسی گرمایش، تبرید و تهویه مطبوع آمریکا[4]، ۲۰۰۵). مقدار بخار آب موجود در هوا با توجه به

[1]- Tucker
[2]- Water Vapor Pressure
[3]- British Columbia Ministry of Agriculture
[4]- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (*ASHRAE*)

زمان و مکان تغییر می‌کند. هرگاه فشار بالای سطح آب (یا زمین) در زمان معین و در دمای معین به صورت اشباع درآید، فشار جزئی بخار آب در آن زمان و دما را فشار اشباع[1] گویند (شرکت سامانه‌های کنترلی آرگِس[2]، ۲۰۰۹). در واقع هوا فقط مقدار معینی بخار آب را در دمای مشخصی پیش از آغاز متراکم شدن به آب مایع (به شکل‌هایی مانند شبنم یا باران) می‌تواند نگه دارد. حداکثر مقدار بخار آبی که هوا می‌تواند در دمایی معین نگه دارد، باعث می‌شود هوا از بخار آب اشباع شود (لندیس[3] و همکاران، ۱۹۹۲). فشار بخار آب در این حالت را فشار بخار اشباع[4] می‌نامند. چنانچه هوا گرم‌تر شود، موجب تبخیر مولکول‌های بیشتری می‌شود تا آنکه فضای بالایی سطح آب (زمین) به حالت اشباع در می‌آید، بنابراین فشار بخار جزئی آب به دما بستگی دارد و با افزایش دما، فشار بخار اشباع نیز افزایش می‌یابد. هر چه دما کمتر باشد، مقدار بخار آب لازم برای رسیدن به مرحلهٔ اشباع کمتر است. با گرم‌تر شدن هوا، مقدار آبی که هوا می‌تواند نگه دارد (فشار بخار اشباع آن) افزایش می‌یابد. با سرد شدن هوا، فشار بخار اشباع کاهش می‌یابد، به این معنی که هوا نمی‌تواند بخار آب زیادی را در خود نگه دارد. به همین دلیل است که بعد از

1- Saturated Pressure
2- Argus
3- Landis
4- Saturated Vapor Pressure (SVP)

یک صبح خنک در همه جا شبنم وجود دارد. به طور مشابه، مقدار واقعی بخار آب موجود در هوا، فشار بخار واقعی[1] نامیده می‌شود. برای توضیح مفهوم فشار بخار، مایعی را در یک محفظه بسته و دمای ثابت در نظر بگیرید (شکل ۱-۱). در شکل ۱-۱-الف برخی از مولکول‌های مایع انرژی کافی برای جدا شدن از مایع و ورود به هوا به شکل بخار را دارند. در شکل ۱-۱-ب با افزایش دمای ظرف، هوا حاوی مولکول‌های بخار خواهد بود تا جایی که برخی از مولکول‌ها مجبور می‌شوند دوباره با فشار هوای جزئی وارد مایع شوند. در شکل ۱-۱-پ شرایط تعادل وجود دارد، زمانی که نرخ خروج مولکول‌ها از مایع با نرخ بازگشت آن‌ها به مایع برابر باشد. در چنین شرایطی هوای بالای مایع با مولکول‌های مایع اشباع می‌شود و فشار روی سطح مایع را فشار بخار آن در دمای غالب می‌نامند.



شکل ۱-۱: مفهوم فشار بخار

[1]- Actual water Vapor Pressure (AVP)

رطوبت‌سنجی[1]

رطوبت‌سنجی (سایکرومتریک) علمی است که به مطالعه خواص ترمودینامیکی هوای مرطوب، اثر رطوبت هـوا بـر مواد و آسایش انسان، حیوان و گیاه و روش‌های کنترل خواص حرارتی هوای مرطوب می‌پردازد (سعیدی و سجادی، ۱۳۸۸). خواص زیر در توصیف حالات هوای مرطوب استفاده می‌شود. به این دلیل که جرم بخار آب ممکن است در خلال فرآیند تغییر کند، تمام خواص ویژه (در واحد جرم) فقط بر اساس جرم هوای خشک است.

دمای هوای خشک[2]

دمای هوای خشک، دمای مخلوط هوای خشک و بخار آب است که با دماسنج نشان داده می‌شود. حباب دماسنج باید تمیز، خشک و دارای محافظ مناسب باشد تا از تبادل حرارت تابشی بین دماسنج و هر جسم یا سطحی که در دمایی متفاوت از دما در همان شرایط رطوبتی هواست، جلوگیری شود (کندل[3]، ۲۰۰۰).

دمای حباب مرطوب[4]

دمای حباب مرطوب دمایی است که با پوشاندن حباب دماسنج حباب خشک معمولی با یک فتیله پنبه‌ای یا پارچه‌ای

1- Psychrometric
2- Dry-bulb temperature (DBT)
3- Kandil
4- Wet-bulb temperature

مرطوب اندازه‌گیری می‌شود. هنگامی که هوا از فتیله عبور می‌کند، آب تبخیر می‌شود و گرمای نهان را جذب می‌کند که باعث کاهش دمای فتیله خواهد شد. سرعت تبخیر بستگی به مقدار آب مورد نیاز برای اشباع هوای اطراف فتیله دارد. در شرایط اشباع، تبخیر بیشتری رخ نخواهد داد و دمای حباب مرطوب همان دمای حباب خشک خواهد بود (کندل، ۲۰۰۰).

رطوبت مطلق[1]

رطوبت مطلق دقیقاً به ما می‌گوید که چه مقدار بخار آب در هوا وجود دارد. رطوبت مطلق مقدار واقعی بخار آب در حجم معینی از هواست و بر حسب وزن (گرم بخار آب) در حجم (مترمکعب هوا) بیان می‌شود. رطوبت مطلق به ندرت در گلخانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود، اما به جای آن از رطوبت نسبی استفاده می‌شود (لندیس و نیزلی، ۱۹۹۰).

هوای خشک[2]

هوایی را که مقدار رطوبت آن صفر باشد هوای خشک می‌نامند.

[1]- Absolute humidity (AH)
[2]- Dry air

مقدار رطوبت[1] یا نسبت رطوبت[2]

نسبت وزن بخار موجود در هوا به وزن هوای خشک یا مقدار وزن بخار هوا موجود در یک کیلوگرم هوای خشک نسبت رطوبت جرم بخار آب را به جرم هوا مرتبط می‌کند (انجمن مهندسی گرمایش، تبرید و تهویه مطبوع آمریکا، ۲۰۰۵). این مفهوم با فشار بخار نیز ارتباط دارد که در رابطه‌های ۱-۱ تا ۱-۳ ارائه شده است.

$$W = \frac{m_w}{m_a} \qquad (۱-۱)$$

$$W = 0.62198\frac{p_w}{p_a} \qquad (۱-۲)$$

$$W = 0.62198\frac{p_w}{p-p_w} \qquad (۱-۳)$$

در این رابطه‌ها: m_w جرم بخار آب و m_a جرم هوای خشک، p_w فشار جزیی بخار آب، p_a فشار جزیی هوا و p فشار اتمسفر ($p=p_a+p_w$) است. نسبت رطوبت به خودی خود هیچ نشانه‌ای از نزدیک بودن وضعیت اشباع هوا به دست نمی‌دهد. این متغیر کمیتی است مطلق که در یک حالت هوای مرطوب معمولی، کمتر از ۳ درصد جرم هوای خشک در یک حجم معین است.

رطوبت نسبی[3]

رایج‌ترین و کاربردی‌ترین روش توصیف رطوبت در گلخانه‌ها، رطوبت نسبی است. رطوبت نسبی نسبت مقدار رطوبت در

[1]- Moisture content
[2]- Humidity ratio
[3]- Relative humidity (RH)

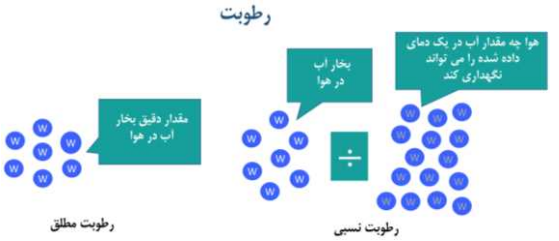
یک حجم از هوا به مقدار کل رطوبتی است که می‌تواند در یک دما و فشار اتمسفر معین، در حالت اشباع نگهداری شود (شکل ۱-۲) و به صورت درصد بیان می‌شود. رطوبت نسبی به ما می‌گوید چه مقدار آب در هوا به درصد از آن مقدار آبی وجود دارد که هوا در آن دما می‌تواند نگه‌دارد. رطوبت نسبی در مقیاس صفر تا ۱۰۰ درصد بیان می‌شود. واضح است که رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد شرایط بسیار مرطوب است، در حالی که برای مثال رطوبت نسبی ۶۰ درصد یا کمتر نشان دهنده شرایط خشک است (ندرهاف[1]، ۲۰۰۹). با این فرض که هوای خشک و بخار آب هر دو به عنوان گازهای ایده‌آل رفتار می‌کنند، رطوبت نسبی نشان می‌دهد که آیا هوا گنجایش رطوبت بیشتری دارد یا نه؟

برای محاسبهٔ رطوبت نسبی، فشار بخار آب محیط بر فشار بخار آب اشباع تقسیم می‌شود (انجمن مهندسی گرمایش، تبرید و تهویه مطبوع آمریکا، ۲۰۰۵).

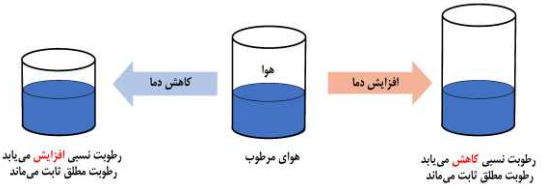
$$RH = \frac{p_w}{p_{w,s}} \qquad (۴-۱)$$

در این رابطه: p_w نشان دهندهٔ فشار جزئی بخار آب و $p_{w,s}$ فشار اشباع بخار آب است با فرض اینکه دمای هوا دو جزء از هوای مرطوب در تعادل حرارتی، یعنی در یک دما، هستند. رابطه بین دما، رطوبت مطلق و رطوبت نسبی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

[1]- Nederhoff



شکل ۱-۲: مفهوم رطوبت مطلق و رطوبت نسبی (شرکت سامانه‌های کنترلی آرگِس، ۲۰۱۸)



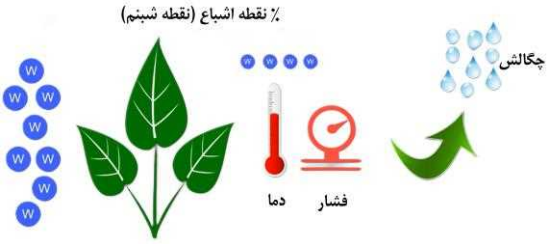
شکل ۱-۳: رابطهٔ بین رطوبت مطلق، رطوبت نسبی و دما (آپس آل‌پاین[1]، ۲۰۲۰)

دمای نقطهٔ شبنم[2]

اشباع زمانی اتفاق می‌افتد که هوا تا نقطه‌ای خنک شود که فشار بخار اشباع از فشار بخار محیط بیشتر شود و چگالش رخ دهد. دمایی که در آن چگالش اتفاق می‌افتد، نقطهٔ شبنم نامیده می‌شود. نقطهٔ شبنم نشان دهنده رطوبت هواست، اما به صورت دما بیان می‌شود و اندازه‌گیری دقیق مقدار آب در هوا است. در زیر این دما، بخار آب متراکم می‌شود (لندیس

[1]- Alps Alpine
[2]- Dew point temperature

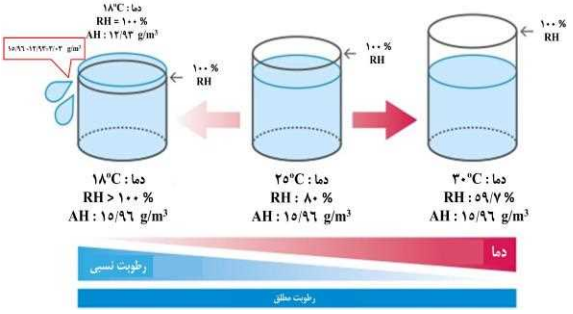
و همکاران، ۱۹۹۲). بنابراین، هر زمان که میعان یا شبنم روی سطح جسمی مشاهده می‌شود، نشان دهنده کاهش و خنک شدن دمای هوای پیرامون آن سطح تا زیر نقطهٔ اشباع یا نقطهٔ شبنم است که باعث می‌شود مقداری از بخار آب به شکل مایع متراکم شود (شکل ۱-۴).



شکل ۱-٤: نقطهٔ شبنم
(شرکت سامانه‌های کنترلی آرگِس، ۲۰۱۸)

به عبارت دیگر، اگر در فضایی بسته منبع تولید بخار آب داشته باشیم، رطوبت تا زمانی توسط هوا جذب می‌شود که شرایط « اشباع » اتفاق افتد (یعنی تا زمانی که هوا حداکثر مقدار بخار آبی را نگه دارد که می‌تواند). اگر منبع تولید بخار آب همچنان به تولید بخار آب ادامه دهد، شاهد ایجاد چگالش (یعنی تشکیل قطره‌های آب روی سطوح) خواهیم بود. این نشان می‌دهد که به حداکثر ظرفیت گنجایش آب یا سطح رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد رسیده است. هوای سرد، نسبت به هوای گرم، می‌تواند بخار آب بسیار کمتری نگه

دارد. اگر هوای ۲۵ درجه سلسیوس ۱۵/۹۶ گرم بخار آب را در مترمکعب نگه دارد (در حالی که می‌تواند ۲۰/۰۸ گرم بخار آب در مترمکعب را نگه دارد)، رطوبت نسبی ۷۹/۵ درصد (۱۵/۹۶÷۲۰/۰۸=۰/۷۹۵) است. در مقابل، اگر هوای ۳۰ درجه سلسیوس ۱۵/۹۶ گرم در مترمکعب بخار آب را در خود نگهدارد (در حالی که حداکثر می‌تواند ۲۷/۲ گرم بخار آب در مترمکعب را در خود نگه دارد)، رطوبت نسبی آن ۵۸/۷ درصد (۱۵/۹۶÷۲۷/۲۰=۰/۵۸۷) است. اگر دما به ۱۸ درجه سلسیوس نزول کند، ظرفیت رطوبتی که هوا در خود می‌تواند نگه‌دارد ۱۲/۹۳ گرم بخار آب بر مترمکعب است، در حالی‌که در هوا ۱۵/۹۶ گرم بخار آب در مترمکعب وجود دارد. در نتیجه ۳/۰۳ گرم بخار آب بر مترمکعب به صورت چگالش از هوا خارج می‌شود (شکل۱-۵).



شکل ۱-۵: (آی بی دی[1]، ۲۰۲۱؛ نگارندگان)

[1]- Ibidi

بهره‌برداران با مدیریت رطوبت و دما در گلخانه‌های خود می‌توانند چگالش را که باعث ایجاد مشکلات ناشی از بیماری‌های قارچی می‌شود، به حداقل برسانند (لندیس و همکاران، ۱۹۹۲).

گرمای محسوس[1]

گرمای محسوس گرمایی است که سبب تغییر دمای خشک هوا می‌شود (طباطبایی، ۱۳۸۲).

گرمای نهان[2]

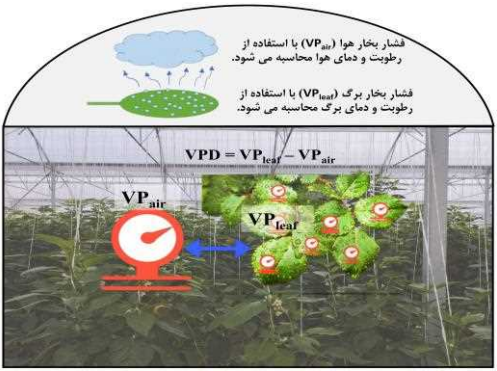
گرمایی که آب برای تبخیر شدن می‌گیرد یا بخار برای تقطیر شدن پس می‌دهد. در سراسر این فرآیندها، دما و فشار آب یا بخار ثابت می‌مانند (طباطبایی، ۱۳۸۲).

کمبود فشار بخار[3]

شکاف یا اختلاف بین مقدار واقعی و حداکثر چیزی را کمبود یا کسری گویند. کمبود بخار[4] و کمبود فشار بخار هر دو نشان دهنده "فضای خالی" (کمبود) برای بخار آب، و همچنین "اثر خشک کردن" هوا، یا نیروی محرکه تعرق هستند. کمبود فشار بخار، اختلاف بین فشار بخار داخل حفره‌های برگ (که معمولاً در آنها رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد

1- Sensible Heat
2- Latent Heat
3- Vapor Pressure Deficit (VPD)
4- Vapor Deficit (VD)

در نظر گرفته می‌شود) و فشار بخار هوای پیرامون برگ (شکل ۱–۶) است (ندرهاف، ۲۰۰۹؛ وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵). اهمیت کمبود فشار بخار نسبت به رطوبت نسبی ارتباط مستقیم آن با نرخ تعرق گیاه است (ندرهاف، ۲۰۰۹). واحد کمبود فشار بخار اغلب در واحدهای فشار استاندارد مانند میلی‌بار، کیلوپاسکال یا پوند بر اینچ‌مربع و گاهی در واحد غلظت کمبود جرم مانند گرم آب در هر مترمکعب هوای خشک یا گرم آب به ازای هر کیلوگرم هوای خشک بیان می‌شود (وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵). در عمل، کمبود فشار بخار از اختلاف بین فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی هوا (رضوانی و همکاران، ۱۳۹۸) و از رابطه ۱–۵ محاسبه می‌شود (رضوانی[1] و همکاران، ۲۰۲۰):



شکل ۱–٦ : کمبود فشار بخار
(آرگِس، ۲۰۱۸؛ فاوست[2]، ۲۰۱۷؛ نگارندگان)

[1]- Rezvani
[2]- Faust

$$VPD(T,RH) = \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \times 0.611 \times \exp\left(17.27 \times \frac{T}{T+237.3}\right) \qquad (۵-۱)$$

در این رابطه: T دمای هوا به درجه سلسیوس، RH رطوبت نسبی به درصد، و VPD کمبود فشار بخار به کیلوپاسکال است.

معمولاً شرایط رطوبتی گلخانه با رطوبت نسبی یا کمبود فشار بخار بیان می‌شود ولی کمبود فشار بخار نه تنها وضعیت رطوبتی گلخانه را بهتر نشان می‌دهد بلکه به‌طور موثری نشانگر شرایط اقلیمی گلخانه نیز هست (رضوانی، ۱۴۰۰). کمبود فشار بخار آب هوا عامل اصلی برای کنترل جذب آب توسط گیاه در محیط گلخانه و موثر بر دیگر فرآیندهای فیزیولوژیکی (گرده افشانی، رشد و تولید) گیاه است. کمبود فشار بخار را می‌توان شاخصی برای ارزیابی تهدید بیماری، پتانسیل چگالش و نیاز آبیاری محصول گلخانه‌ای استفاده کرد.

اندازه‌گیری رطوبت در گلخانه

پیشرفت‌های اخیر در فناوری نیمه‌رساناها امکان ساخت حسگرهای[1] رطوبتی بسیار دقیق، بادوام و باصرفه را ممکن ساخته است (ویلسون[2]، ۲۰۰۴). بسته به طراحی و نوع حسگر، مقدار رطوبت مقاومت یا ظرفیت خازنی حسگرها را

[1]- Sensors
[2]- Wilson

تغییر می‌دهد و این تغییرات برای تعیین کمیت رطوبت اندازه‌گیری می‌شوند. با توجه به اصول کار، حسگرهای رطوبت را می‌توان به‌طورکلی به سه دسته حسگر رطوبت خازنی[1]، حسگر رطوبت حرارتی[2]، و حسگر رطوبت مقاومتی[3] طبقه‌بندی کرد (ویلسون، ۲۰۰۴؛ بوژل[4] و همکاران، ۲۰۲۰). ویژگی‌های اولیه انواع مختلف حسگرهای رطوبت به شرح زیر است:

الف) حسگر رطوبت خازنی: ثابت دی‌الکتریک حسگر با توجه به رطوبت تغییر می‌کند و تغییر در ثابت دی‌الکتریک تقریباً به طور مستقیم با رطوبت نسبی محیط متناسب است (شکل ۱–۷ الف). این نوع حسگرها تنها انواع دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت نسبی با دامنهٔ کار کامل هستند که می‌توانند با دقت تا رطوبت نسبی صفر درصد کار کنند. این حسگرها دارای ضریب دمای پایین هستند و می‌توانند در دمای بالا تا ۲۰۰ درجه سلسیوس کار کنند. آنها قادر به بازیابی کامل از تراکم، پایداری بالا، زمان پاسخ سریع و مقاوم در برابر بخارهای شیمیایی و آلودگی هستند (ویلسون، ۲۰۰۴؛ بوث[5] و همکاران، ۲۰۱۵). این حسگرها در رطوبت

[1]- Capacitive humidity sensor (CHS)
[2]- Thermal humidity sensor (THS)
[3]- Resistive humidity sensor (RHS)
[6]- Bhujel
[5]- Both

کم (کمتر از ۵ درصد) دقت خود را از دست می‌دهند (بوث و همکاران، ۲۰۱۵).

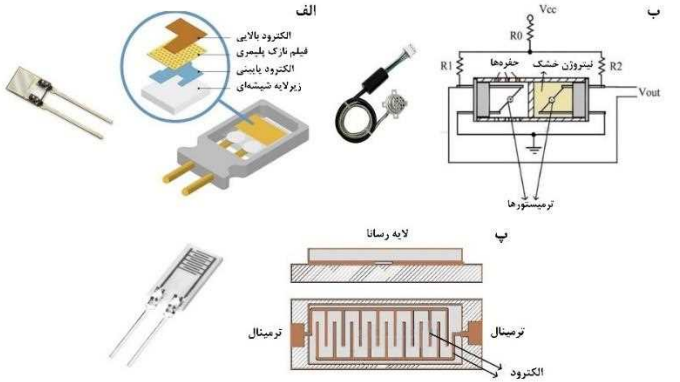
ب) حسگر رطوبت حرارتی: در این حالت هدایت حرارتی حسگر با رطوبت موجود در هوا نسبت مستقیم دارد. به عبارت دیگر، این حسگر رطوبت مطلق هوا را اندازه‌گیری می‌کند (بوژل و همکاران، ۲۰۲۰). این حسگرها، رطوبت مطلق را با محاسبه تفاوت بین هدایت حرارتی هوای خشک و هوای حاوی بخار آب اندازه‌گیری می‌کنند (شکل ۱-۷ ب). تفاوت در مقاومت بین دو ترمیستور[1]* با رطوبت مطلق رابطهٔ مستقیم دارد (ویلسون، ۲۰۰۴).

پ) حسگر رطوبت مقاومتی: مقادیر مقاومت با رطوبت تغییر می‌کند و معمولاً رابطه نمایی معکوس با رطوبت دارد. جدیدترین حسگرهای رطوبت مقاومتی از پوشش سرامیکی برای محافظت در محیط‌هایی که چگالش رخ می‌دهد استفاده می‌کنند (شکل ۱-۷ پ). در این نوع حسگرها دقت اندازه‌گیری رطوبت نسبی ۲± درصد است. زمان بازیابی حسگرهای مقاومتی از چگالش کامل تا رطوبت نسبی ۳۰ درصد، چند دقیقه است (ویلسون، ۲۰۰۴).

---

[1]- Thermistor

* ترمیستور یا مقاومت گرمایی، مقاومت حساس به دماست. در واقع، مقاومت آن با دما تغییر می‌کند. با اندازه‌گیری مقاومت یک ترمیستور، می‌توان دمای آن را تعیین کرد. برای همین، از آن به‌عنوان حسگر دما استفاده می‌شود (ترمیستور https://fa.wikipedia.org/wiki/).



شکل ۱-۷ : حسگرهای رطوبت خازنی (الف)، هدایت حرارتی (ب) و مقاومتی (پ) (شرکت هنگکو[1] تکنولوژی، ۲۰۲٤)

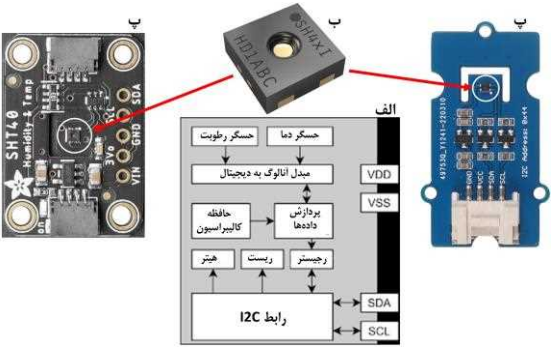
[1] - HENGKO

جدول ۱-۱- طبقه‌بندی ویژگی‌های حسگرهای مختلف رطوبت بر اساس اصول کار آنها (بوژل و همکاران، ۲۰۲۰)

مشخصه	حسگر رطوبت حرارتی	حسگر رطوبت مقاومتی	حسگر خازنی رطوبت
دامنه	صفر تا ۱۳۰ گرم بر مترمکعب در ۶۰ °C	۱۵ تا ۹۵ درصد	صفر تا ۱۰۰ درصد
دقت	±۲٪ در ۴۰ °C و ±۰/۵٪ رطوبت نسبی در ۱۰۰ °C	±۲٪ رطوبت نسبی	±۲٪ رطوبت نسبی برای ۵٪ تا ۹۵٪
حساسیت	بهتر از CHS و RHS	۱ کیلو اهم تا ۱۰۰ مگا اهم برای گام ۶۳٪	۰/۲ تا ۰/۵ پیکو فاراد برای ۱٪ رطوبت نسبی
مواد	مواد NTC[4] (شیشه یا نیمه‌هادی)	پلیمر رسانا[2]، نمک، یا بستر تیمارشده[3]	پلیمر ترموست[1]، سرامیک
زمان پاسخ	سریع‌تر از CHS و RHS	۱۰ تا ۳۰ ثانیه برای رطوبت نسبی ۶۳٪	۳۰ تا ۶۰ ثانیه برای رطوبت نسبی ۶۳٪
ضریب دما	تا ۳۰۰ °C	۴۰- °C تا ۲۰۰ °C	تا ۲۰۰ °C
خطی بودن	-	نمایی منفی	تقریباً خطی

[1]- Thermoset polymer
[2]- Conductive polymer
[3]- Treated substrate
[4]- Negative temperature coefficient

از آنجا که رطوبت و دمای داخل گلخانه ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند، بهتر است هر دو حسگر دما و رطوبت در کنار هم قرار گیرند. امروزه هر دو حسگر دما و رطوبت در یک ماژول[1] در دسترس هستند (شکل ۱-۸) که از نظر سادگی سیستم قابل توجه است زیرا تعداد و اندازهٔ دستگاه‌های حسگر را کاهش می‌دهد و در نتیجه پیچیدگی طراحی سامانه، مصرف انرژی، بار انتقال داده و حافظه را کاهش می‌دهد (بوژل و همکاران، ۲۰۲۰). در جدول (۱-۱) ویژگی‌های حسگرهای مختلف رطوبت آورده شده است.



شکل ۱-۸ : دیاگرام بلوکی عملکردی حسگر دما و رطوبت نسبی (الف)؛ حسگر دما و رطوبت نسبی (ب)؛ ماژول حسگر دما و رطوبت نسبی (پ)

[1]- Module

محل نصب حسگرها برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی و کمبود فشار بخار بالای تاج گیاه در مرکز منطقهٔ رشد محصول است. اندازه‌گیری‌ها باید به صورت روزانه در سراسر هر دوره روشنی و تاریکی، حداقل یک ساعت پس از تغییر نور/ تاریکی صورت گیرد و میانگین و انحراف معیار متغیر اندازه‌گیری شده گزارش شود. دقت اندازه‌گیری کمبود فشار بخار ۰/۳± کیلوپاسکال و رطوبت نسبی ۲٪± است (دستورالعمل‌های کمیته بین‌المللی محیط کنترل شده[1]، ۲۰۰۴).

[1]- International Committee for Controlled Environment Guidelines (ICCEG)

فصل دوم

محدودهٔ رطوبتی محصولات گلخانه‌ای

کنترل رطوبت در محدودهٔ بهینه برای توفیق در کشت محصولات گلخانه‌ای ضروری است. بنابراین گلخانه‌داران با در نظر گرفتن گیاهانی که کشت کرده‌اند باید به دنبال حفظ محدودهٔ رطوبت بهینه باشند. در این فصل به دامنه بهینه رطوبت محصولات مختلف گلخانه‌ای در مراحل مختلف رشد و محدوده مناسب رطوبت شبانه پرداخته خواهد شد.

حدود بهینهٔ رطوبت در محصولات گلخانه‌ای

تأثیر رطوبت به نوع گیاهی بستگی دارد که در داخل گلخانه رشد می‌کند، هر نوع گیاه دارای محدودهٔ رطوبت نسبی خاصی است. در جدول (۲-۱) محدودهٔ مناسب رطوبت نسبی و دما برای محصولات مختلف گلخانه‌ای آورده شده است.

جدول ۲-۱: دامنهٔ دما و رطوبت نسبی بهینه در برخی محصولات گلخانه‌ای

نام محصول	دما (°C)		رطوبت نسبی (٪)	منبع
	روز	شب		
گوجه‌فرنگی	۲۳–۲۷	۱۳–۱۶	۵۰–۸۰	رابای[1] و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی[2] و همکاران، ۲۰۲۲
خیار	۲۵–۳۰	۱۶–۱۸	۷۰–۹۰	رابای و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی و همکاران، ۲۰۲۲
فلفل دلمه‌ای	۲۲–۳۰	۱۴–۱۶	۶۰–۸۰	رابای و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی و همکاران، ۲۰۲۲
بادمجان	۲۵–۲۸	۱۴–۱۶	۶۵–۷۵	رابای و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی و همکاران، ۲۰۲۲
کاهو	۲۴–۲۸	۱۳–۱۶	۶۰–۸۰	رابای و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی و همکاران، ۲۰۲۲
توت فرنگی	۲۰–۲۶	۱۳–۱۶	۵۰–۶۵	رابای و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی و همکاران، ۲۰۲۲
طالبی	۲۴–۳۰	۱۸–۲۱	۶۵–۷۵	کاستیا، ۲۰۱۳ پونس[3] و همکاران، ۲۰۱۴
لوبیا سبز	۲۲–۲۶	۱۶–۱۸	۷۰–۸۰	رابای و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی و همکاران، ۲۰۲۲
نخود فرنگی	۲۵–۳۰	۱۶–۱۸	۷۰–۸۰	رابای و همکاران، ۲۰۱۹ سوسی و همکاران، ۲۰۲۲
گل رز	۱۸–۲۴	۱۵–۲۱	۷۰–۸۰	درای‌گیر[4]، ۲۰۲۴

رطوبت با اثرگذاری بر وضعیت آب گیاه بر تمام فرآیندهای مربوط به تعرق، از جمله انتقال یون، موازنهٔ آب و خنک‌سازی به‌واسطهٔ تعرق تأثیر می‌گذارد. کمبود فشار بخار نیروی

[1]- Rabbi
[2]- Soussi
[3]- Ponce
[4]- DryGair

محرکه تعرق در گیاهان است، این کمبود فشار با تغییر دمای محیط به‌طور تصاعدی تغییر می‌کند. رطوبت کم و دمای بالا کمبود فشار بخار را افزایش می‌دهد که به افزایش مقاومت روزنه و تعرق منجر می‌شود. به‌طور مشابه، کمبود فشار بخار پایین با کاهش تعرق گیاه باعث کم آبی، پژمردگی و نکروز می‌شود. رطوبت زیاد هم بر رشد رویشی و هم کیفیت میوه تأثیر می‌گذارد و احتمال ابتلا به بیماری را افزایش می‌دهد (رابای و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به مطالعات (گرند و هند[۱]، ۱۹۸۷؛ عراقی[۲] و همکاران، ۱۹۹۵؛ پرنگر و لینگ[۳]، ۲۰۰۱؛ وزارت کشاورزی، غذا و امور روستایی انتاریو[۴]، ۲۰۰۵؛ شرکت سامانه‌های کنترلی آرگِس، ۲۰۰۹؛ کاستیلا[۵]، ۲۰۱۳؛ وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵؛ کوناکاپی[۶] و همکاران، ۲۰۱۸؛ شمشیری[۷] و همکاران، ۲۰۱۸) در جدول (۲-۲) مقادیر کمبود فشار بخار به صورت کلی، مستقل از مرحلهٔ رشد و نوع گیاه در دماها و سطوح مختلف رطوبت بر حسب کیلوپاسکال آورده شده است. به طور کلی، دامنهٔ بهینه برای هر محصول (تقریباً ۰/۶ تا ۱/۰ کیلوپاسکال) منطقهٔ سبز پر

[1]- Grange and Hand
[2]- Iraqi
[3]- Prenger and Ling
[4]- Ontario Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs (OMAFRA)
[5]- Castilla
[6]- Konopacki
[7]- Shamshiri

رنگ، دامنه مناسب (۰/۴۳ تا ۰/۶ و ۱/۰ تا ۱/۲ کیلوپاسکال) نواحی سبز کم رنگ، محدوده قابل قبول اما حاشیه‌ای (۰/۲ تا ۰/۴۳ و ۱/۲ تا ۱/۳۷ کیلوپاسکال) نواحی زرد رنگ است و محدوده خطرناک با کمبود فشار بخار خیلی کم و یا زیاد (کمتر از ۰/۲ و بیشتر از ۱/۳۷ کیلوپاسکال) به رنگ قرمز هستند.

جدول ۲-۲: مقادیر کمبود فشار بخار در دماها و سطوح مختلف رطوبت نسبی

دما (°C) \ رطوبت نسبی (٪)	۱۰۰	۹۵	۹۰	۸۵	۸۰	۷۵	۷۰	۶۵	۶۰	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۱۰
۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۵۴	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۹۱	۱/۰۰	۱/۰۹	۱/۱۸	۱/۲۷	۱/۳۶	۱/۵۴
۱۶	۰/۰۰۰	۰/۰۹	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۶۴	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۹۱	۱/۰۰	۱/۰۹	۱/۱۸	۱/۲۷	۱/۳۶	۱/۶۲
۱۷	۰/۰۰۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۲۹	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۵۸	۰/۶۸	۰/۷۸	۰/۸۷	۰/۹۷	۱/۰۷	۱/۱۶	۱/۲۶	۱/۳۶	۱/۴۵	۱/۷۳
۱۸	۰/۰۰۰	۰/۱۰	۰/۲۱	۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۸۳	۰/۹۳	۱/۰۳	۱/۱۴	۱/۲۴	۱/۳۳	۱/۴۵	۱/۵۵	۱/۸۴
۱۹	۰/۰۰۰	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۳۳	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۷۷	۰/۸۸	۰/۹۹	۱/۱۰	۱/۲۱	۱/۳۲	۱/۴۳	۱/۵۳	۱/۶۵	۱/۹۸
۲۰	۰/۰۰۰	۰/۱۲	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۷۰	۰/۸۲	۰/۹۴	۱/۰۵	۱/۱۷	۱/۲۹	۱/۴۰	۱/۵۲	۱/۶۴	۱/۷۵	۲/۱۱
۲۱	۰/۰۰۰	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۸۷	۱/۰۰	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۷	۱/۴۹	۱/۶۲	۱/۷۴	۱/۸۷	۲/۲۴
۲۲	۰/۰۰۰	۰/۱۳	۰/۲۶	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۶۶	۰/۷۹	۰/۹۳	۱/۰۶	۱/۱۹	۱/۳۲	۱/۴۵	۱/۵۹	۱/۷۲	۱/۸۵	۱/۹۸	۲/۳۸
۲۳	۰/۰۰۰	۰/۱۴	۰/۲۸	۰/۴۲	۰/۵۶	۰/۷۰	۰/۸۴	۰/۹۸	۱/۱۲	۱/۲۶	۱/۴۱	۱/۵۵	۱/۶۹	۱/۸۳	۱/۹۷	۲/۱۱	۲/۵۳
۲۴	۰/۰۰۰	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۹۰	۱/۰۴	۱/۱۹	۱/۳۴	۱/۴۹	۱/۶۴	۱/۷۹	۱/۹۳	۲/۰۹	۲/۲۴	۲/۶۹
۲۵	۰/۰۰۰	۰/۱۶	۰/۳۳	۰/۴۸	۰/۶۳	۰/۷۹	۰/۹۵	۱/۱۱	۱/۲۷	۱/۴۳	۱/۵۸	۱/۷۴	۱/۹۰	۲/۰۶	۲/۲۳	۲/۳۸	۲/۸۵
۲۶	۰/۰۰۰	۰/۱۷	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۶۷	۰/۸۴	۱/۰۱	۱/۱۸	۱/۳۵	۱/۵۱	۱/۶۸	۱/۸۵	۲/۰۲	۲/۱۹	۲/۳۵	۲/۵۲	۳/۰۳
۲۷	۰/۰۰۰	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۵۳	۰/۷۱	۰/۸۹	۱/۰۷	۱/۲۵	۱/۴۳	۱/۶۰	۱/۷۸	۱/۹۶	۲/۱۳	۲/۳۲	۲/۵۰	۲/۶۷	۳/۲۱
۲۸	۰/۰۰۰	۰/۱۹	۰/۳۸	۰/۵۷	۰/۷۶	۰/۹۵	۱/۱۳	۱/۳۲	۱/۵۱	۱/۷۰	۱/۸۹	۲/۰۸	۲/۲۷	۲/۴۶	۲/۶۵	۲/۸۴	۳/۴۰
۲۹	۰/۰۰۰	۰/۲۰	۰/۴۰	۰/۶۰	۰/۸۰	۱/۰۰	۱/۲۰	۱/۴۰	۱/۶۰	۱/۸۰	۲/۰۰	۲/۲۰	۲/۴۰	۲/۶۰	۲/۸۰	۳/۰۱	۳/۶۱
۳۰	۰/۰۰۰	۰/۲۱	۰/۴۲	۰/۶۳	۰/۸۵	۱/۰۶	۱/۲۷	۱/۴۹	۱/۷۰	۱/۹۱	۲/۱۲	۲/۳۳	۲/۵۵	۲/۷۶	۲/۹۷	۳/۱۸	۳/۸۲
۳۱	۰/۰۰۰	۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۶۷	۰/۹۰	۱/۱۲	۱/۳۵	۱/۵۷	۱/۸۰	۲/۰۲	۲/۲۵	۲/۴۷	۲/۷۰	۲/۹۲	۳/۱۵	۳/۳۷	۴/۰۴
۳۲	۰/۰۰۰	۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۷۱	۰/۹۵	۱/۱۹	۱/۴۳	۱/۶۶	۱/۹۰	۲/۱۴	۲/۳۸	۲/۶۲	۲/۸۵	۳/۰۹	۳/۳۳	۳/۵۷	۴/۲۸
۳۳	۰/۰۰۰	۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۷۵	۱/۰۱	۱/۲۶	۱/۵۱	۱/۷۶	۲/۰۱	۲/۲۶	۲/۵۲	۲/۷۷	۳/۰۲	۳/۲۷	۳/۵۳	۳/۷۷	۴/۵۳
۳۴	۰/۰۰۰	۰/۲۷	۰/۵۳	۰/۸۰	۱/۰۶	۱/۳۳	۱/۶۰	۱/۸۶	۲/۱۳	۲/۳۹	۲/۶۶	۲/۹۳	۳/۱۹	۳/۴۶	۳/۷۲	۳/۹۹	۴/۷۹
۳۵	۰/۰۰۰	۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۸۴	۱/۱۲	۱/۴۱	۱/۶۹	۱/۹۷	۲/۲۵	۲/۵۳	۲/۸۱	۳/۰۹	۳/۳۷	۳/۶۶	۳/۹۲	۴/۲۲	۵/۰۶
۳۶	۰/۰۰۰	۰/۳۰	۰/۵۹	۰/۸۹	۱/۱۹	۱/۴۹	۱/۷۸	۲/۰۸	۲/۳۸	۲/۶۷	۲/۹۷	۳/۲۷	۳/۵۷	۳/۸۶	۴/۱۶	۴/۴۶	۵/۳۵
۳۷	۰/۰۰۰	۰/۳۱	۰/۶۳	۰/۹۴	۱/۲۶	۱/۵۷	۱/۸۸	۲/۲۰	۲/۵۱	۲/۸۲	۳/۱۲	۳/۴۵	۳/۷۷	۴/۰۸	۴/۳۹	۴/۷۱	۵/۶۵
۳۸	۰/۰۰۰	۰/۳۳	۰/۶۶	۰/۹۹	۱/۳۳	۱/۶۶	۱/۹۹	۲/۳۲	۲/۶۵	۲/۹۸	۳/۳۱	۳/۶۴	۳/۹۸	۴/۳۱	۴/۶۴	۴/۹۷	۵/۹۶
۳۹	۰/۰۰۰	۰/۳۵	۰/۷۰	۱/۰۵	۱/۴۰	۱/۷۵	۲/۱۰	۲/۴۵	۲/۸۰	۳/۱۵	۳/۵۰	۳/۸۵	۴/۲۰	۴/۵۵	۴/۹۰	۵/۲۵	۶/۲۹
۴۰	۰/۰۰۰	۰/۳۷	۰/۷۳	۱/۱۱	۱/۴۸	۱/۸۴	۲/۲۱	۲/۵۸	۲/۹۵	۳/۳۲	۳/۶۹	۴/۰۶	۴/۴۳	۴/۸۰	۵/۱۶	۵/۵۳	۶/۶۴

با توجه به گونه و مرحلهٔ رشد گیاه، دامنهٔ بهینه کمبود فشار بخار متفاوت است. با توجه به اینکه در دما و رطوبت مشخص مقدار کمبود فشار بخار تغییر نمی‌کند، تفسیر مقادیر کمبود فشار بخار بر حسب گونهٔ گیاه، مرحلهٔ رشد، روش‌های زراعی، سازگاری محصول و شرایط منطقه‌ای متفاوت است (آرگس، ۲۰۰۹).

در جدول (۲-۳) حدود مقادیر کمبود فشار بخار بهینه در مراحل مختلف رشد گیاه گوجه فرنگی و شرایط نوری مختلف آورده است (شمشیری و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۲-۳: مقادیر کمبود فشار بخار (کیلو پاسکال) بهینه در مراحل مختلف رشد گوجه‌فرنگی و شرایط نوری مختلف (شمشیری و همکاران، ۲۰۱۸)

	شرایط نوری	حداقل بهینه	حداکثر بهینه
مرحلهٔ آغازین رشد	آفتابی ابری شب	۰/۲	۰/۸۴۵
مرحلهٔ رشد رویشی	آفتابی ابری شب	۰/۵۹۶ ۰/۵۲۸ ۰/۴۱۳	۱/۰۶۹ ۰/۸۹۵ ۰/۷۰۱
گلدهی تا رسیدگی میوه	آفتابی ابری شب	۰/۵۹۶ ۰/۵۲۸ ۰/۴۱۳	۱/۴۲۵ ۱/۱۹۳ ۰/۹۳۵

کمبود فشار بخار بهینه برای نشاها و قلمه‌ها

نشاها و قلمه‌ها ظریف هستند و به تغییرات محیطی حساس‌اند، بنابراین، حفظ سطوح مناسب کمبود فشار بخار برای حصول اطمینان از رشد و نمو سالم آنها بسیار مهم است. هنگامی که نشاها و قلمه‌ها به گلخانه می‌رسند، به دلیل شرایط نامناسب حمل و نقل، از دست رفتن رطوبت سینی‌های نشا و جعبه‌های قلمه و نیز به دلیل نوسان‌های دما وضعیت آنها به سمت کم آبی می‌رود. استفاده از کنترل کمبود فشار بخار برای بازگرداندن آنها به سطح بهینه آبداری می‌تواند تفاوت بین یک محصول قوی و سالم و محصولی باشد که دائماً باید در دورهٔ رشد برای حفظ آن تلاش کرد (کالکینز[1]، ۲۰۲۳). قلمه‌ها و نشاها در مرحلهٔ اول رشد گیاهی قرار دارند و در حال توسعهٔ ریشه هستند و نمی‌توانند تنش زیادی را تحمل کنند. در این مرحله از رشد بهتر است رطوبت بالاتر و کمبود فشار بخار نزدیک به انتهای پایین محدودهٔ بهینه باشد. کمبود فشار بخار بهینه برای رشد مطلوب نشاها و قلمه‌ها از ۰/۳ (وولاگر و رانکل[2]، ۲۰۱۵) تا ۰/۶ و نیز نزدیک به ۰/۸ کیلو پاسکال پیشنهاد شده است. با توجه به بررسی منابع (جدول ۲-۴) و دامنهٔ بهینهٔ مقادیر کمبود فشار بخار، این شاخص برای مرحلهٔ رشد ابتدایی ۰/۴ تا ۰/۸

[1]- Calkins
[2]- Wollaeger and Runkle

کیلوپاسکال پیشنهاد می‌شود. این دامنهٔ کمبود فشار بخار به کاهش خشک شدن گیاهان تازه سبز شده کمک می‌کند و در نتیجه دفعات مه‌پاشی و آبیاری مورد نیاز را برای آبدار نگه‌داشتن گیاهان کاهش می‌دهد (وولاگر و رانکل، ۲۰۱۵).

کمبود فشار بخار بهینه برای مرحلهٔ رویشی

در مرحلهٔ رویشی گیاهان بزرگ‌تر می‌شوند و مقاومت آنها افزایش می‌یابد (کووردا[1]، ۲۰۲۰). در ابتدای رشد رویشی بهتر است مقدار کمبود فشار بخار مانند مرحله ابتدایی رشد (۰/۴ تا ۰/۸ کیلوپاسکال) باشد (آکوا من[2]، ۲۰۱۹؛ جو[3]، ۲۰۲۳؛ اشرف[4] و همکاران، ۲۰۲۱). اما به تدریج کمبود فشار بخار افزایش یابد. برای افزایش کمبود فشار بخار می‌توان رطوبت محیط رشد گیاه را کاهش داد. افزایش کمبود فشار بخار باعث افزایش جذب آب و مواد مغذی می‌شود. کمبود فشار بخار نباید بیش از حد افزایش یابد، زیرا باعث بسته شدن روزنه‌های گیاه و جذب کمتر دی‌اکسیدکربن می‌شود. این موضوع در مرحلهٔ رشد رویشی، به دلیل استفادهٔ گیاهان از دی‌اکسیدکربن برای رشد، بسیار مهم است (کووردا، ۲۰۲۰). در اواخر مرحلهٔ رشد رویشی، کمبود فشار بخار نزدیک به میانگین محدودهٔ بهینه (۰/۸ تا ۱/۱ کیلوپاسکال) و حدود

[1]- Koverda
[2]- Aqua Man
[3]- Joe
[4]- Ashraf

۰/۹۵ کیلوپاسکال باشد. در برخی منابع این مقدار ۱/۰ کیلو پاسکال نیز گفته شده است (کووردا، ۲۰۲۰).

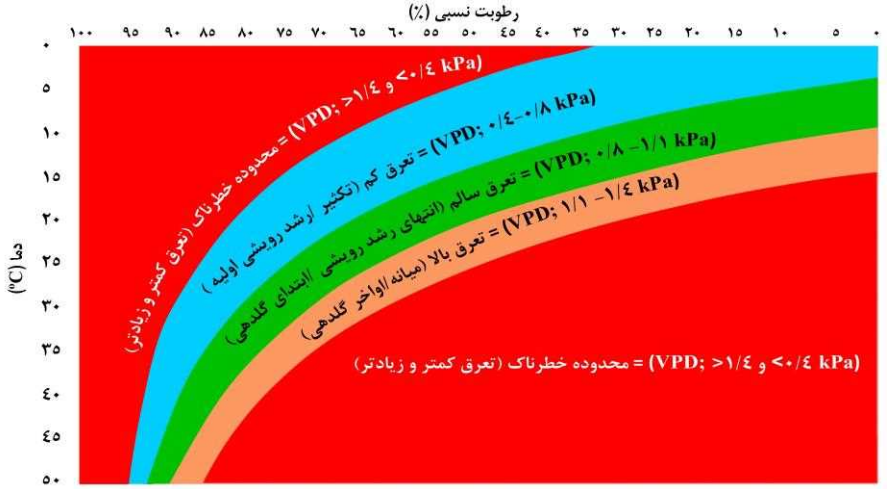
جدول ۲-٤: مقادیر کمبود فشار بخار (کیلو پاسکال) توصیه شده برای مراحل مختلف رشد محصولات در منابع مختلف

مرحله رشد / منبع	نشا و قلمه	رشد رویشی	ابتدای گلدهی	انتهای گلدهی
آکوا من، ۲۰۱۹	۰/۴–۰/۸	۰/۸–۱/۱	۱/۰–۱/۴	۱/۳–۱/۵
دیمالوکس[1]، ۲۰۲۴	۰/۸–۱/۰	۱/۰–۱/۲	۱/۰–۱/۲	۱/۲–۱/۶
جو، ۲۰۲۳	۰/۴–۰/۸	۰/۸–۱/۲	۰/۸–۱/۲	۱/۲–۱/۶
کووردا، ۲۰۲۰	۰/۸	۱/۰	۱/۲–۱/۵	۱/۲–۱/۵
اشرف و همکاران، ۲۰۲۱	۰/۴–۰/۸	۰/۸–۱/۲	۰/۸–۱/۲	۱/۲–۱/۶
مقادیر انتخاب شده	**۰/٤–۰/۸ (۰/٦۰)**	**۰/۸–۱/۱ (۰/۹۵)**	**۰/۸–۱/۱ (۰/۹۵)**	**۱/۱–۱/۳۷ (۱/۲۵)**

[1]- Dimalux

کمبود فشار بخار بهینه در انتهای مرحلهٔ گلدهی و رسیدگی محصول

در میانه و انتهای مرحلهٔ گلدهی گیاهان گلخانه‌ای، کمبود فشار بخار بهینه به انتهای بالای محدوده بهینه و مناسب یعنی ۱/۱ تا ۱/۵ کیلوپاسکال نزدیک باشد (آکوا من، ۲۰۱۹؛ کووردا، ۲۰۲۰). در مراحل انتهایی گلدهی و رسیدگی محصول، به ویژه زمانی که تاج گیاهی متراکم است، کمبود فشار بخار بالا (بالاتر از ۱/۰ کیلوپاسکال) مطلوب‌تر است. در این شرایط رطوبتی، گیاهان می‌توانند با تعرق خود را خنک کنند و تنش کمتری داشته باشند در حالی که شرایط محیطی گلخانه برای رشد و توسعهٔ بیماری‌های گیاهی کمتر مساعد است (جو، ۲۰۲۳). در شکل (۲–۱) بر اساس منابع جدول (۲–۴) دامنهٔ بهینهٔ کمبود فشار بخار به صورت کلی در مراحل مختلف رشد محصولات نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: دامنهٔ بهینهٔ کمبود فشار بخار در مراحل مختلف رشد محصول

کمبود فشار بخار در شب

در شب، به دلیل نبودن نور، اکثر گیاهان روزنه‌های خود را می‌بندند و فتوسنتز را متوقف می‌کنند. بسته شدن روزنه‌ها مانع از خروج آب از منافذ باز می‌شود و تعرق را به میزان زیادی کاهش می‌دهد. گیاهان در شب به جای فتوسنتز عمدتاً تنفس می‌کنند و با این عمل قندهای ذخیره شده (ساخته شده توسط فتوسنتز) را به انرژی تبدیل می‌کنند. این فرآیند سبب می‌شود گیاهان در طول شب دی‌اکسیدکربن تولید کنند.

به دلیل اینکه گیاهان در شب فتوسنتز نمی‌کنند، در طول شب باید موارد زیر را در نظر گرفت (کووردا، ۲۰۲۰):

الف) پیشگیری از بیماری: در شب رطوبت نسبی در حد پایین دامنهٔ بهینه نگهداری شود تا از رشد و گسترش قارچ‌هایی مانند پوسیدگی جوانه[1] و سفیدک پودری[2] جلوگیری شود.

ب) کمبود فشار بخار شبانه نزدیک به کمبود فشار بخار روز نگهداری شود: به‌دلیل اینکه گیاهان نیاز دارند دی‌اکسیدکربن ایجاد شده بر اثر تنفس را از طریق روزنه آزاد کنند، بنابراین کمبود فشار بخار باید نسبتاً نزدیک به محدوده کمبود فشار بخار روز نگهداری شود.

پ) نوسان‌های کمبود فشار بخار به حداقل برسد: نوسان‌های مکرر کمبود فشار بخار بیشتر از ۰/۴ کیلوپاسکال می‌تواند

[1]- Bud rot
[2]- Powdery mildew

عملکرد محصول را تا ۲۰ درصد کاهش دهد. کمبود فشار بخار شبانه به طور کلی لازم است نزدیک به کمبود فشار بخار روزانه نگهداری شود، اما به دلیل اهمیت کمتر آن نسبت به روز، می‌تواند اندکی کمتر باشد.

در زیر برخی از توصیه‌های کلی برای دامنهٔ بهینه کمبود فشار بخار در مراحل مختلف رشد محصول در شب آورده شده است:

الف) کمبود فشار بخار شبانه برای نشاها و قلمه‌ها: نشاها و قلمه‌ها نمی‌توانند تنش زیادی را تحمل کنند زیرا در مرحله رشد و توسعهٔ ریشه هستند. به همین دلیل رطوبت بالاتر و کمبود فشار بخار نزدیک به انتهای پایین دامنه کلی تعریف شده باید باشد (کووردا، ۲۰۲۰). محدودهٔ بهینه کمبود فشار بخار شبانه برای نشاها و قلمه‌ها ۰/۴ تا ۰/۶ کیلوپاسکال (در حالت بهینه ۰/۵ کیلوپاسکال) است.

ب) کمبود فشار بخار شبانه در مرحلهٔ رشد رویشی: برای جلوگیری از رشد و گسترش قارچ‌ها و بیماری‌های گیاهی، با افزایش کمبود فشار بخار می‌توان رطوبت محیط گلخانه را کاهش داد. کمبود فشار بخار شبانه بهینه برای مرحلهٔ رشد رویشی نزدیک به متوسط دامنهٔ کلی (۱/۲ تا ۰/۸ کیلوپاسکال) در حالت بهینه ۱/۰ کیلوپاسکال است (کووردا، ۲۰۲۰).

پ) کمبود فشار بخار شبانه در مرحلهٔ گلدهی: گل‌ها به مسائل مختلف حساس هستند. باید از به‌وجود آمدن رطوبت بیش از حد در گلخانه پرهیز شود. دامنهٔ بهینه کمبود فشار بخار شبانه برای مرحلهٔ گلدهی به انتهای بالای محدوده نزدیک‌تر (۱/۰ تا ۱/۴ کیلوپاسکال) و در حالت بهینه ۱/۲ کیلوپاسکال است.

فصل سوم

تغییرات رطوبت محیط و گیاه

در این فصل به اثر رطوبت محیط بر گیاه از جنبه‌های مدیریت آفات و بیماری‌های و فیزیولوژی گیاهی پرداخته خواهد شد. همچنین اثر کم‌بودن رطوبت، زیادبودن رطوبت و نوسان‌های رطوبت بر تعرق و جذب مواد غذایی توسط گیاه در گلخانه شرح داده می‌شود.

اثر تغییرات رطوبت محیط بر گیاه

شناخت کمبود فشار بخار برای فراهم کردن بهترین شرایط برای رشد محصول، درک نیاز آبیاری با توجه به کودهای مورد استفاده و تنظیم درست آنها برای برآورده کردن نیازمندی‌های رشد ضروری است.

کمبود فشار بخار بر پنج مشخصهٔ کلیدی در گیاهان تأثیر می‌گذارد که همه تا حدودی به هم مرتبط هستند (کووردا، ۲۰۲۰).

۱- بازشدگی روزنه‌ها: با افزایش کمبود فشار بخار، روزنه‌ها کوچک‌تر می‌شوند.

۲- جذب دی‌اکسیدکربن: با افزایش کمبود فشار بخار و کوچک‌تر شدن روزنه‌ها، جذب دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد.

۳- تعرق: با افزایش کمبود فشار بخار، گیاه به دلیل اختلاف بیشتر در فشار بخار بین برگ و هوا، سریع‌تر تعرق می‌کند (آب به صورت بخار از برگ‌ها تبخیر می‌شود).

۴- دریافت مواد مغذی از ریشه: با افزایش کمبود فشار بخار و افزایش تعرق، ریشه‌ها مواد مغذی بیشتری جذب می‌کنند.

۵- تنش گیاه: با افزایش کمبود فشار بخار، نیروهای بیشتری بر گیاه وارد می‌آید (از برگ تا ریشه) و گیاه با تنش بیشتری روبه‌رو می‌شود.

تاثیر رطوبت بر مدیریت آفات و بیماری‌های گیاهان گلخانه‌ای

رطوبت آزاد که به صورت لایهٔ نازک آب روی سطوح گیاه می‌نشیند و رطوبت نسبی نقش کلیدی در رخداد بیماری‌های گیاهی دارند، از این نظر که مراحل آلوده‌سازی، اسپورزایی و در مواردی کلونیزه[1] کردن و استیلای قارچ‌ها، اُمیست‌ها[2] و باکتری‌ها را تسهیل می‌کنند. به‌طور ویژه، نقاط و شرایطی که لایه‌ای نازک از آب روی برگ، ساقه یا میوه تشکیل می‌گردد ضریب آلودگی بسیاری از عوامل بیماری‌زا را تعیین

[1]- Colonization
[2]- Oomycetes (آب کپک)

می‌کند. عوامل بیماری‌زا از نظر مدت زمان وجود آب در سطح بافت به‌منظور تکمیل مرحله آلوده‌سازی خود، متفاوت هستند. عامل کلیدی برای شروع آلودگی قارچی در سطح بافت به اصطلاح "حداقل مدت زمان خیسی[1]" در سطح بافت است. در ۹۰ درصد از عوامل بیماری‌زای گلخانه میانگین عدد حداقل مدت زمان خیسی حدود نه ساعت است و البته باید توجه داشت که عوامل دیگری ازجمله دما، مواد مغذی ترشح شده در سطح کوتیکول گیاه، سن و غلظت مایه تلقیح عامل بیماری‌زا، سن و خصوصیات بافت گیاه و دیگر میکروارگانیسم‌های موجود در محل در آلودگی دخالت دارند. عوامل متفاوتی در آلوده‌سازی قارچ بوتریتیس، عامل کپک خاکستری دخالت دارند و تحقیقات نشان داده است که حداقل مدت زمان خیسی در این مورد، با توجه به گونهٔ گیاه میزبان و نوع بافت برگ یا میوه، بین یک تا هشت ساعت متفاوت است. برعکس همهٔ عوامل مهم بیماری‌زا در گلخانه، گونه‌های سفیدک پودری سطحی در اثر حداقل مدت زمان خیسی دچار ممانعت از رشد می‌شوند. احتمالاً برخی از گونه‌های قارچ سفیدک پودری نیازمند حداقل مدت زمان خیسی کوتاهی برای شروع آلوده‌سازی هستند. بنابراین پیشگیری از تشکیل لایه خیس سطحی یا ایجاد وقفه در مدت زمان آن روی برگ، میوه و گل‌ها یکی از بهترین

[1]- Minimum wetness duration (W_{min})

روش‌های مدیریت در مورد مهم‌ترین بیماری‌های گیاهی است (کرویدهف و المر[1]، ۲۰۲۰).

فیزیولوژی گیاهی و کمبود فشار بخار

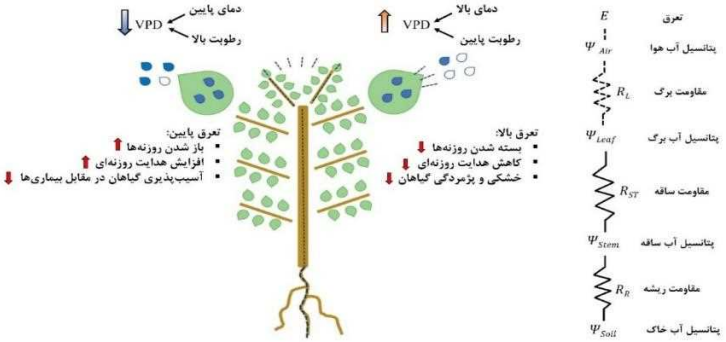
گیاهان آب را نه تنها برای فتوسنتز بلکه برای جذب مواد مغذی مورد نیاز برای جنبه‌های مختلف رشد گیاه از طریق ریشه جذب می‌کنند. جذب آب از طریق اختلاف پتانسیل آب در سراسر زنجیره خاک، گیاه و اتمسفر (مانند بین خاک و ریشه، ریشه و ساقه، ساقه و برگ و برگ و هوای خارجی) پیش می‌رود و مانند سازوکار فتیله‌ای عمل می‌کند (شکل ۳-۱).

بخار آب از منافذی به نام روزنه در سطح زیرین برگ خارج می‌شود. رابطه‌ای مستقیم بین کمبود فشار بخار و میزان تعرق یا از دست دادن آب از گیاه وجود دارد. برای حفظ جریان پیوسته آب، گیاهان باید در فرآیند تعرق، بخار آب گازی را همراه با اکسیژن از طریق روزنه‌ها به محیط پیرامونی خود آزاد کنند (شکل ۳-۲) (دزرت ایر[2]، ۲۰۲۲). این جریان آب همچنین برای آماس سلول‌های گیاه، جلوگیری از پژمردگی و خنک نگه‌داشتن گیاه نسبت به محیط اطرافش ضروری است. مقدار رطوبت آزاد شده توسط گیاه تا حدودی با باز و بسته شدن روزنه‌های آن تنظیم می‌شود. فرآیند جذب و رهاسازی آب با افزایش رطوبت

[1]- Kruidhof and Elmer
[2]- Desert Aire

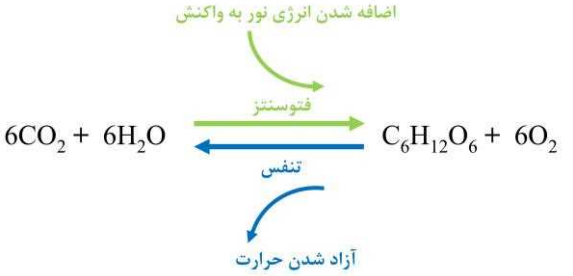
هوای اطراف برگ به صورت چرخشی خود تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در صورت حذف نشدن رطوبت (مثلاً در اثر تهویه)، باعث کاهش سرعت جریان تعرق می‌شود (کاترس[1]، ۲۰۲۱).

[1]- Cutress



شکل ۳-۱: اثر کمبود فشار بخار بر تنظیم انتقال آب در امتداد زنجیرهٔ خاک، گیاه و اتمسفر با تاثیرات آن بر تعرق از برگ و رفتار گیاه. خط در سمت راست نشانگر سری پتانسیل (ψ) و مقاومت (R) از طریق اجزای مختلف زنجیرهٔ خاک، گیاه و اتمسفر است (امیترانو[1]، ۲۰۱۹)

[1]- Amitrano



شکل ۳-۲: فرآیند فتوسنتز و تنفس در گیاهان (دزرت ایر، ۲۰۲۲).

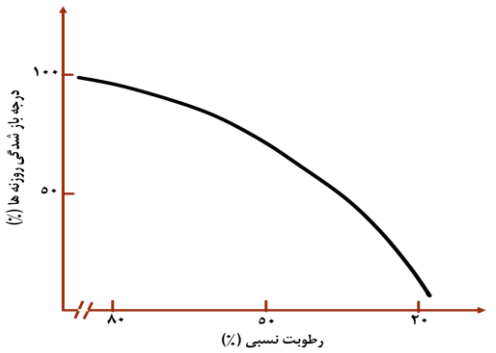
کمبود فشار بخار گونه‌های گیاهان را به‌صورت متفاوتی تحت تأثیر قرار می‌دهد و گیاهان می‌توانند در دراز مدت با قرار گرفتن در معرض سطوح مختلف کمبود فشار بخار تحت تأثیر قرار گیرند. برای مثال، گیاهان هنگام قرار گرفتن در معرض سطوح بالای کمبود فشار بخار نیاز به تعرق بالایی دارند و تمایل دارند برگ‌هایی با روزنه‌های کوچک‌تر یا روزنه‌های کمتر ایجاد کنند. به این ترتیب، اهمیت در نظر گرفتن مدیریت کمبود فشار بخار در این است که از فیزیولوژی مناسب گیاهان و نبود تاثیر مضر برای بهره‌وری یا بازده رشد آنها اطمینان حاصل شود (کاترس، ۲۰۲۱).

رطوبت کم

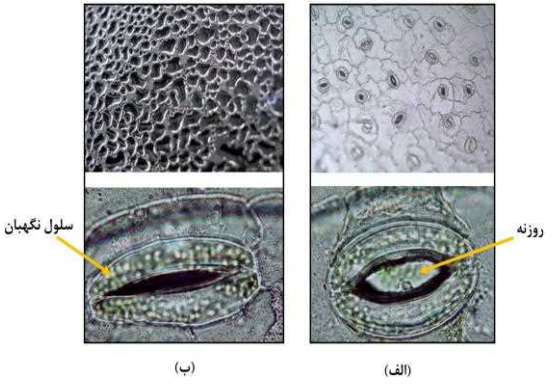
رطوبت نسبی هنگامی که به کمتر از ۳۰ درصد می‌رسد، ممکن است سبب مشکلات جدی از جمله توقف رشد گیاه

و کند شدن فتوسنتز شود (کاندیر[1]، ۲۰۲۳). رطوبت نسبی پایین از رشد محصول جلوگیری می‌کند و باعث ایجاد تنش آبی در محصول و کاهش طول ساقه و اندازهٔ برگ می‌شود (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). در کمبود فشار بخار نسبتاً بالا، بین ۰/۵ تا ۱/۲ کیلو پاسکال، تعرق گیاهان با باز کردن روزنه‌ها و آزاد کردن مقدار قابل توجهی بخار آب در هوا محرک رشد را افزایش می‌دهد. این افزایش در تعرق منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه می‌شود و گیاه برای رشد به مواد مغذی بیشتری نیاز پیدا می‌کند. اگر کمبود فشار بخار در حد بالای قابل قبول باشد (۱/۲ تا ۱/۳۷ کیلوپاسکال)، گیاه تعرق بالایی خواهد داشت که باعث جذب سنگین آب می‌شود و همراه با این آب، جذب مواد مغذی بیش از حد مجاز منجر به سطوح سمی در گیاهان خواهد شد و می‌تواند سبب سوختگی لبه برگ‌ها شبیه اثر سموم گیاهی شود (کاترس، ۲۰۲۱)؛ همچنین می‌تواند باعث از دست رفتن تعادل مواد مغذی در بافت برگ شود و چیزی شبیه به کمبود ایجاد کند که در واقعیت تجمع بیش از حد عنصر خاصی به دلیل خشکی هوا است (تامس[2]، ۲۰۱۸). با این حال، گیاه در کمبود فشار بخار بالا (> ۱/۵ کیلوپاسکال) روزنه‌های خود را می‌بندد تا از انتشار بخار آب در هوا و کم آبی به دلیل تعرق زیاد جلوگیری کند (شکل‌های ۳-۳ و ۳-۴).

[1]- Condair
[2]- Thomas



شکل ۳-۳: رابطه بین مقدار رطوبت نسبی و میزان بازشدگی روزنه‌ها(لندیس و همکاران، ۱۹۹۲)



شکل ۳-٤: (الف) روزنه باز ، (ب) روزنه بسته (ندرهاف ، ۲۰۰۹)

بسته شدن روزنه‌ها سبب کند یا متوقف شدن فتوسنتز می‌شود. با بسته شدن روزنه‌ها، خنک شدن برگ‌ها از طریق تعرق (سرمایش تبخیری) کاهش می‌یابد و برگ‌ها در معرض

خطر آسیب دمای بالا قرار می‌گیرند. برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی و مرگ ناشی از پژمردگی، بسیاری از گونه‌های گیاهی برگ‌های خود را می‌پیچانند یا آنها را به سمت پایین جهت می‌دهند تا سطح کمتری از آن را در معرض نور خورشید قرار دهند. کمبود فشار بخار بالا و رطوبت نسبی پایین می‌تواند منجر به غلتک برگ (پیچیدگی یا قاشقی شدن[1] برگ)، رشد نیافتن گیاهان[2]، پژمرده شدن یا ترد شدن برگ‌ها[3] شود (شکل ۳-۵)، همچنین می‌تواند سبب بدشکلی، موج‌دار شدن یا ترک خوردگی، ایجاد نواحی مرده یا حتی سوختگی لبه در برگ‌های تازه رشد یافته شود. دلیل آن نیز نیاز سلول‌های گیاهی به فشار آماس (فشار داخلی آب) برای انبساط مناسب است. اگر کمبود فشار بخار بسیار بالا باشد، ممکن است گیاه آب را سریع‌تر از آن که بتواند از طریق ریشه جذب کند از طریق تعرق از دست بدهد. در نتیجه، فشار سلول برگ کاهش می‌یابد و انبساط سلول‌ها کند می‌شود، در همین حال امکان دارد دیگر نواحی روی برگ هنوز به طور معمول در حال گسترش باشند (منبسط شوند). این ریز ناهمسانی باعث کژی (اعوجاج) برگ می‌شود. نوسان‌های شدید کمبود فشار بخار طی شبانه روز به دلیل تغییرات در فشار آماس برگ نیز می‌تواند سبب کژی

[1]- Leaf roll
[2]- Stunted plants
[3]- Crispy leaves

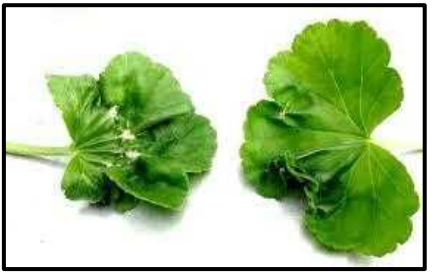
(اعوجاج) برگ شود (تامس، ۲۰۱۸). اگر برگ‌های برخی از گیاهان دارای کژی (اعوجاج) هستند، ابتدا کمبود فشار بخار بررسی شود (شکل ۳-۶). این شرایط کیفیت گیاهان گلدانی و برگی زینتی را کاهش می‌دهد و همچنین می‌تواند باعث کند شدن سرعت رشد و کیفیت سبزی‌ها شود (پسل اینسترومنت[1]، ۲۰۲۲). اگر گیاهان خیلی خشک باشند، کنه‌های عنکبوتی می‌توانند در گلخانه با سرعت زیادی رشد کنند (کلکینز، ۲۰۲۳).

دمای بالا و رطوبت نسبی به شدت پایین (کمبود فشار بخار بالا) باعث ریزش شکوفهٔ گل در کشت گوجه‌فرنگی می‌شود، به‌طوری‌که ساقه گل‌ها پیش از ریزش شکوفه‌ها زرد می‌شود (شکل ۳-۵). این وضعیت سبب خواهد شد گرده به دلیل چسبیدن به پرچم گل نتواند مادگی را بارور کند و در نتیجه گوجه‌فرنگی تولید نمی‌شود (اُگر[2]، ۲۰۲۰).

به طور کلی، کمبود رطوبت می‌تواند باعث پژمرده شدن و کم شدن رشد گیاهان، کوچک‌تر شدن اندازهٔ برگ‌ها، سوختگی لبهٔ برگ‌ها، پیچ خوردگی برگ‌ها، بارور نشدن گل و افزایش هجوم کنه‌های عنکبوتی شود.

[1]- Pessl Instruments
[2]- Auger

شکل ۳-۵: (الف) پژمردگی محصول، (ب) پژمردگی برگ‌ها، (پ) پیچیدگی برگ‌ها بر اثر کمبود فشار بخار بالا (پسل اینسترومنت، ۲۰۲۲)



شکل ۳-٦: کژی (اعوجاج) برگ بر اثر کمبود فشار بخار بالا (تامس، ۲۰۱۸)

شکل ۳-۷: ریزش گل در گوجه‌فرنگی بر اثر کمبود فشار بخار بالا (اُگر، ۲۰۲۰)

رطوبت زیاد

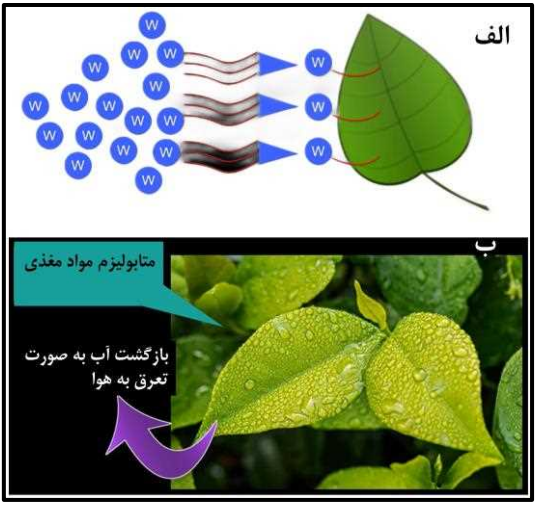
پاییز و بهار زمان‌هایی هستند که بیماری‌های مربوط به رطوبت معمولاً در گلخانه‌ها به اوج خود می‌رسند. روزهای آفتابی باعث افزایش تعرق از سطح برگ و تبخیر از خاک می‌شود. هوای گرم (در روز) رطوبت را به شکل بخار نگه می‌دارد. اما در شب با خنک شدن هوا تا نقطهٔ شبنم، چگالش اتفاق می‌افتد و قطره‌های آب روی سطوح خنک‌تر مانند

برگ‌ها و پوشش گلخانه تشکیل می‌شود. این رطوبت باعث جوانه‌زنی هاگ‌های پاتوژن قارچی مانند *بوتریتیس*[1] و سفیدک پودری[2] می‌شود. چکیدن آب حاصل از چگالش از روی پوشش گلخانه، سطوح گیاه را خیس می‌کند و با پاشیدن روی خاک و بقایای گیاهی، عوامل بیماری‌زای گیاهی را از گیاهی به گیاه دیگر منتقل می‌کند. کلید مهار موفقیت آمیز بیماری‌ها، خشک نگهداشتن تاج پوشش گیاه به ویژه از غروب تا سحر است که از طریق شیوه‌های زراعی و راهبردهای کنترل محیطی قابل اجراست (گایر، ۲۰۲۲).

کمبود فشار بخار پایین یا رطوبت نسبی بالا می‌تواند باعث کمبود مواد معدنی، افزایش بیماری، تعریق و رشد نرم[3] شود. در شرایطی که کمبود فشار بخار خیلی کم است (<۰/۵۰ کیلوپاسکال) یعنی رطوبت و فشار بخار آب محیط بالاست، گیاهان نمی‌توانند به راحتی بخار آب را از روزنه‌های خود رها کنند (شکل ۳-۸-الف). در نتیجه، تعرق مختل می‌شود و مانند هنگامی که رطوبت کم است و گیاهان روزنه‌های خود را می‌بندند، جذب مواد مغذی و آب به درستی صورت نمی‌گیرد. این وضعیت می‌تواند منجر به کمبود مواد معدنی و به طور کلی کاهش رشد شود. این شرایط تعرق، سرعت فتوسنتز و در نتیجه به میزان قابل توجهی عملکرد محصول

1- *Botrytis*
2- Powdery Mildew
3- Soft growth

را کاهش می‌دهد. در واقع، در فرایند سوخت و ساز[1] مواد مغذی، گیاهان با تعرق کردن آب به هوا می‌توانند دوباره آب و مواد مغذی بیشتری جذب کنند (شکل ۳–۸–ب). اما زمانی که سطوح رطوبت نسبی بالا باشد، عملی شدن این کار برای گیاهان مشکل‌تر می‌شود.



شکل ۳–۸: اثر شرایط رطوبتی بالا و افزایش فشار بخار هوا بر (الف) تعرق و (ب) تعرق و متابولیزم مواد غذایی در گیاه (آرگِس، ۲۰۲٤)

رضوانی و همکاران (۱۳۹۸) یادآور شده‌اند دامنهٔ کمبود فشار بخار که پاتوژن‌های قارچی[2] در آن دوام می‌آورند، در محدوهٔ ۰/۲<VPD≤۰/۴۳ کیلوپاسکال است. کمبود فشار بخار

[1]- Metabolize (دِگرگشت شدن)

[2]- Fungal pathogens

کمتر از حد پایینی (≤۰/۲ kPa) سبب کمبود کلسیم[1] در برگ‌ها، کاهش سطح برگ، رشد بیماری‌های قارچی و آسیب رساندن به عملکرد کمی و کیفی محصول می‌شود (رضوانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ گرند و هند، ۱۹۸۷؛ پرنگر و لینگ، ۲۰۰۱؛ پونس و همکاران، ۲۰۱۵؛ شمشیری و همکاران، ۲۰۱۸). در شرایط محیطی با رطوبت بالا، توانایی گیاه برای خنک کردن خود یا انتقال مواد مغذی و مواد معدنی می‌تواند محدود شود. کمبود فشار بخار پایین منجر به تعرق کم می‌شود و جابه‌جایی مواد معدنی را هنگام حرکت از طریق آوند چوبی گیاه محدود می‌کند. در این شرایط، گیاهان توان تبخیر آب کافی برای انتقال مواد معدنی (کلسیم) به سلول‌های گیاهی در حال رشد را ندارند، حتی اگر روزنه‌ها کاملاً باز باشند. رطوبت زیاد شب بر مواد مغذی اصلی گیاه گوجه‌فرنگی مانند مقدار کلسیم در برگ‌های جوان‌تر این گیاه (شکل ۳-۹-الف و ۳-۹-ب) تأثیر می‌گذارد (چوی و همکاران، ۱۹۹۷). در شکل (شکل ۳-۹-پ) کمبود کلسیم در فلفل دلمه‌ای نشان داده شده است (بری[2]، ۲۰۲۲).

رطوبت متوسط (۷۵-۵۵ درصد) به افزایش سرعت جذب خالص گیاهان کمک خواهد کرد، دلیل آن افزایش هدایت روزنه‌ای است که فرآیندهای تبادل بخار آب (تعرق) و

[1]- Calcium deficiency
[2]- Bray

دی‌اکسیدکربن (فتوسنتز) بین گیاهان و هوا را تسهیل می‌کند. رطوبت بالا (۹۵–۷۵ درصد) در کنار اثرهای مفید مانند افزایش سطح برگ‌ها، می‌تواند تأثیرات نامطلوبی نیز بر گلدهی، تشکیل میوه و رشد میوه محصولاتی مانند فلفل داشته باشد. برای گرده افشانی گوجه‌فرنگی، رطوبت نسبی بهینه بین ۵۰ تا ۷۰ درصد است ولی مقادیر بالای رطوبت نسبی نزدیک به ۹۰ درصد می‌تواند دوام گرده گل را به دلیل تنش حرارتی کاهش دهد (دنیزی[1]، ۲۰۲۳). رطوبت نسبی پایین و بالا می‌تواند باعث ریزش گل در فلفل شود.

در گوجه‌فرنگی، رطوبت بالا باعث می‌شود تا گرده‌ها کلوخه‌ای شوند و نتوانند مادگی را بارور کنند (اُگر، ۲۰۲۰).

در کمبود فشار بخار بسیار کم، آب ممکن است روی برگ‌ها، میوه‌ها و دیگر بخش‌های گیاه متراکم شود و بستری برای رشد قارچ‌ها و بیماری‌ها فراهم کند. هنگامی که رطوبت در هوا به قدری افزایش یابد که روی پوشش داخلی سقف متراکم شود و چکه کند، آب چکیده شده روی برگ‌های گیاه آلوده می‌تواند پس از پاشش مجدد روی دیگر گیاهان، آنها را نیز آلوده کند و قارچ‌ها و بیماری‌ها با سرعت بسیار بالاتری گسترش یابند (شکل ۳–۱۰).

[1]- Danesi

بیماری‌های قارچی مانند بوتریتیس محیط‌های مرطوب را دوست دارند و به دلیل مرطوب بودن محیط گلخانه‌ها، معمولاً در آنها یافت می‌شوند (شکل ۳-۱۱).

محیط‌های مرطوب می‌توانند زمینه‌ای برای رشد کپک پودری (سفیدک پودری) باشند (شکل ۳-۱۲) که اگر توجه کافی نشود ممکن است در سطح گلخانه گسترش یابد و باعث پوسیدگی میوه و از بین رفتن محصول شود (ویلیامز، ۲۰۱۷).

شکل ۳-۹: کمبود کلسیم در (الف) برگ‌های گوجه‌فرنگی (تی‌ناو اَگریتک[1])، (ب) میوه گوجه‌فرنگی (پَسام[2] و همکاران، ۲۰۰۷)، (پ) میوه فلفل (بری، ۲۰۲۲)

[1]- Tnau agritech
[2]- Passam

شکل ۳-۱۰: چکیدن آب از پوشش داخلی سقف روی گیاهان (عکس از نگارندگان)

شکل ۳-۱۱: بیماری کپک خاکستری در اثر قارچ *بوتریتیس*: الف) عفونت ساقه در گیاه گوجه‌فرنگی. ب) گیاه گوجه‌فرنگی آلوده به بوتریتیس شدید (روگالسکا و دِ راگلودری[1]، ۲۰۲۳).

[1]- Rogalska and De Rauglaudre

شکل ۳-۱۲: نشانه‌های بیماری قارچی سفیدک پودری در: فلفل (الف)، گوجه‌فرنگی (ب)و خیار (پ) (اینترنت)

بیماری سفیدک پودری یکی از خطرناک‌ترین بیماری‌هایی است که محصول توت فرنگی (شکل ۳-۱۳-الف و ب) را در مرحله میانی رشد (رشد رویشی) تحت تاثیر قرار می‌دهد (شیائو[1] و همکاران، ۲۰۲۰؛ جرادات[2] و همکاران، ۲۰۲۳). از دیگر بیماری‌های قارچی در توت فرنگی کپک خاکستری[3] (شکل ۳-۱۳-پ و ت) است که در رطوبت نسبی بالای ۸۰ درصد گل‌ها و میوه‌های این محصول را تحت تاثیر قرار می‌دهد (پتراش[4] و همکاران، ۲۰۱۹؛ شیائو و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، حفظ رطوبت نسبی در ۶۰ تا ۷۵ درصد برای جلوگیری از رشد بیماری، که بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد، ضرورت دارد.

[1]- Xiao
[2]- Jaradat
[3]- Gray mold
[4]- Petrasch

شکل ۳-۱۳: سفیدک پودری (الف و ب) و کپک خاکستری (پ و ت) در توت فرنگی (شیائو و همکاران، ۲۰۲۰)

در محصولات با ارزش برگی تجاری مانند کاهو و گیاهان زینتی، افزایش رطوبت بیش از حد ممکن است منجر به کاهش تولید، کیفیت و ارزش تجاری شود (گایر، ۲۰۲۲).
آب‌های راکد در نقاط مختلف گلخانه می‌توانند منجر به رشد جلبک‌ها شوند و به محلی برای پرورش حشرات درآیند (شکل ۳-۱۴). در شرایط اقلیمی که سطح رطوبت بالاست، تراکم بخار روی پوشش گلخانه افزایش می‌یابد (شکل ۳-۱۵) و باعث کاهش انتقال تابش تا ۲۳ درصد از مواد پوششی می‌شود (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). قطره‌های آب و رطوبت بیش از حد موجود در هوا باعث بازتاب نور می‌شوند که کاهش میزان نور را در گلخانه در پی دارد.

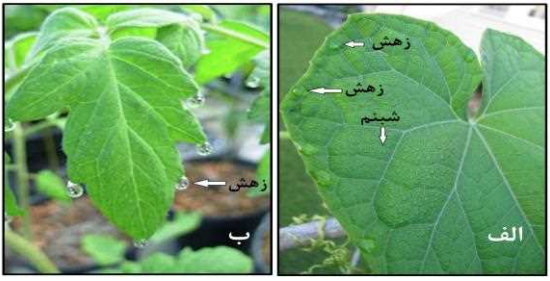
شکل ۳-۱٤: آب راکد و رشد جلبک، قارچ و علف هرز در کف گلخانه (عکس از نگارندگان)

شکل ۳-۱۵: تراکم آب روی پوشش و کاهش ورود نور به‌داخل گلخانه (عکس از نگارندگان)

برای مقابله با آفات و بیماری‌ها، اغلب نیاز به سمپاشی است که این موضوع به نوبهٔ خود رطوبت محیط را افزایش می‌دهد و کمبود فشار بخار بهینه را به هم می‌زند.

از دیگر عوارض کمبود فشار بخار به شدت پایین و در نتیجه مختل شدن تعرق، فشاری است که به دلیل نبود تعرق و خارج نشدن آب از گیاه در داخل آن ایجاد می‌شود. این فشار در ترکیب با ناحیهٔ ریشه مرطوب می‌تواند منجر به تعریق یا زهش[1] شود و آن زمانی است که از منافذ گیاهی[2] آب ترشح می‌شود (گیاه از سلول‌های برگ خود آب تراوش می‌کند) (شکل۳-۱۶). قرار گرفتن طولانی مدت گیاهان خیار (شکل ۳-۱۶-الف) و گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای (شکل ۳-۱۶-ب) در معرض رطوبت بالا بر اثر فشار ریشه باعث زهش (تعریق) در برگ می‌شود (چوی و همکاران، ۱۹۹۷). هنگامی که گیاهان قادر به تبخیر آب نباشند، فشار آماس بیش از حد در سلول‌ها می‌تواند باعث شکافتن و ترک خوردن میوه‌ها (برای نمونه، گوجه فرنگی) شود (شکل ۳-۱۷) (ویتالی[3]، ۲۰۱۹).

[1]- Guttation
[2]- Pant pores
[3]- Vitaly



شکل ۳-۱۶: زهش (تعریق) در برگ‌های خیار (الف) (هیل[1]، ۲۰۲۲)، گوجه‌فرنگی (ب) (استارباک[2]، ۲۰۰۹)

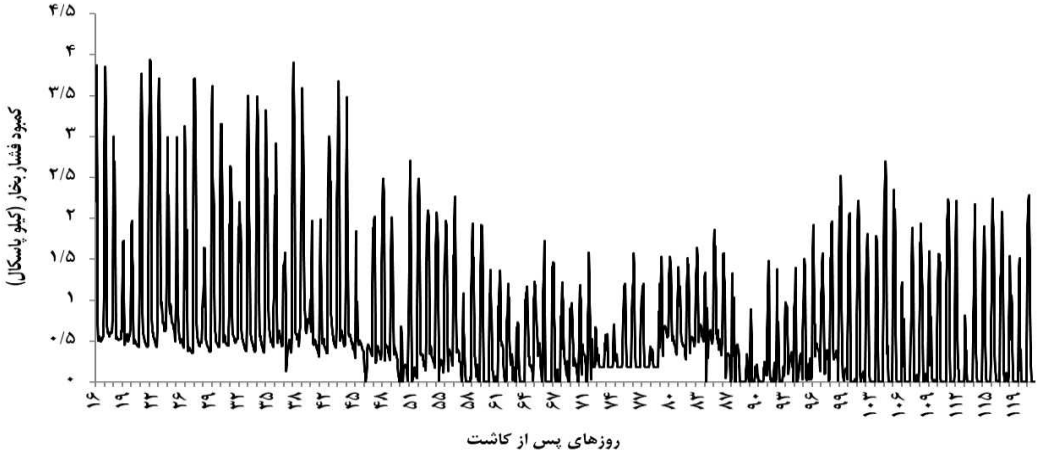
شکل ۳-۱۷: فشار آماس بیش از حد و شکافتن و ترک خوردن میوه‌های گوجه فرنگی (ویتالی ، ۲۰۱۹)

نوسان‌های کمبود فشار بخار

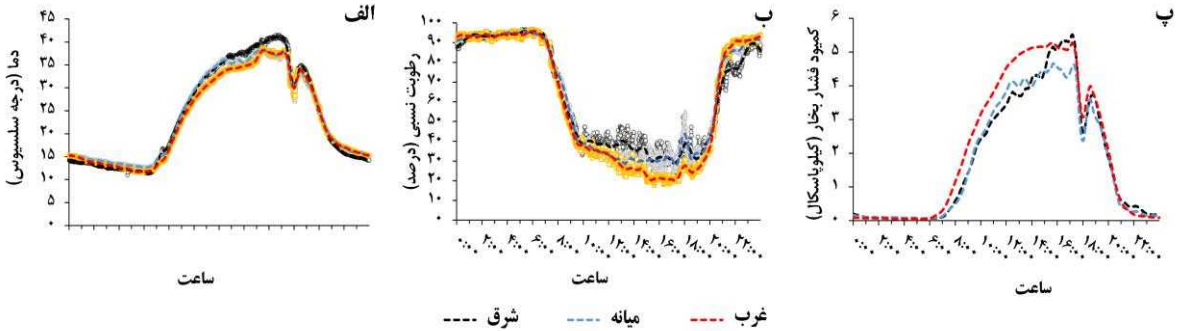
کمبود فشار بخار بستگی دارد به دما و رطوبت نسبی هوا. برای کنترل اقلیم گلخانه‌ها انواع سامانه‌های گرمایشی، سرمایشی تبخیری، تهویهٔ طبیعی و مکانیکی در موقعیت‌ها و شکل‌های مختلف استفاده می‌شوند (اینوای[3] و همکاران،

[1]- Hill
[2]- Starbuck
[3]- Inoue

۲۰۲۱). کنترل اغلب این تجهیزات با روشن/ خاموش کردن صورت می‌گیرد که باعث نوسان در رطوبت هوا می‌شود. بنابراین، در محیط‌های گلخانه‌ای نوسان‌های کمبود فشار بخار در سراسر دورهٔ کشت مشاهده می‌شود (شکل ۳-۱۸). علاوه‌بر این، دمای گلخانه‌ها اغلب از ۳۰ درجه سلسیوس در فصل گرم سال تجاوز می‌کند و در برخی موارد به بالای ۴۰ درجه سلسیوس می‌رسد و نوسان‌های رطوبت نسبی دامنه‌ای بین ۲۰ درصد در روز تا ۹۵ درصد در شب دارد (شکل ۳-۱۹). گلخانه‌داران باید در این مدت دریچه‌های تهویه را باز کنند تا دمای داخل گلخانه کاهش یابد. تبادل هوا بین بیرون و داخل گلخانه به دلیل رطوبت کم هوا در فصل‌های گرم، کمبود فشار بخار را افزایش می‌دهد. بنابراین، مقدار کمبود فشار بخار به شدت تحت تاثیر روشن/ خاموش کردن سامانه‌های سرمایش تبخیری و باز/ بستن دریچه‌های تهویه قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۸: نوسان‌های کمبود فشار بخار در گلخانه در دورهٔ کشت (رضوانی و همکاران، ۱۴۰۱)



شکل ۳-۱۹: نمودار دما (الف)، رطوبت نسبی (ب)، کمبود فشار بخار (پ) در امتداد محور مرکزی عرضی یک گلخانه در تاریخ ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ (رضوانی، ۱۳۹۹)

در هر دو سامانه مه‌پاشی و فن و پد، مقدار کمبود فشار بخار در گلخانه‌ها معمولاً توسط نقاط تنظیم[1] برای کمبود فشار بخار کنترل می‌شود. از آنجا که نقاط تنظیم معمولاً آستانه‌های کمبود فشار بخار پایین و بالایی (حداقلی و حداکثری) هستند، کنترل کمبود فشار بخار در گلخانه بر اساس تنظیم روشن/خاموش است. کنترل کمبود فشار بخار در کشت گلخانه‌ای مهم است، اما تغییرات زیاد روزانه و فصلی در کمبود فشار بخار و تابش خورشیدی تأثیرات قابل توجهی بر هدایت روزنه‌ای، سرعت جذب دی‌اکسیدکربن و رشد گیاه می‌گذارد. اثر کمبود فشار بخار بر فتوسنتز و رشد گیاه بستگی دارد به میزان نوسان‌ها و قدر مطلق کمبود فشار بخار و نیز دیگر شرایط محیطی، از جمله شدت نور، غلظت دی‌اکسیدکربن و سرعت باد. تنظیم دقیق کمبود فشار بخار در گلخانه‌ها برای کنترل پایدار محیطی می‌تواند توسعهٔ برگ، هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز بالاتر را در سراسر روز حفظ کند، که منجر به رشد بهتر و عملکرد بالاتر با ارزش غذایی بالای محصول در گلخانه‌ها می‌شود (اینوای و همکاران، ۲۰۲۱). پیش از این نیز گفته شد نوسان‌های مکرر کمبود فشار بخار بیشتر از ۰/۴ کیلوپاسکال می‌تواند عملکرد را تا ۲۰ درصد کاهش دهد (کووردا، ۲۰۲۰). در مواردی که کمبود فشار بخار به طور متناوب بین خیلی زیاد و خیلی کم تغییر می‌کند،

[1] - Set point

کیفیت میوه می‌تواند تحت تأثیر ترک‌های کوچک در پوست میوه قرار گیرد، زیرا فشار آماس به طور متناوب سلول‌های پر از آب در میوه را منبسط و منقبض می‌کند (پسل اینسترومنت، ۲۰۲۲). نتایج یک بررسی روی کاهو نشان داد نوسان کمبود فشار بخار رشد محصول را به تاخیر می‌اندازد و ممکن است بر فرآیندهای اساسی کیفیت پس از برداشت در کاهو تأثیر بگذارد. بنابراین، برای به حداقل رساندن نوسان‌ها، کمبود فشار بخار در گلخانه باید نه با تنظیم متناوب بلکه با تنظیم مداوم کنترل شود (اینوایِ و همکاران، ۲۰۲۱).

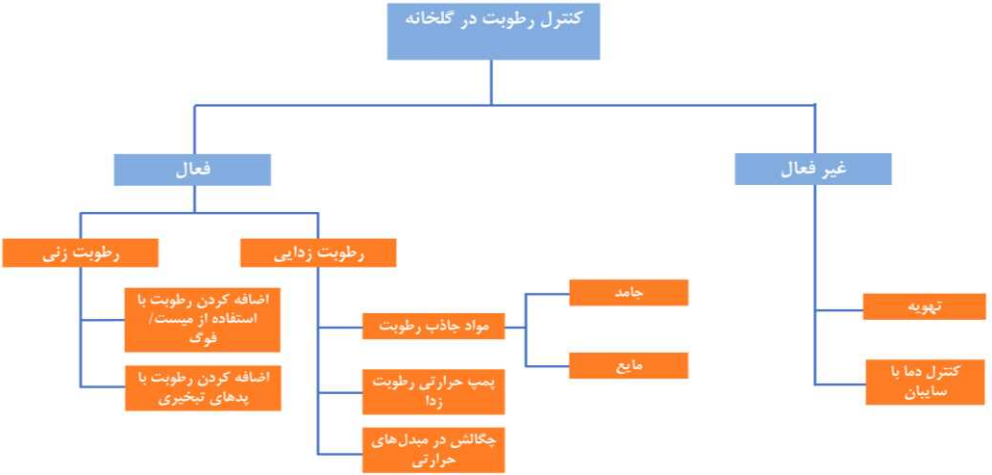
فصل چهارم
کنترل رطوبت در گلخانه

تنظیم رطوبت، سخت‌ترین عامل محیطی برای کنترل از نظر گرمایش/ سرمایش گلخانه و نیز تجهیزات مربوط است. این مشکل با استفاده از تجهیزات صرفه‌جویی در انرژی برای کشت‌های حفاظت شده، از جمله پرده‌های دو منظورۀ ذخیرۀ انرژی و سایه‌انداز، عایق‌کاری و کاهش تبادل هوا، که همگی با افزایش رطوبت مرتبط هستند، تشدید می‌شود. برای نمونه در مطالعه‌ای نشان داده شد استفاده از سایبان دمای داخل گلخانه را تا ۱۰ درجه سلسیوس کاهش و رطوبت نسبی را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. در واقع استفاده از سایبان میزان رطوبت هوا را تغییر نمی‌دهد، اما از طریق کاهش دما بر ظرفیت نگهداری رطوبت آن تأثیر می‌گذارد (رابای و همکاران، ۲۰۱۹).

تبخیر و تعرق گیاهان نیز نقش مهمی در تعیین مقدار رطوبت هوای داخل گلخانه دارد و بستگی خواهد داشت به نوع گیاه، سطح کل برگ‌ها و سطح تابش. گیاهان با تبخیر و تعرق به طور پیوسته رطوبت را در فضای گلخانه آزاد می‌کنند که

برای حفظ سطح رطوبت نسبی، این رطوبت اضافی باید حذف شود (رابای و همکاران، ۲۰۱۹).

روش‌های کنترل رطوبت در گلخانه‌ها را می‌توان به صورت فعال یا غیرفعال طبقه‌بندی کرد (شکل ۴-۱).



شکل ٤-١: روش‌های کنترل رطوبت در گلخانه‌ها (رابای و همکاران، ۲۰۱۹)

سه راهبرد استاندارد رطوبت‌زدایی در گلخانه‌ها عبارت‌اند از: (۱) تبادل هوای مرطوب داخل گلخانه با هوای خشک بیرون (تهویه)، (۲) چگالش روی سطح سرد و (۳) استفاده از مواد جاذب رطوبت برای جذب رطوبت (رابای و همکاران، ۲۰۱۹). تهویه می‌تواند کنترل نشده (طبیعی) یا کنترل شده (اجباری) باشد، و در مورد دوم می‌تواند با مبدل حرارتی کنترل شود و گرمای محسوس هوای تهویه شده را بازیابی کند (کمپکس[1] و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از مزایای متراکم کردن رطوبت داخل گلخانه، انتشار گرمای نهان میعان است که می‌تواند انرژی مورد نیاز برای گرمایش را کاهش دهد. با این حال، برای گلخانه‌هایی که نیاز به خنک‌سازی دارند، گرمای نهان مرتبط با تراکم باید به طور مداوم حذف شود (رابای و همکاران، ۲۰۱۹).

برای کنترل رطوبت در گلخانه موارد زیر را باید در نظر گرفت (راست[2]، ۲۰۲۳):

۱- تجهیزات پایش: استفاده از دماسنج و رطوبت‌سنج برای پایش دما و رطوبت و محاسبه کمبود فشار بخار بسیار مهم است.

۲- تجهیزات کنترل شرایط اقلیمی: با استفاده از سامانه‌های گرمایشی، تهویه، تهویهٔ مطبوع، رطوبت‌زدایی و رطوبت‌زنی،

[1]- Kempkes
[2]- Rust

گلخانه‌داران می‌توانند شرایط اقلیمی داخل گلخانه را برای حفظ کمبود فشار بخار مورد نظر تنظیم کنند.

۳- تنظیم برای مراحل رشد: مقادیر بهینه کمبود فشار بخار ممکن است با رشد گیاهان تغییر کند. نشاها و قلمه‌ها به طور کلی به کمبود فشار بخار کمتر (رطوبت بیشتر) و گیاهان گلدار ممکن است به کمبود فشار بخار بالاتر (رطوبت کمتر) نیاز داشته باشند.

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها: تجزیه و تحلیل منظم داده‌های محیطی به تصمیم‌گیری آگاهانه در زمینهٔ تنظیم دما و رطوبت برای کمبود فشار بخار بهینه کمک می‌کند.

رطوبت‌زدایی[1]

در گلخانه باید از افزایش مقادیر رطوبت در دمای نزدیک به نقطهٔ شبنم دوری شود زیرا متراکم شدن آب آزاد روی سطوح گیاه می‌تواند باعث رشد ارگانیسم‌های بیماری‌زا شود. وقتی رطوبت نسبی به ۹۰ درصد می‌رسد، با یک افت جزئی دما، دما به نقطهٔ شبنم خواهد رسید. با توجه به اینکه همه سطوح گلخانه لزوماً در دمای یکسان با هوا نیستند، در رطوبت نسبی بالا بخار آب روی هر سطحی که سردتر از هوا باشد متراکم می‌شود. به همین دلیل است که در فصلی که گرمایش انجام می‌شود، مشکل چکه کردن قطره‌های آب از پوشش گلخانه رخ می‌دهد. با وجود نظارت بر رطوبت نسبی هوای گلخانه و

[1]- Dehumidification

سعی در کنترل آن، همیشه امکان وقوع نقطهٔ شبنم وجود دارد. مشکلات تراکم موضعی می‌تواند به دلیل توزیع نامتقارن (غیر یکنواخت) حرارت و ذخیرهٔ حرارتی[1] مواد گیاهی، به ویژه در گیاهان دارای میوه رخ دهد. این باعث می‌شود دمای سطح گیاه در زمان وقوع تغییرات ناگهانی از دمای هوا عقب بماند. هوای اطراف سطوح سرد داخل گلخانه بلافاصله خنک می‌شوند و اگر به دمای نقطهٔ شبنم برسند، تراکم آب رخ می‌دهد (وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵).

رطوبت بیش از حد، معمولاً در فصل‌های بهار و پاییز که هوا خنک و مرطوب است مشکل‌سازتر است. راهبرد مرسوم مورد استفاده برای کاهش رطوبت گلخانه شامل موارد زیر است:

- تهویه برای تبادل هوای مرطوب گلخانه با هوای خشک‌تر بیرونی.
- حرارت دادن برای کاهش سطح رطوبت نسبی، افزایش دمای سطوح گیاهی و گرم کردن هوای ورودی.

پوشش و دیگر سطوح سرد گلخانه، در زمانی که هوای بیرون سردتر است، به عنوان رطوبت‌گیر طبیعی عمل می‌کنند. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در تشکیل قطره‌های آب و چکیدن آنها شود (وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵).

[1]- Thermal mass

برای جلوگیری از مشکلات چگالش روی محصول، اجرای مراحل زیر توصیه می‌شود (وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵):

الف) حسگرهای دما و رطوبت دقیق باشند و در پوشش گیاهی محصول قرار بگیرند. حسگرهای دما به طور مرتب با دماسنج دقیق کنترل شوند. حسگرهای مختلف رطوبت در یک محل بررسی شوند که آیا خوانش‌های یکسانی دارند یا خیر؟ رطوبت نسبی را می‌توان با دماسنج خشک و تر بررسی کرد.

ب) از پرده‌های محافظ انرژی در شب برای جلوگیری از اتلاف حرارت تشعشعی از سطوح گیاهی استفاده شود.

پ) با برنامه‌ریزی افزایش تدریجی دما قبل از طلوع و دورهٔ رطوبت‌زدایی، از افزایش ناگهانی دما در هنگام طلوع خورشید جلوگیری شود. به همین صورت افت ناگهانی دما می‌تواند باعث ایجاد مشکلات تراکم به‌ویژه هنگامی شود که پوشش سرد است زیرا ظرفیت هوا برای نگهداری آب کاهش می‌یابد. با این حال، در این حالت، تاخیر حرارتی باید حداقل به طور موقت از تراکم آب در سطوح گیاه جلوگیری کند.

ت) از فن‌های جریان هوای افقی[1] یا لوله‌های پلی‌اتیلن سوراخ‌دار برای حفظ دمای یکنواخت در کل محصول استفاده شود.

[1]- Horizontal Air Flow (HAF) fan; Circulation Fan

– از ترکیب تهویه و گرمایش برای کاهش رطوبت بیش از حد استفاده شود.
– رطوبت‌زدایی در رطوبت نسبی حدود ۸۵ درصد شروع شود.

سطوح رطوبت نسبی بالای ۸۵ درصد بدون افزایش خطر میعان و تداخل در جذب مواد مغذی به دلیل کاهش تعرق به راحتی قابل مدیریت کردن نیست.

مرطوب سازی

رطوبت‌زدایی گاهی گران است، اما معمولاً کاهش سطح رطوبت آسان‌تر از افزایش آن است. افزایش سطح رطوبت بدون ایجاد آب آزاد بیش از حد، نیاز به یک دستگاه تبخیری مانند مه‌ساز[1]، مه‌پاش[2]*، آبپاش سقفی، یا توری‌هایی دارد که به حفظ آبی که از پوشش گیاهی تبخیر می‌شود کمک می‌کنند. خنک‌کنندهٔ تبخیری و سایبان اغلب با هم استفاده می‌شوند. خنک‌کننده‌های تبخیری سه کار به‌عهده دارند. ابتدا هوا را خنک می‌کنند و در نتیجه رطوبت را افزایش و تنش را بر محصول کاهش می‌دهند. دوم، بخار آب را به هوا اضافه می‌کنند که باعث افزایش بیشتر رطوبت نسبی می‌شود. و سوم، کمبود فشار بخار را کاهش می‌دهند. اندازهٔ

[1]- Mister
[2]- Fogger
* – ذرات مه‌پاش معمولاً کمتر از ۵۰ میکرون قطر دارند. در سامانه‌های مه‌پاش گلخانه‌ای با فشار بالا اندازه ذرات معمولاً حدود ۱۰ میکرون است. ذرات مه‌ساز ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون هستند.

سامانه‌ها باید به گونه‌ای باشد که در صورت کار کردن هم‌زمان با محصول در حال تعرق، کمبود فشار بخار بیش از هفت گرم در مترمکعب نباشد (وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵).

نکاتی که در مورد رطوبت‌زنی باید رعایت کرد به‌شرح زیر هستند (وزارت کشاورزی بریتیش کلمبیا، ۲۰۱۵) :

- گیاهان مرطوب کننده/ خنک‌کنندهٔ اولیهٔ هوای گلخانه هستند. در روزهای گرم آبیاری کافی برای تامین نیازهای تبخیر و تعرق گیاه صورت گیرد.

- گلخانه‌های کف‌سازی شده (بتونی، سیمانی، کفپوش) خشک‌تر هستند زیرا از تبخیر از خاک جلوگیری می‌شود.

- مدیریت کردن سطوح گرما و رطوبت در گلخانه‌های بلندتر، به دلیل حجم بیشتر هوا، آسان‌تر است.

- در صورت خیس شدن کف یا شاخ و برگ، رطوبت‌زنی در اواخر بعد از ظهر یا اوایل عصر متوقف شود تا زمان کافی برای خشک شدن وجود داشته باشد.

- خنک‌کنندگی تبخیری بستگی دارد به مقدار کل آبی که می‌تواند تبخیر شود. بنابراین، سامانه‌های سرمایش تبخیری باید با در نظر گرفتن نیازهای خروجی آب مهندسی شوند.

- دستگاه‌های سرمایش تبخیری به سرعت تهویهٔ مناسب نیاز دارند. خنک‌سازی را فرآیند تبخیر به‌عهده دارد. بنابراین

هوای تازه باید به طور مداوم وارد گلخانه شود و هوای گرم و مرطوب از آن خارج گردد.

- حسگرهای دقیق برای تعیین دمای برگ و هوا و یک حسگر دقیق رطوبت نسبی برای اندازه‌گیری کمبود فشار بخار برگ مورد نیاز است.

سامانه‌های خنک‌سازی در گلخانه‌ها

دما و رطوبت نسبی در داخل گلخانه توسط فناوری‌های مختلف خنک‌سازی مانند تهویه، سامانه‌های خنک‌سازی خارجی[1] با استفاده از مبدل‌های حرارتی و سامانه‌های سرمایش تبخیری و مواد جاذب رطوبت[2] کنترل می‌شود. خنک‌سازی را می‌توان به دو دستهٔ اصلی "غیرفعال" و "فعال" طبقه‌بندی کرد. خنک‌سازی غیرفعال در گلخانه عمدتاً به رویکرد طراحی (شکل، مواد پوششی، دریچه‌ها، خنک‌سازی غیرفعال شبانه خاک[3]) برای کاهش دمای داخل گلخانه بدون مصرف آب یا نیروی اضافی اشاره دارد. خنک‌کنندهٔ فعال به کلیهٔ سامانه‌های خنک‌سازیی اطلاق می‌شود که از تجهیزات الکتریکی مانند پمپ، فن و پمپ‌های حرارتی استفاده می‌کنند. ادغام تکنیک‌های خنک‌سازی غیرفعال و به دنبال آن خنک‌سازی فعال می‌تواند به طور

1- External cooling systems
2- Desiccant
3- Passive night cooling of the soil

هم‌زمان شرایط کافی را برای رشد محصول و کاهش مصرف انرژی تضمین کند (سوسی[1] و همکاران، ۲۰۲۲).

خنک‌سازی به‌روش غیرفعال

برخی از ویژگی‌های طراحی مانند شکل و هندسهٔ گلخانه، موقعیت و جهت آن، مواد پوششی و جانمایی دریچه‌های گلخانه بر کاهش نیازهای خنک‌سازی بسیار موثرند. مستقل از مکان در نظر گرفته شده، شکل تونلی[2] با مقادیر حداقلی دما و تشعشع خورشیدی مطابقت دارد، برخلاف آن شکل دهانه نامتقارن[3]، حداکثر جذب خورشیدی و حرارت بالا را امکان‌پذیر می‌کند (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). پوشش گلخانه‌ها در مناطق گرم و خشک از شیشه، فایبرگلاس، پلی‌اتیلن و پلی‌کربنات است که ضریب گذر تابش نوری مختلف دارند. سایه‌اندازی[4] و انعکاس[5] مفاهیم اساسی در کاهش و اجتناب از تابش شدید خورشیدی هستند و بنابراین نیازهای خنک‌سازی را کاهش می‌دهند (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲).

1- Soussi
2- Quonset
3- Uneven-span
4- Shading
5- Reflection

کنترل دما با سایبان

از روش‌های سایه‌اندازی متعددی مانند سایبان سقف[1]، سایبان سقفی خارجی[2] و توری‌های سایه‌انداز[3] استفاده می‌شود. سایبان خارجی در کنترل تابش موثرتر از قرار دادن سایبان زیر سقف و دیوارهای جانبی است. برای اقلیم‌های گرم، سقف‌های رنگ شدهٔ سفید که متناوباً با توری‌های سایبان سیاه رنگ خارجی یا آلومینیمی داخلی ترکیب می‌شوند، می‌توانند سایه‌اندازی لازم را داشته باشند. رنگ آمیزی[4] یا پاشیدن[5] رنگ روی پوشش گلخانه با رنگ سفید، که "مل‌پاشی[6]" شناخته می‌شود، روش معمول سایه‌اندازی برای تنظیم اقلیم گلخانه در مناطق گرم و خشک و حتی در مناطق سرد با دوره‌های گرمای شدید است. در شروع فصل گرما، رنگ آمیزی با پاشیدن آهک یا رنگ سفید روی سطح خارجی گلخانه با پوشش شیشه‌ای یا پلاستیکی یک سطح کلی سایه را فراهم می‌کند. بنابراین، مل‌پاشی یک روش سایه‌اندازی غیرفعال و کم‌هزینه است که دمای داخلی، کمبود فشار بخار و نور ورودی را کاهش می‌دهد. در نتیجه به دلیل اینکه در سراسر دوره‌های گرما، گرمای بیش از حد

1- Roof shading
2- External shading
3- Shading Nets
4- Painting
5- Spraying
6- Whitewashing

مشکلی است تنش‌زاتر، به حداقل رسیدن فتوسنتز پذیرفته می‌شود. مواد پوششی خاص یعنی فیلم‌های پلاستیکی رنگی یا فیلتر کننده پرتو فروسرخ نزدیک[1] می‌توانند اثر سایه‌–اندازی/بازتابی مناسبی را فراهم کنند. انتخاب مواد پوششی مناسب بر اساس میزان گذر تابش و نوع محصول خواهد بود. حداقل قابلیت انتقال نور مواد پوششی حدود ۰/۷ است. ضخامت مواد پوششی نیز بین ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر برای پلی‌اتیلن تثبیت شده با پرتو فرابنفش[2]، بین ۶ تا ۱۰ میلی‌متر برای ورق‌های پلی‌کربنات[3] و ۴ میلی‌متر برای شیشه است. فیلم‌های فیلتر کننده پرتو فروسرخ نزدیک برای اقلیم‌های نامساعد توصیه می‌شوند زیرا پرتو فروسرخ نزدیک را بدون تأثیر بر فتوسنتز محصول یا رشد گیاه بازتاب می‌دهند. در نتیجه دمای هوای داخل گلخانه تا ۵ درجه سلسیوس و انرژی مورد نیاز برای سرمایش ۸ درصد کاهش می‌یابد. با این حال، استفاده از بازتابنده‌های متحرک پرتو فروسرخ نزدیک در سراسر زمستان برای جلوگیری از افزایش نیازهای گرمایشی توصیه می‌شود. به‌کارگیری استراتژی‌های سرمایش غیرفعال در مرحلهٔ طراحی گلخانه به گلخانه‌داران کمک می‌کند تا نیازهای سرمایش را کاهش دهند و شرایط

[1]- Near infrared radiation (NIR)
[2]- Ultraviolet (UV)
[3]- Polycarbonate sheets

عملیاتی مناسب‌تری را برای سامانه‌های خنک‌سازی فعال فراهم آورد (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲).

تهویه

برای حفظ شرایط بهینهٔ رشد، هوای گرم و مرطوب داخل گلخانه باید با هوای خنک‌تر و خشک‌تر بیرون جایگزین شود (شلفرد و بوث[1]، ۲۰۲۰). به این تبادل هوا بین هوای داخل و خارج گلخانه تهویه گویند (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). حرکت هوا در هنگام تهویه با تاثیر بر یکنواختی عوامل اقلیمی گلخانه بر رشد و کیفیت محصولات تأثیر می‌گذارد (ساسه[2] و همکاران، ۲۰۰۶). تهویه در گلخانه ضمن تنظیم دما و رطوبت گلخانه، به افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن مورد نیاز برای فتوسنتز گیاهان نیز کمک می‌کند. در گلخانه‌ها از تهویهٔ طبیعی یا مکانیکی برای این کار استفاده می‌کنند (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰). تهویهٔ طبیعی عمدتاً از طریق باز شدن دریچه‌های واقع در سقف یا دیوارهٔ جانبی گلخانه‌ها و بدون احتیاج به مصرف انرژی پیش می‌رود. از این‌رو، تهویهٔ طبیعی ساده‌ترین و با صرفه‌ترین روش تهویه برای کنترل رطوبت و دماست (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲).

معیارهای مهم برای سامانه‌های تهویه عبارت‌اند از میزان تهویه، اختلاف دمای داخل و خارج، همگنی توزیع دما در

[1]- Shelford and Both
[2]- Sase

داخل گلخانه، سرعت هوا نزدیک و داخل پوشش گیاهی (فون زابلتیتز[1]، ۲۰۱۱).

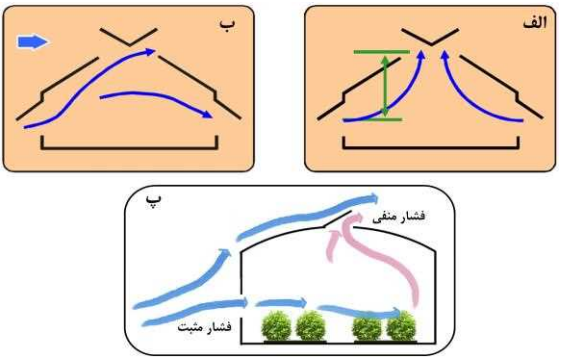
تهویه طبیعی

اختلاف فشار فیزیکی برای تبادل آزاد هوا و حرکت هوا در تهویهٔ طبیعی لازم است. در تهویهٔ طبیعی اختلاف فشار ناشی از:

-اختلاف دما و رطوبت داخل و خارج گلخانه (اثر دودکش[2] یا شناوری ناشی از گرما[3])

- تأثیر باد بر سطوح مختلف گلخانه (اثر باد[4])

موثر هستند (شکل ۲-۴).



شکل ٤-۲: اثر دودکش یا شناوری (الف) ؛ اثر باد (ب) ؛ تهویهٔ طبیعی ناشی از اختلاف فشار داخل و خارج گلخانه (پ) (ساسه، ۲۰۱۲؛ گولم[5] و همکاران، ۲۰۱۹)

[1]- von Zabeltitz
[2]- Chimney effect
[3]- Thermal buoyancy
[4]- Wind effect
[5]- Ghoulem

وزش باد نقش اصلی در تهویهٔ طبیعی دارد. در گلخانه‌ای با طراحی خوب، سرعت باد ۱/۳–۰/۹ متر بر ثانیه ۸۰ درصد یا بیشتر از تهویه را فراهم می‌کند (بارتاک[1]، ۲۰۱۳). باد در سرعت ۲/۰–۰/۵ متر بر ثانیه نیروی محرک اصلی برای تهویهٔ است اما اثر نیروی شناوری نیز قابل توجه است. اگر سرعت باد از ۲/۰–۱/۸ متر بر ثانیه بیشتر شود، نیروی باد بر نیروی شناوری ناشی از گرما غلبه می‌کند. آستانهٔ سرعت باد به تفاوت دمایی بین هوای داخل و خارج، هندسه گلخانه، موقعیت دریچه‌ها و ارتفاع دودکش معادل بستگی دارد (امانی[2] و همکاران، ۲۰۲۰). عبور باد از روی سقف باعث ایجاد خلأ و در نتیجه مکش می‌شود و بدین‌ترتیب هوای گرم شده را از دریچه خارج می‌کند. اگر دریچه‌های دیوارهٔ جانبی باز باشند، هوای جایگزین خنک وارد گلخانه می‌شود و تا سطح کف پایین می‌آید. اگر گلخانه دریچهٔ جانبی نداشته باشد یا دریچه‌ها بسته باشند، هوای خنک از پایین دریچه سقفی وارد و هوای گرم شده از بالای دریچه سقفی خارج می‌شود. منطقهٔ انتقال بین دو جریان هوای متحرک، حرکت هوا را کند می‌کند و خنک شدن را تا حدودی کاهش می‌دهد (بارتاک، ۲۰۱۳).

در اثر شناوری، اثر افزایش هوای گرم و مرطوب نیز به تهویه کمک می‌کند. هوای خنک سنگین در نزدیکی کف با گرم

[1]- Bartok
[2]- Amani

شدن سبک‌تر می‌شود و به سمت سقف بالا می‌رود. در روزهای خنک، اختلاف دمای زیاد باعث تبادل بسیار خوب هوا می‌شود. در روزهای گرم اختلاف دما می‌تواند تنها ۵ یا ۱۰ درجه سلسیوس باشد و اثر شناوری تقریباً وجود ندارد. گرایش به سمت گلخانه‌های بلندتر سبب شده هوای گرم بالاتر از گیاهان قرار گیرد. در این شرایط ، فن‌های جریان هوای افقی باید خاموش شوند تا از به‌هم خوردن لایهٔ هوای گرم و یکنواختی دما جلوگیری شود (بارتاک، ۲۰۱۳). در صورت استفاده از تهویهٔ طبیعی، اگر میانگین حداکثر دمای خارج از گلخانه ۲۷ درجه سلسیوس و عرض گلخانه بیش از ۱۸ متر باشد، استفاده از تهویهٔ سقفی ضروری است (فون زابلتیتز، ۲۰۱۱). حداکثر میزان تهویهٔ گلخانه زمانی حاصل می‌شود که از هر دو دریچهٔ کناری و سقفی استفاده شود. دریچه‌های جانبی به همراه دریچه‌های سقفی ۱/۲ تا ۶/۴ برابر کارآمدتر از دریچه‌های سقفی یا جانبی به تنهایی هستند (امانی و همکاران، ۲۰۲۰).

تهویهٔ کافی به نسبت سطح تهویه به مساحت گلخانه بستگی دارد. مطالعات نشان داده است در مناطق گرم نسبت سطح دریچه‌ها به مساحت گلخانه باید بر اساس شرایط محلی متفاوت باشد، برای مثال این نسبت در نیوزیلند و کشورهای واقع در حوزهٔ دریای مدیترانه ۳۰ درصد (هانان[1] ، ۱۹۹۸)، در

[1]- Hanan

استرالیا بیش از ۲۰ درصد، در هانوفر آلمان بیشتر از ۲۵–۱۵ درصد (سالوکی و تانتائو[1]، ۲۰۰۶)، در ایالات متحده آمریکا ۱۵–۲۵ و بخش‌های جنوبی اروپا ۳۳–۳۰ درصد (موسسه استانداردهای ملی آمریکا[2]، ۲۰۰۳)، در مناطق گرمسیری ۴۰ درصد، در مناطق گرمسیری و مرطوب ۶۰ درصد، و در اندونزی ۴۰/۴ درصد است (لی[3] و همکاران، ۲۰۱۸). در ایران نسبت کل سطح تهویه به سطح کف گلخانه ۲۵ درصد توصیه شده است (بی‌نام، ۱۳۹۱).

تهویهٔ اجباری

تهویهٔ اجباری توسط فن‌ها یا هواکش‌هایی فراهم می‌آید که برای حذف گرما و کنترل رطوبت نسبی به‌کار می‌روند (شکل ۳–۴). این تجهیزات معمولاً در روزهای تابستان در مناطق گرم برای رطوبت‌زدایی و خنک‌کردن گلخانه استفاده می‌شوند. تهویهٔ اجباری کنترل محیط داخلی را برای جلوگیری از گرمای بیش از حد در محیط‌های رشد گلخانه تضمین می‌کند و می‌تواند جایگزین دیگر سامانه‌های خنک–سازی متداول، برای مثال، سامانه‌های فن و پد شود، یا به کاهش مصرف انرژی آنها کمک کند (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). در محیط‌های گلخانه‌ای با رطوبت بالا، در شرایط خاصی نیاز به تهویهٔ اجباری است که با استفاده از فن‌های

[1]- Salokhe and Tantau
[2]- American National Standards Institute (ANSI)
[3]- Li

خروجی[1] عملی می‌شود (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). تهویهٔ مکانیکی به دریچه‌های ورودی، فن‌های خروجی و انرژی الکتریکی برای کارکرد فن‌ها نیاز دارد. در صورت طراحی مناسب، تهویهٔ مکانیکی می‌تواند خنک‌سازی و رطوبت‌زدایی کافی را در طیف گسترده‌ای از شرایط آب و هوایی در بسیاری از مناطق با اقلیم معتدل فراهم کند. مشخصات طراحی معمولی برای حداکثر ظرفیت تهویهٔ مکانیکی به ترتیب ۰/۰۵ یا ۰/۰۶ مترمکعب به ازای هر مترمربع از سطح زمین برای گلخانه‌ها با پردهٔ سایبان یا بدون آن است. هنگامی که موانع عمدی مانند توری‌های ضد حشرات و پد خنک کنندهٔ تبخیری در ورودی هوا وجود دارد، ابعاد ناحیه ورودی باید به دقت برآورد شود تا بر مقاومت افزایش یافته در برابر جریان هوا غلبه کند که منجر به کاهش میزان تبادل کل هوا نسبت به ورودی‌های کاملاً باز و بدون مانع می‌شود (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰).

شکل ٤-۳ : فن‌های خروجی در گلخانه (عکس از نگارندگان)

[1]- Exhaust fans

سرعت باد ایجاد شده توسط فن‌های خنک کننده یکی دیگر از عوامل اقلیمی در کنترل آفات و بیماری‌های گلخانه‌ای است. در گلخانهٔ خوب‌طراحی شده، سرعت باد فن‌های خنک کننده در محدودهٔ ۰/۹ تا ۱/۳ متر بر ثانیه است، اما ممکن است در بسیاری از عملیات گلخانه‌ای این سرعت بیشتر باشد. سرعت و تلاطم باد می‌تواند بر رهاسازی و پراکنش مایه تلقیح پاتوژن گیاهی تأثیر بگذارد. سرعت باد دو متر بر ثانیه روی تخمگذاری و رفتار استراحت انگلی زنبور *افیدیوس رزا*[1] تأثیر می‌گذارد. باد می‌تواند با رفتار استقرار و تخم‌گذاری پشه شته‌خوار *آفیدولتس آفیدیمیزا*[2] تداخل داشته باشد، از این رو تامین کنندگان تجاری اغلب توصیه می‌کنند که فن‌ها برای مدتی بعد از انتشار *آفیدولتس آفیدیمیزا* خاموش شوند (کرویدهف و المر، ۲۰۲۰).

رطوبت‌زنی

خنک‌کنندهٔ تبخیری

سامانه‌های خنک‌سازی تبخیری مبتنی هستند بر تبدیل گرمای محسوس به گرمای نهان با استفاده از تبخیر آب و معمولاً برای حفظ شرایط اقلیمی مناسب برای رشد محصولات در مناطق گرم و خشک استفاده می‌شوند (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). سرمایش تبخیری امکان کاهش

[1]- *Aphidius rosae*
[2]- *Aphidoletes aphidimyza*

هم‌زمان دما و کمبود فشار بخار را فراهم می‌کند و می‌تواند منجر به کاهش دمای هوای گلخانه نسبت به دمای هوای بیرون شود (کیتاس[1] و همکاران، ۲۰۱۳؛ رضوانی و همکاران، ۲۰۲۱). انواع مختلفی از سامانه‌های سرمایش تبخیری وجود دارد که برای خنک‌سازی گلخانه‌ها استفاده می‌شوند، مانند سامانه‌های فن و پد، سامانه‌های مه‌پاش و سامانه‌های خنک‌سازی تبخیری سقف. ادغام سامانهٔ سرمایش تبخیری با تهویه‌های طبیعی و اجباری، سایه‌اندازی و رطوبت‌زدایی، آب و هوای مطلوبی را برای عملکرد بهتر محصول فراهم می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که خنک‌کننده تبخیری همراه با تجهیزات تهویه (فن‌ها، دریچه‌های سقفی) برای کنترل شرایط اقلیمی گلخانه در اقلیم گرم کارآمدتر است (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲).

استفاده از مه‌پاش پرفشار

سامانه مه‌پاش (شکل ۴-۴) معمولاً در گلخانه‌هایی با سامانه تهویهٔ طبیعی استفاده می‌شود زیرا تهویهٔ طبیعی نیروی لازم را برای غلبه بر مقاومت اضافی ناشی از پد خنک کنندهٔ تبخیری در برابر جریان هوا ندارد (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰).

[1]- Kittas

شکل ٤-٤ : سامانهٔ مه‌پاش در گلخانه
(سعیدی راد و همکاران، ۱۳۹۹)

سامانه‌های مه‌پاش فرآیند خنک‌کننده کارآمد را با امکان کنترل اقلیمی کافی فراهم می‌آورند و از کم‌آبی گیاه و استرس گرمایی ناشی از دماهای بالا جلوگیری می‌کنند. افزون بر این، در مقایسه با سامانه‌های فن و پد، مزیت اصلی سامانه‌های مه‌پاش یکنواختی شرایط اقلیمی است که بدون نیاز به تهویهٔ اجباری در داخل گلخانه ایجاد می‌کنند (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). نازل‌های سامانهٔ مه‌پاش معمولاً در سرتاسر گلخانه نصب می‌شوند تا الگوی خنک‌کنندگی یکنواخت‌تری نسبت به سیستم پد و فن ارائه کنند. فاصلهٔ توصیه شده تقریباً یک نازل برای هر ۵ تا ۱۰ مترمربع از منطقه رشد است. فشار آب مورد استفاده در سامانه‌های مه‌پاش گلخانه نسبتاً زیاد است (۳۴۵۰ کیلو پاسکال یا ۳۴/۵ بار ≤). این فشار کارکرد برای تولید قطره‌های بسیار ریز کفایت می‌کند که قبل از رسیدن به سطوح گیاه تبخیر شوند (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰). سامانه‌های مه‌پاش می‌توانند سامانه‌های فشار بالا (۴۰ بار) یا سامانه‌های فشار کم (۵ بار)

باشند. سامانه‌های فشار بالا موثرتر از فشار پایین هستند (کیتاس و همکاران، ۲۰۱۳).

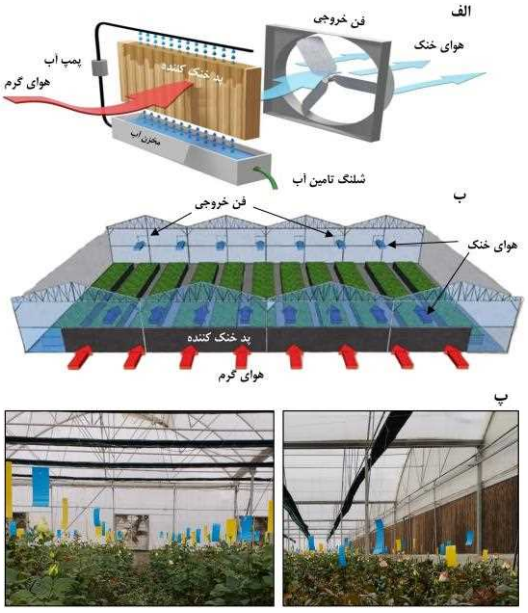
مصرف آب در هر نازل کم و تقریباً ۴/۵–۳/۸ لیتر در ساعت است. آب برای سامانه‌های مه‌پاش باید عاری از هرگونه ناخالصی باشد تا از مسدود شدن دهانهٔ نازل جلوگیری شود (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰). این فناوری به دلیل مصرف آب شیرین، برای مناطق کم‌آب مناسب نیست و نیاز به آب باکیفیت (عاری از رسوب و املاح) دارد تا از گرفتگی نازل‌ها جلوگیری شود، که هزینه‌های آن را افزایش می‌دهد. همچنین، تأمین آب مناسب ممکن است در کشورهای با منابع آبی محدود، چالش‌برانگیز باشد (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). از سوی دیگر، فشاری که برای سامانهٔ مه‌پاش لازم است، در مقایسه با تبخیرکننده‌های قطره‌ای مانند فن و پد، به میزان انرژی پمپاژ بالاتری نیاز دارد (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). نصب سامانه‌های مه‌پاش می‌تواند، در مقایسه با سامانه‌های فن و پد، گران‌تر باشد اما خنک‌سازی حاصل یکنواخت‌تر است (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰). از مه‌پاش برای خنک‌سازی تکمیلی زمانی استفاده می‌شود که امکان دارد توانایی گیاهان برای تعرق مختل شود (مثلاً در گلخانه‌های تولید نشا و قلمه). مه‌پاشی معمولاً با استفاده از پمپ فشار بالا برای پودر کردن آب با فشار دادن آن از طریق نازل‌های ثابت، نازل‌های متصل به نوک پره‌های دوار فن یا آرایش

مشابه انجام می‌شود (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). نازل‌های فن‌دار نسبت به نازل‌های بدون فن ۱/۵ برابر تبخیر بهتر و سه برابر منطقهٔ خنک‌کننده وسیع‌تری دارند. نازل‌های دارای فن دمای هوای کمتر و یکنواخت‌تری تولید می‌کنند (کیتاس و همکاران، ۲۰۱۳). اندازهٔ قطره‌های آب پودر شده باید ۰/۵ تا ۵۰ میکرومتر باشد تا از خنک شدن مناسب اطمینان حاصل شود (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). برای جلوگیری از چکیدن قطره‌های آب از برگ‌های گیاه، قطره‌های کوچک آب ۲ تا ۶۰ میکرومتر توصیه شده است (کیتاس و همکاران، ۲۰۱۳).

نازل‌های سامانهٔ مه‌پاش باید در بالاترین موقعیت ممکن در داخل گلخانه قرار گیرند تا پیش از ریختن آب روی محصول یا زمین امکان تبخیر آب فراهم شود (کیتاس و همکاران، ۲۰۱۳). در گلخانه‌هایی که تهویهٔ طبیعی دارند، نازل‌ها باید در سرتاسر گلخانه به طور یکنواخت قرار گیرند. لوله‌ها و نازل‌ها باید روی راهروها قرار گیرند تا از چکهٔ مستقیم آب روی گیاهان جلوگیری شود. در گلخانه‌هایی که با فن خنک می‌شوند، بیشتر مه باید در نزدیکی دریچه ورودی متمرکز شود و مقدار کمی به طور مساوی در بقیه گلخانه پخش شود (موسسه استاندارهای ملی آمریکا، ۲۰۰۳). در حین کارکرد سامانهٔ مه‌پاش، حداکثر بازشدگی دریچه‌ها باید ۲۰ درصد باشد (کیتاس و همکاران، ۲۰۱۳).

استفاده از فن و پد

سامانهٔ سرمایش تبخیری فن و پد روشی است کارآمد در کنترل و خنک‌سازی گلخانه برای اقلیم‌هایی که دما در آنها به بیش از ۴۰ درجه سلسیوس برسد. پایهٔ این روش بر قراردادن پد مرطوب و فن‌ها در موقعیت‌های مخالف در گلخانه است (شکل ۴–۵). پد خنک‌کنندهٔ تبخیری بخشی از دیوار گلخانه است و فن‌های خروجی معمولاً روی دیوار مقابل نصب می‌شوند. هوای خنک شده (و مرطوب) از پد خارج و در گلخانه حرکت می‌کند و گرما را از داخل گلخانه می‌گیرد. به طور کلی، استفاده از سامانه‌های پد و فن در گلخانه‌ها سبب ایجاد شیب دما بین ورودی (پد) و خروجی (فن خروجی) می‌شود. در سامانه‌هایی که به‌درستی طراحی شده‌اند، این شیب دما برای ایجاد محیط یکنواخت برای همه گیاهان پایین نگه‌داشته می‌شود (۶–۴ درجه سلسیوس امکان پذیر است) (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰). پدهایی که به شکل درست نصب شده باشند، اجازه می‌دهند تا تمام هوای تهویه ورودی پیش از ورود به محیط گلخانه از آنها عبور کند.



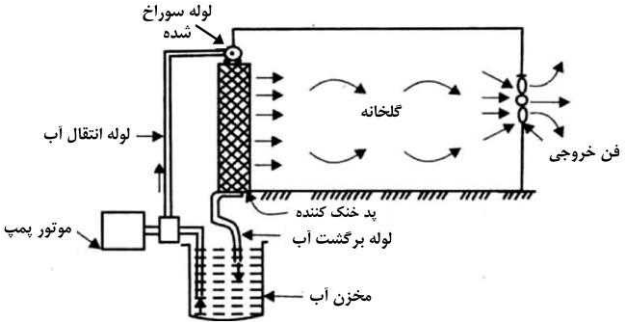
شکل ٤-٥: فرآیند خنک‌سازی در سامانهٔ فن و پد (الف) (گارجانو[1]، ۲۰۲۲)؛جریان هوا در سامانه فن و پد (ب) (شرکت تجهیزات گلخانه‌ای گریفین[2]، ۲۰۲۵)؛ پد و فن در یک گلخانه (پ) (عکس از نگارندگان)

پدها از صفحات موجدار سلولزی آغشته شده به نمک‌های انحلال‌ناپذیر برای جلوگیری از پوسیدگی یا پلاستیک ساخته شده‌اند و به نحوی به هم چسبانده شده‌اند که حداکثر تماس با هوای عبوری از پد مرطوب را فراهم کنند.

آب از بالای پد وارد و از طریق سوراخ‌های کوچک در تمام طول لولهٔ تغذیه خارج می‌شود. این سوراخ‌ها به طور

[1] - Gargano
[2] - Griffin Greenhouse Supplies

یکنواخت در سراسر طول پد قرار گرفته‌اند تا باعث یکنواختی خیس شدن پد شوند. آب اضافی در پایین پد جمع‌آوری و برای استفادهٔ مجدد به مخزن بازگردانده می‌شود (باکلین[1] و همکاران، ۲۰۱۴؛ شلفرد و بوث، ۲۰۲۰) (شکل ۴-۶).



شکل ٤-٦: پد (الف) و فن (ب) (کگاتلا و همکاران، ۲۰۲۲)

برای جلوگیری از تجمع بیش از حد نمک روی مواد پد و نیز برای جلوگیری از کاهش کارایی آن باید به صورت پیوسته تقریباً ۱۰ درصد از آب برگشتی به زهکشی تخلیه و جایگزین شود. در عملیات تابستانی باید "پدها خشک شوند"، برای این کار جریان آب را قطع می‌کنند و فن‌های خروجی (فن مکنده) را در شب فعال نگه می‌دارند تا از تجمع جلبک‌ها که می‌توانند کارایی پد را کاهش دهند، جلوگیری شود. مساحت پد تبخیری مورد نیاز به ضخامت پد، سرعت جریان هوای لازم برای سیستم خنک کننده و سرعت سطحی مجاز عبور

[1]- Bucklin

هوا از پد بستگی دارد و می‌توان آن را از رابطه زیر محاسبه کرد (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰):

$$A_p = \frac{\text{کل ظرفیت تهویهٔ فن گلخانه}}{\text{سرعت هوای توصیه شده حین عبور از پد}} \qquad (۱-۴)$$

برای مثال، برای پدهای با ضخامت ۱۰ سانتی‌متری، ظرفیت فن (بر حسب مترمکعب بر ثانیه) باید بر سرعت هوای توصیه شده در حین عبور از پد، ۱/۲۷ متر بر ثانیه، تقسیم شود. برای پدهای با ضخامت ۱۵ سانتی‌متری، ظرفیت فن باید به سرعت هوای توصیه شده در حین عبور از پد، ۱/۷۸ متر بر ثانیه، تقسیم شود (موسسه استانداردهای ملی آمریکا، ۲۰۰۳). میانگین سرعت سطحی عبور هوا از پد ۱/۵ – ۰/۷۵ متر بر ثانیه است. سرعت بیش از حد ممکن است قطره‌های آب را به گلخانه وارد و مشکل ایجاد کند. سرعت جریان هوای پایه برای هر مترمربع مساحت گلخانه ۱۲۰ تا ۱۵۰ مترمکعب در ساعت، عملکرد رضایت‌بخشی از سامانهٔ خنک‌کننده تبخیری را ممکن می‌سازد. سطح پد باید حدود یک مترمربع به ازای هر ۲۰ تا ۳۰ مترمربع مساحت گلخانه باشد. حداکثر فاصله فن تا پد باید ۳۰ تا ۴۰ متر و فاصلهٔ بین فن‌ها نباید بیش از ۷/۵ تا ۱۰ متر باشد (کیتاس، ۲۰۱۳). ارتفاع پد نباید بیشتر از ۲/۴ متر یا کمتر از ۰/۶۰ متر باشد تا خیس شدن یکنواخت پدها را تضمین کند (موسسه استانداردهای ملی آمریکا، ۲۰۰۳). به ازای هر شش متر فاصله بین فن و پد خنک‌کننده، ارتفاع پد باید تقریباً ۰/۳ متر (۳۰ سانتیمتر) در نظر گرفته

شود (باکلین و همکاران، ۲۰۱۴). ورودی‌های هوا باید طوری ساخته شوند که در زمستان به‌راحتی بدون برداشتن پدها بتوان آنها را پوشاند. در صورت امکان، پدها باید در سمتی از گلخانه که بادهای غالب تابستانی می‌وزند، نصب شوند مگر اینکه گلخانه در پناه ساختمان یا گلخانه دیگری به فاصلهٔ تا ۷/۶ متری باشد. جریان هوای خارج شده از فن‌ها نباید مستقیماً به ورودی‌های پد گلخانه مجاور تخلیهٔ شود مگر اینکه فاصله بین فن و ورودی گلخانه مجاور بیش از ۱۵ متر باشد (موسسه استاندارهای ملی آمریکا، ۲۰۰۳). برای پدهای با ضخامت ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر، حداقل جریان آب مورد نیاز به‌ترتیب ۶/۲ و ۹/۹ لیتر بر دقیقه به ازای هر متر طولی پد و حداقل ظرفیت مخزن به ترتیب ۳۳ و ۴۰ لیتر به ازای هر مترمربع از سطح پد است (موسسه استاندارهای ملی آمریکا، ۲۰۰۳). برای پدهای خنک‌کنندهٔ تبخیری، حداکثر آب کاربردی می‌تواند ۱۷ تا ۲۰ لیتر در ساعت در هر مترمربع از سطح پد باشد (شلفرد و بوث، ۲۰۲۰).

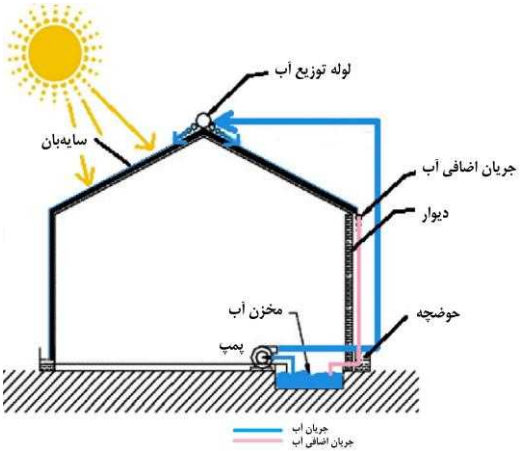
استفاده از سامانه‌های تبخیری سقف[1]

خنک‌سازی تبخیری سقف با گردش یک لایه نازک آب در سراسر سطح سقف گلخانه تامین می‌شود (شکل ۴-۷). در این روش انرژی حرارتی خورشیدی جذب شده در سطح خارجی سقف کاهش می‌یابد و سقف و هوای زیر آن خنک

[1]- External surface/roof evaporative cooling

می‌شود. در نتیجه دمای هوا کاهش و رطوبت داخل گلخانه افزایش می‌یابد. این سامانه در شرایط گرم و خشک کارایی بالایی دارد (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعات روی سامانه‌های تبخیری سقف نشان می‌دهد که استفادهٔ کارآمد از این سامانه می‌تواند راه‌حلی باصرفه برای بهبود شرایط اقلیمی برای خنک‌سازی گلخانه در شرایط آب و هوایی گرم و خشک باشد. بررسی‌های معدود برای تعیین عملکرد سرمایش تبخیری سقف برای گلخانه‌ها در مناطق گرم و خشک نشان می‌دهند که افزودن جریان آب روی سقف گلخانه می‌تواند دمای داخلی گلخانه را تا شش درجه سلسیوس کاهش دهد (گولم و همکاران، ۲۰۱۹). در صورت استفاده از یک لایه آب در زیر سایبان خارجی، عملکرد خنک کنندگی به‌طور قابل توجه در مقایسه با یک گلخانه بدون سایبان بهبود می‌یابد. محدودیت مهم این سامانه، مصرف نسبتاً بالای آب آن است که می‌تواند به حدود ۶۷ درصد آب مورد نیاز گلخانه برسد که فراتر از نیاز آبیاری است (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ٤-٧: طرح‌وارهٔ گلخانه با خنک کننده تبخیری حرکت لایه‌ای از آب روی سایبان خارجی (گولم و همکاران، ۲۰۱۹)

روش‌های رطوبت‌زدایی

گیاهان عمدتاً در روز که خورشید محصول و گلخانه را گرم می‌کند، آب را تبخیر می‌کنند، در شب و در روزهای ابری نیز تبخیر صورت می‌گیرد. علاوه بر گیاهان، آب از بستر کشت یا خاکی که با مالچ پلاستیکی پوشانده نشده باشد، تبخیر می‌شود. تخمین سر انگشتی مقدار تبخیر شبانهٔ گیاهان گلدانی در گلخانه ۱۵ گرم به‌ازای هر مترمربع در ساعت است. در مورد تعرق محصول گوجه‌فرنگی میانگین تولید بخار شبانه به ۳۰ گرم به‌ازای مترمربع در ساعت می‌رسد. در گلخانه‌ای که به خوبی عایق‌بندی و درزبندی شده باشد، خروج رطوبت از طریق چگالش و نشت کم است و تبخیر

پیوسته در گلخانه منجر به ایجاد رطوبت بالای نامطلوب در هوای گلخانه می‌شود. همان‌گونه که گفته شد، رطوبت بالا نیز خطر ابتلا به بیماری‌های قارچی مانند کپک خاکستری یا بوتریتیس را افزایش می‌دهد (کمپن و همکاران، ۲۰۰۳). برای حفظ خرد اقلیم برای رشد مناسب گیاهان در داخل گلخانه، رطوبت نسبی در گلخانه باید بین ۵۰ تا ۸۰ درصد حفظ شود (علی[1] و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج تحقیقات نشان داده است رطوبت نسبی ۸۰ درصد می‌تواند رطوبت هدف در گلخانه نیز باشد و رطوبت‌زدایی را در رطوبت نسبی بالاتر از ۸۵ درصد در ۱۸ درجه سلسیوس شروع کرد. برای رسیدن به چنین آستانه‌های رطوبتی، در گلخانه‌های معمولی با باز شدن دریچه‌ها هوای مرطوب داخل بیرون می‌رود و هوای خشک‌تر بیرونی جای آن را می‌گیرد (کمپن و همکاران، ۲۰۰۳).

در گلخانه‌ها، استفاده از دما با نقطهٔ تنظیم دمای پایین‌تر در شب برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، منجر به افزایش سطح رطوبت نسبی در داخل گلخانه‌ها می‌شود و بنابراین نیاز به رطوبت‌زدایی برای حفظ محصول را افزایش می‌دهد. روش رطوبت‌زدایی مناسب باید بتواند از تراکم آب روی سطوح گیاه جلوگیری کند که اولین گام برای پیشگیری از بیماری است زیرا قارچ‌ها و دیگر آفات برای رشد به آب نیاز

[1]- Ali

دارند. چگالش روی پوشش گلخانه نیز باید محدود شود تا از چکیدن قطره‌های آب روی محصول جلوگیری شود. افزون بر این، هزینه‌های هر روش رطوبت‌زدایی باید تا حد امکان پایین باشد تا از نظر اقتصادی برای گلخانه‌دار سودمند بماند (شانتوی‌زو[1] و همکاران، ۲۰۱۶).

سه روش اصلی رطوبت‌زدایی هوا عبارت‌اند از تهویه – گرمایش، استفاده از مواد جاذب رطوبت، و چگالش در سطحی که به‌طور فعال خنک می‌شود (کمپن و بات[2]، ۲۰۰۱؛ شانتوی‌زو و همکاران، ۲۰۱۶). مشکلات اصلی سامانه‌های رطوبت‌زدا در گلخانه‌ها مصرف انرژی بالا به دلیل گردش هوای اجباری، شیب زیاد رطوبت در گلخانه، کمبود ظرفیت، سرعت بالای هوا در گلخانه و اندازهٔ بزرگ تاسیساتی است که می‌توانند حائل نور ورودی شوند (کمپن و بات، ۲۰۰۱). رطوبت‌زدایی از طریق تهویه، جذب یا چگالش نه‌تنها در انتقال بخار آب و در نتیجه گرمای نهان، بلکه به‌انتقال گرمای محسوس نیز اشاره دارد. در رطوبت‌زدایی سازگار با انرژی، نسبت گرمای نهان به گرمای محسوس باید زیاد باشد (کمپن و بات، ۲۰۰۱).

[1]- Chantoiseau
[2]- Campen and Bot

تهویه-گرمایش

روش تهویه-گرمایش در حال حاضر رایج‌ترین روشی است که گخانه‌داران برای رطوبت‌زدایی استفاده می‌کنند. این روش شامل بازکردن دریچه‌های تهویهٔ گلخانه برای بیرون دادن هوای مرطوب گلخانه و آوردن هوای نسبتاً خشک بیرون به‌داخل است. هنگامی که هوای بیرون سردتر است، گلخانه برای رسیدن به دمای تنظیم شده باید گرم شود. حتی اگر این روش در روز، که تابش خورشید و دمای هوای بیرون بالاست، قابل قبول باشد کاربرد آن در شب، سحر و غروب که گرمایش به طور گریز ناپذیری منجر به افزایش مصرف انرژی و کاهش راندمان انرژی گلخانه می‌شود، نیاز به بررسی اقتصادی و زیست‌محیطی دارد. مطالعات نشان می‌دهند که تهویه-گرمایش با نقاط تنظیم رطوبت نسبی ۹۰ و ۸۵ درصد می‌تواند به ترتیب ۱۲ و ۲۰ درصد از کل مصرف انرژی گلخانه‌ای با محصول گوجه‌فرنگی را در سال داشته باشد (شانتوی‌زو و همکاران، ۲۰۱۶). در شب‌های سرد، این امر منجر به خروج موثر رطوبت می‌شود، اما مقدار قابل‌توجهی از گرمایش را از بین می‌برد. در عرض‌های جغرافیایی شمالی این روش کنترل رطوبت، ۱۳ تا ۱۸ درصد از انرژی مصرفی سالانه را برای گرمایش گلخانه شامل می‌شود (کمپکس و همکاران، ۲۰۱۶). برای محصولاتی که میزان تعرق کمتری دارند، مانند اکثر گونه‌های گیاهان

زینتی، مصرف انرژی تهویه-گرمایش باید کمتر باشد. محصولات زینتی نیازهای گرمایشی کمتری دارند، اما در تولید آنها گرمایش-تهویه همچنان بخش قابل توجهی از مصرف انرژی است. این روش به‌رغم ناکارا بودن همچنان مورد به‌کار گرفته می‌شود زیرا تنها به نصب دریچه‌ها و سامانه گرمایشی نیاز دارد که به هر حال برای محصولات زینتی در آب و هوای معتدل اجباری است (شانتوی‌زو و همکاران، ۲۰۱۶).

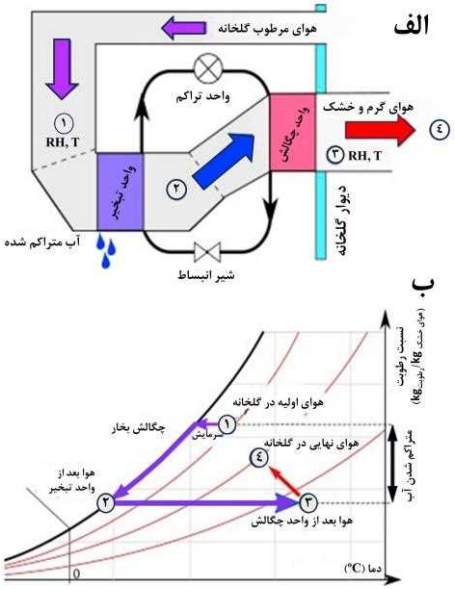
پمپ حرارتی رطوبت‌زدا

یک جایگزین برای تهویه-گرمایش، استفاده از پمپ حرارتی رطوبت‌زدا است که بخار آب را با استفاده از چرخهٔ تبرید الکتریکی از هوای مرطوب حذف می‌کند. بازیابی انرژی از هوای گرم و مرطوب خروجی و انتقال آن به هوای خشک ورودی با استفاده از مبدل هوا – هوا صورت می‌گیرد. هدف این روش، کاهش تلفات حرارتی ناشی از تهویه و در نتیجه کاهش نیاز به گرمایش است. با بازیافت هوای داخل به جای گرم کردن هوای سرد بیرون، مصرف انرژی محدود می‌شود و می‌توان انرژی بازیابی‌شده از تراکم بخار آب را به گلخانه بازگرداند. در نتیجه، مزیت اصلی چنین دستگاهی به حداقل رساندن تلفات انرژی با استفادهٔ مجدد از انرژی استخراج شده از طریق چگالش است. افزون بر این، در سامانهٔ تهویه لازم است تا هوا در هر دو جهت از مبدل عبور کند. نتایج یک

تحقیق در کانادا ۴۰ درصد صرفه‌جویی انرژی را برای محصول گوجه‌فرنگی در کشت هیدروپونیک نشان داده است. در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از یک مبدل ارزان قیمت مخصوص تولید گوجه‌فرنگی و خیار در کانادا، برای نقطه تنظیم رطوبت نسبی ۷۵ درصد، راندمان دمای مبدل حرارتی برای میزان تهویه ۰/۹ و ۰/۵ بار تغییر (تبادل) هوا در ساعت، به ترتیب ۷۸ و ۸۴ درصد بوده است که ۴۰ درصد آن گرمای نهان ناشی از تراکم بخار خروجی بود (شانتوی‌زو و همکاران، ۲۰۱۶).

اگر دمای هوا کمتر از دمای نقطهٔ شبنم باشد، فشار بخار کمتر از فشار بخار واقعی خواهد بود و این اختلاف به عنوان نیروی محرکه برای چگالش عمل می‌کند. در گلخانه، دمای سطوح (مانند سطح تجهیزات یا پوشش گلخانه) باید کمتر از ۵ درجه سلسیوس باشد تا ظرفیت چگالش کافی داشته باشد. سطح سرد را می‌توان با پمپ حرارتی خنک کرد. واحد تبخیر[1] پمپ حرارتی، گرمای نهان ناشی از چگالش و گرمای محسوس ناشی از خنک شدن را جذب می‌کند. در واحد چگالش[2] پمپ حرارتی، این گرما و انرژی برای به حرکت در آوردن واحد متراکم کننده[3] در دمای بالاتری برای گرمایش یا ذخیره‌سازی آزاد می‌شود (شکل ۴–۸).

[1]- Evaporator
[2]- Condenser
[3]- Compressor



شکل ٤-٨: جریان هوا در یک پمپ حرارتی رطوبت‌زدا (الف) و تحول خواص هوای مرتبط به‌هنگام اجرای عملیات (ب) (شانتوی‌زو و همکاران، ٢٠١٦)

بر این اساس، در دوره‌هایی که گلخانه نیاز حرارتی داشته باشد یا نداشته باشد، در صورت نیاز می‌توان رطوبت‌زدایی را انجام داد. سامانه‌های پمپ حرارتی از نظر فنی به خوبی توسعه یافته‌اند و می‌توانند به روشی آسان و بدون خطر برای محیط‌زیست به سامانه‌های سرمایش و گرمایش متصل شوند. با توجه به آنچه گفته شد، رطوبت‌زدا باید دارای یک مبدل حرارتی بخش سرد برای حذف بخار آب از طریق تراکم

و یک واحد تبادل حرارتی بین هوای گرم ورودی گلخانه و هوای مرطوب سرد شده باشد تا گرمای محسوس را بازیابی کند. مبدل حرارتی بخش گرم باید هوای گلخانه را به دمای مطلوب بازگرداند (کمپن و بات، ۲۰۰۱).

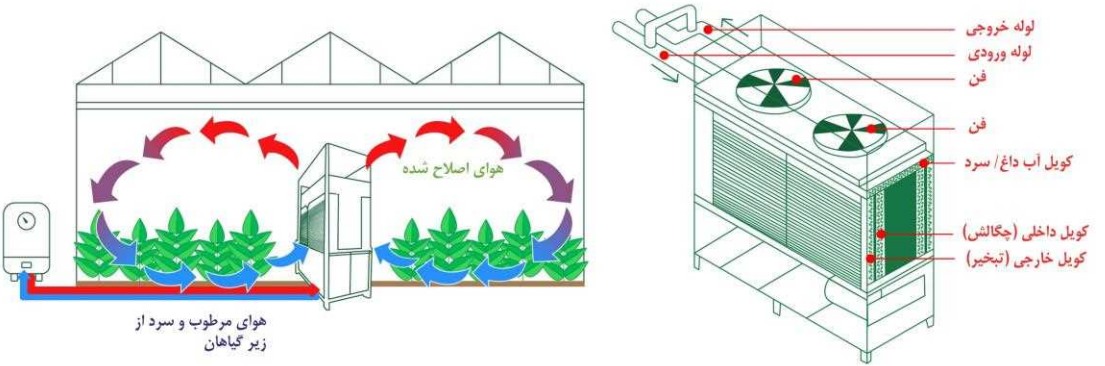
عیب اصلی این واحدهای الکتریکی، مقدار قابل توجه انرژی مصرفی آنهاست. در واقع، چگالش زمانی آغاز می‌شود که هوای گرم داخلی تا نقطهٔ شبنم خنک شود. در نتیجه، مقدار انرژی مصرفی شامل انرژی مورد نیاز برای خنک کردن هوا به اضافهٔ انرژی مورد نیاز برای تغییر فاز از بخار به آب مایع است که معادل ۶۸۰ کیلووات ساعت بر مترمکعب است. اکثر مطالعات نشان می‌دهند که خنک‌سازی مکانیکی اگرچه در کنترل دما، رطوبت و غلظت دی‌اکسیدکربن به ویژه در گلخانه‌های بسته کارآمد است، مصرف انرژی آن همچنان بسیار زیاد و غیراقتصادی است، مگر اینکه پمپ‌های حرارتی در حالت گرمایش نیز کار کنند، یا گرمای آزاد شده در حالت خنک کننده نیز برای سایر موارد مانند تولید آب گرم استفاده شود (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲).

سامانهٔ رطوبت‌زدای پیشرفته با فناوری ترکیبی

سامانهٔ رطوبت‌زدای پیشرفته با فناوری ترکیبی سامانه‌ای است پیشرفته که عمدتاً برای استفاده در صنایع کشاورزی و گلخانه‌ها طراحی شده است. این سامانه معمولاً دستگاه کاهش‌دهنده رطوبت شناخته می‌شود و به طور خاص برای

کاربردهای گلخانه‌ای طراحی شده است. این سامانه با کاهش رطوبت اضافی و افزایش کیفیت هوای داخلی، به جلوگیری از بیماری‌های گیاهی و افزایش بهره‌وری محصولات کمک می‌کند. سامانهٔ رطوبت‌زدای پیشرفته با فناوری ترکیبی یک رطوبت‌زدای صنعتی با فناوری ترکیبی است که از چرخهٔ تبرید تراکمی[1] برای حذف رطوبت هوا استفاده می‌کند. این سامانه شامل کمپرسور، واحد تبخیر (کویل سرد)، واحد چگالش (کویل گرم)، و فن‌های پرتوان است (شکل ۴-۹). هوای مرطوب با سرعت ۱/۲ تا ۲/۵ متر بر ثانیه از روی واحد تبخیر با دمای سطحی ۲ تا ۸ درجه سلسیوس عبور می‌کند، رطوبت آن به شکل قطره‌های آب متراکم و از طریق لولهٔ تخلیه خارج می‌شود. پس از آن، هوا از واحد چگالش با دمای ۳۵ تا ۴۵ درجه سلسیوس عبور می‌کند و پس از گرم شدن با رطوبت نسبی ۳۰ تا۴۰ درصد و دمای تنظیم شده به محیط بازمی‌گردد. ظرفیت رطوبت‌زدایی آن بسته به مدل و اندازهٔ سیستم بین ۱۰ تا ۱۲۰ لیتر آب در ساعت است. مصرف انرژی آن ۰/۵ تا ۳ کیلووات بر ساعت به ازای هر لیتر آب استخراج شده است. سرعت جریان هوای آن ۳۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت است. قابلیت بازیابی حرارت تا ۸۰ درصد از گرمای استخراج شده را دارد (شرکت درای‌گیر، ۲۰۲۵).

[1] - Compression Refrigeration Cycle



فرآیند : هوای مرطوب ← مکش توسط فن ← خنک‌سازی (کویل سرد) ← تقطیر رطوبت ← جمع‌آوری آب ← گرمایش مجدد ← هوای خشک و گرم ← بازگشت به محیط

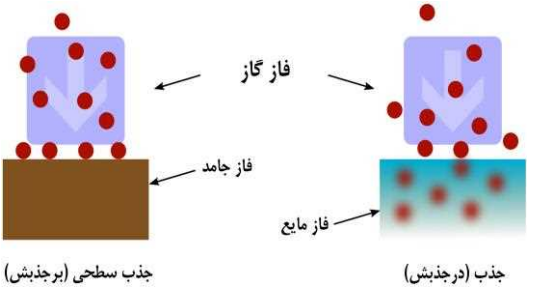
شکل ٤-٩ : سامانهٔ رطوبت‌زدای پیشرفته با فناوری ترکیبی

سامانه‌های با مواد جاذب رطوبت

رطوبت‌زدایی بر اساس مواد جاذب رطوبت معمولاً در شرایط زیر ترجیح داده می‌شود: (۱) زمانی که بار رطوبت‌زدایی (نهان)[1] بیشتر یا برابر با ۳۰ درصد کل بار خنک‌سازی است، (۲) زمانی که حرارت صنعتی با کیفیت پایین[2] و قیمت کم برای بازسازی مواد جاذب رطوبت در دسترس است، (۳) مکان‌هایی که کنترل شدید رطوبت نسبی در آنها لازم است مانند بیمارستان‌ها و موزه‌ها و (۴) مکان‌هایی که رطوبت در آنها باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود، مانند خوابگاه‌ها (در زمینهٔ رشد و تکثیر باکتری‌ها)، محوطه (مه‌آلودگی) و غیره. مواد جاذب رطوبت، بخار آب را از هوا جذب می‌کنند و فشار بخار موجود در هوا را کاهش می‌دهند. رطوبت‌زدایی مبتنی بر مواد جاذب رطوبت به شکل‌های جامد یا مایع دسته‌بندی می‌شود. جذب سطحی[3] و جذب[4] دو فرآیندی هستند که در رطوبت‌زدایی با مواد جاذب رطوبت نقش مهمی دارند. در جذب سطحی، ماده رطوبت را در سطح خود جذب می‌کند و ساختار مولکولی ماده را بی تأثیر نگه می‌دارد (شکل ۴-۱۰). جذب سطحی فقط در مواد جاذب رطوبت جامد مانند آلومینیم

[1]- Dehumidification (latent) load
[2]- Industrial low-quality heat
[3]- Adsorption (برجذبش، جذب سطحی)
[4]- Absorption (درجذبش، جذب)

فعال[1]، کربن فعال[2]، سیلیکاژل[3]، زئولیت‌ها[4] و غیره دیده می‌شود. سامانهٔ مواد جاذب رطوبت مایع[5] معمولاً نسبت به سامانه مواد جاذب رطوبت جامد ترجیح داده می‌شود، زیرا در تازه‌سازی در دمای پایین (فعال شدن مجدد) کارآمدتر است (علی و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ٤-۱۰: جذب سطحی (برجذبش) و جذب (درجذبش)

به‌علاوه، این سامانه‌ها به دلیل تماس مستقیم بین هوا و محلول جاذب رطوبت بسیارغلیظ می‌تواند تمام آلاینده‌های موجود در هوا (گرد و غبار، هاگ‌ها، باکتری‌ها، ویروس‌ها) را حذف کند. بنابراین، سامانهٔ مواد جاذب رطوبت مایع در مقایسه با سامانه‌های متراکم‌سازی بخار آب با سطوح مرطوب بزرگ که محیط مناسبی برای رشد باکتری‌ها ایجاد می‌کنند، کیفیت هوای داخل گلخانه را بالا نگه می‌دارد.

---

[1]- Activated aluminum
[2]- Activated carbon
[3]- Silica gel
[4]- Zeolites
[5]- Liquid desiccant system (LDS)

فناوری رطوبت‌زدایی مواد جاذب رطوبت مایع در کنترل سطح رطوبت بسیار مؤثر است، اما در مقایسه با سامانه‌های معمولی، اغلب برای کار و کنترل پیچیده‌تر است (سوسی و همکاران، ۲۰۲۲). مواد جاذب رطوبت مایع، نسبت به مواد جاذب رطوبت جامد، ظرفیت جذب آب نسبتاً بالاتری دارند و فضای کمتری نسبت به سامانهٔ جامد چند دسته‌ای[1] لازم خواهند داشت (علی و همکاران، ۲۰۱۷).

مواد جاذب رطوبت جامد سازگار با محیط زیست، غیر خورنده، غیر قابل اشتعال و ارزان‌تر از مواد جاذب رطوبت مایع هستند. علاوه بر این، مواد جاذب رطوبت با هوای مرطوب واکنش شیمیایی ندارند. مواد جاذب رطوبت جامد معمولاً یک چرخ خشک‌کننده با چرخش آهسته یا یک بستر جاذب دوره‌ای بازسازی‌شده است. در بخش جذب، هوای مرطوب برای رطوبت‌زدایی از طریق مادهٔ خشک‌کن حرکت می‌کند. در بخش دفع، آب جذب شده توسط جریان هوای گرم از ماده خشک کن خارج می‌شود. زئولیت، سیلیکات‌های تیتانیم و سیلیکاژل فعال، مواد جاذب رطوبت جامد معمولی هستند (امانی و همکاران، ۲۰۲۰).

به دلیل فشار بسیار کم بخار در سطح مواد جاذب رطوبت، آب جذب سطح این مواد می‌شود. نیروی محرکه برای جذب، اختلاف فشار بخار بین هوای گلخانه و هوای سطح مواد

[1]- Multiple batch solid system

جاذب رطوبت است. گرمای نهان در سطح جذب کننده آزاد می‌شود و آب جذب شده باید در یک واحد بازیابی (احیا) حذف (جدا) شود (کمپن و بات، ۲۰۰۱).

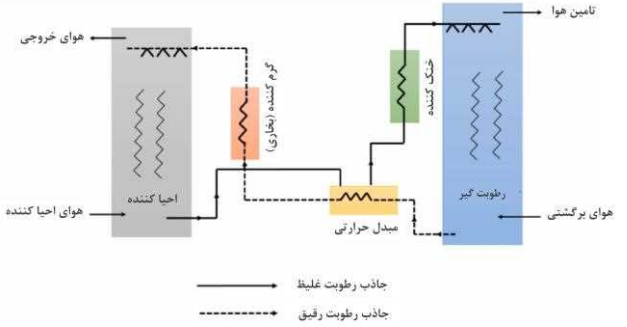
یکی دیگر از جنبه‌هایی که در استفاده از مواد جاذب رطوبت باید در نظر گرفت، خطر ذاتی این مواد است. مواد جاذب رطوبت محلول‌های نمکی بسیار غلیظ (برمیدها، کلریدها، و غیره) هستند که باید بین سطح جذب کننده و واحد بازیابی واقع در خارج از گلخانه پمپ شوند. این مایعات گران هستند و ممکن است در صورت خرابی یا نشتی سامانه، مشکلات شدیدی برای محیط زیست ایجاد کنند (کمپن و بات، ۲۰۰۱).

شرح سامانهٔ جاذب رطوبت مایع

شکل ۴-۱۱ طرح‌وارهٔ یک سامانه جاذب رطوبت مایع چرخه باز را نشان می‌دهد. اجزای اصلی یک سامانه جاذب رطوبت مایع چرخه باز، رطوبت‌گیر یا جاذب و احیا کننده یا دفع کننده هستند. رطوبت هوای ورودی توسط محلول غلیظ جاذب رطوبت مایع در قسمت رطوبت‌گیر جذب می‌شود. محلول های کلرید لیتیم[1] و کلرید کلسیم[2] از در دسترس‌ترین و کاربردی‌ترین مواد جاذب رطوبت هستند. مادهٔ جاذب رطوبت رقیق‌شده به دلیل جذب رطوبت از دستگاه رطوبت‌گیر مجدداً در دستگاه احیا کننده غلیظ می‌شود. مادهٔ جاذب رطوبت

[1]- LiCl
[2]- $CaCl_2$

رقیق‌شده پیش از ورود به دستگاه احیا کننده، گرم می‌شود. محلول داغ جاذب رطوبت رقیق شده در معرض جریان هوای ثانویه قرار می‌گیرد و به دلیل اختلاف فشار بخار، رطوبت از محلول رقیق شده به هوا منتقل می‌شود. محلول جاذب رطوبت غلیظ وارد مبدل حرارتی مایع–مایع می‌شود تا پیش از پمپاژ مجدد به داخل رطوبت‌گیر برای ادامهٔ چرخه خنک شود. مبدل حرارتی[1] بازیابی گرما را بین محلول‌های غلیظ نسبتاً داغ خروجی از دستگاه احیا کننده (که نیاز به خنک شدن قبل از ورود به دستگاه رطوبت‌گیر دارد) و محلول رقیق شده خروجی از رطوبت‌گیر (که باید قبل از ورود به دستگاه احیا کننده حرارت داده شود) به‌عهده دارد (جرادات[2] و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ٤-١١: طرح‌واره یک سامانه جاذب رطوبت مایع چرخه باز (جرادات و همکاران، ۲۰۲۳)

[1]- Heat Exchanger (HEX)
[2]- Jaradat

بسته به کارایی مبدل حرارتی، ۶۰ تا ۷۰ درصد از اتلاف حرارت محسوس مرتبط با رطوبت‌زدایی را می‌توان دوباره به‌دست آورد (دی زوارت، ۲۰۱۳). با استفاده از مادۀ جاذب رطوبت در سامانه‌های خنک‌سازی، مصرف انرژی را می‌توان تا ۵ درصد برای گرمایش و ۳۰ درصد برای سرمایش کاهش داد (سلطان[1] و همکاران، ۲۰۱۵). مادۀ جاذب رطوبت باید برای محیط زیست ایمن و غیر سمی باشد و حاوی هیچ ماده فراری غیر از آب نباشد و پایداری طولانی مدت داشته باشد. مادۀ جاذب رطوبت مایع باید باصرفه و دارای انحلال‌پذیری و دمای تبلور پایین باشد تا از تشکیل رسوب نمکی در استفاده معمولی جلوگیری شود. مشکلات اصلی سامانه‌های خشک‌کن مایع چرخه باز، تبلور و خورندگی قوی اجزای فلزی است (جرادات و همکاران، ۲۰۲۳). گرمای ارزان‌قیمت را برای تغلیظ محلول جاذب رطوبت می‌توان از گرمای هدر رفته از دیگر سامانه‌ها یا از کلکتور[2] (جمع کننده) حرارتی خورشیدی تامین کرد. مزیت بارز این نوع رطوبت‌زدایی با مادۀ جاذب رطوبت مایع خورشیدی مطابقت نقطۀ حداکثر عملکرد (سطح کارایی) آن با حداکثر نیازهای خنک‌کنندگی/رطوبت‌زدایی است. زمانی که بیشترین تقاضای خنک کننده وجود دارد (روز گرم، آفتابی و مرطوب)،

[1]- Sultan
[2]- Collector

بالاترین گرمای خورشیدی برای به‌حرکت در آوردن سامانه وجود دارد. در زمستان، گرمای مورد استفاده برای تازه‌سازی/تغلیظ محلول جاذب رطوبت مایع را می‌توان با استفاده از هوای گلخانه برای متراکم کردن بخار آب حاصل از فرآیند بازیابی کرد. با این شیوه نه تنها می‌توان هوای گلخانه را گرم کرد، بلکه آب نیز بازیابی می‌شود (هائو[1] و همکاران، ۲۰۱۵).

چگالش با استفاده از سطح سرد

در این سامانه بخار آب با تراکم روی لوله‌های پره‌دار سرد، متراکم و از هوا حذف می‌شود. لوله‌ها برای افزایش سطح تبادل حرارت بدون افزایش ابعاد کلی سامانه پره‌ای ساخته می‌شوند. در این سامانه یک متر لوله پره‌دار مورد استفاده در دمای ۵ درجه سلسیوس می‌تواند ۵۴ گرم بخار در ساعت را در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۰ درصد از هوا خارج کند. تحلیل حرارتی این سامانه نشان می‌دهد حذف گرمای نهان از کل حرارت حذف شده کمتر از ۴۰ درصد است و برای هوای با رطوبت نسبی ۸۰ درصد تنها یک سوم گرمای حذف شده، گرمای نهان است. تجهیزات این روش حائل سه درصد نور ورودی به گلخانه می‌شود که در گلخانه تجاری قابل قبول نیست. بخشی از این مشکل را می‌توان با اجرای مستقیم سامانه در ساخت گلخانه حل کرد. سامانهٔ

[1]- Hao

رطوبت‌گیر شامل لوله‌های پره‌ای شکل است که در زیر ناودان گلخانه ثابت شده‌اند (شکل ۴-۱۲). به سه دلیل محل نصب زیر ناودان گلخانه در نظر گرفته می‌شود: الف) جریان با همرفت طبیعی افزایش می‌یابد، سطح سرد به بهترین وجه در بالای سامانه قرار می‌گیرد. ب) سامانه در سایهٔ ناودان قرار دارد و کمتر حائل نور می‌شود. پ) هوا تمایل دارد تا در زیر پوشش سرد به سمت پایین جریان یابد، بنابراین هوای عبوری از لوله‌های پره‌دار از قبل خنک می‌شود (کمپن و بات، ۲۰۰۲).

شکل ٤-۱۲ : چگالش با استفاده از سطح سرد (کمپن و بات، ۲۰۰۲)

توصیه‌های کاربردی مدیریت رطوبت در گلخانه‌ها

برای مدیریت رطوبت و کمبود فشار بخار، مهم‌ترین اصل در کنار گرمایش، جریان و چرخش هوا در گلخانه و پیرامون پوشش گیاهی است تا از تجمع رطوبت و چگالش آن روی برگ‌ها جلوگیری شود. برای مدیریت رطوبت، موارد زیر را می‌توان در نظر گرفت:

۱- پایش دما و رطوبت: با اندازه‌گیری و پایش مستمر دما و رطوبت نسبی، مقدار کمبود فشار بخار در گلخانه را به‌دست آورید (شکل ۴-۱۳-الف). به درک درستی از تغییرات زمانی و مکانی دما، رطوبت نسبی و کمبود فشار بخار در گلخانه دست پیدا می‌کنید.

۲- آبیاری منظم و مناسب: رطوبت گلخانه چه خیلی کم باشد چه زیاد، همیشه آبیاری به صورت منظم اعمال شود (شکل ۴-۱۳-ب). به طور کلی، برای جلوگیری از رطوبت ناخواسته آبیاری، از آبیاری زیاد پرهیز و آبیاری در اوایل روز صورت گیرد تا زمان لازم برای خشک‌شدن تا شب وجود داشته باشد و سبب تجمع و آب راکد در گلخانه نشود. از طرفی تعرق گیاهان عامل اصلی مرطوب کننده/خنک کننده هوای گلخانه است. برای نیازهای تبخیر و تعرق در روزهای گرم از آبیاری کافی اطمینان حاصل کنید.

۳- تراکم کشت و هرس مناسب: پوشش گیاهی انبوه یکی از ویژگی‌های گیاهان سالم است، اما سبب محبوس شدن هوای مرطوب در شب می‌شود. رطوبت منطقه‌ای بالا در گلخانه، با پایین آوردن کمبود فشار بخار می‌تواند سبب کندشدن تبخیر آب از خاک یا بستر گیاه شود و به تشکیل جلبک در سطح خاک کمک کند. تراکم کشت توصیه شده و هرس صحیح بوته‌ها به گردش هوا در زیر پوشش گیاهی محصول کمک می‌کند و اجازه می‌دهد هوای تعرق شده به

سمت فضای باز حرکت کند و زیر پوشش گیاهی متراکم حبس نشود (شکل ۴-۱۳-پ).

۴- تهویه -گرمایش: تهویه عاملی بسیار مهم در خارج کردن مقداری از هوای مرطوب از گلخانه است. تهویه و روش‌های گرمایش مناسب می‌توانند به کاهش سطح رطوبت در گلخانه کمک شایانی کنند (شکل ۴-۱۳-ت و ۴-۱۳-ث). هوای گرم‌تر رطوبت بیشتری را در خود نگه می‌دارد و هنگامی که تخلیه می‌شود می‌تواند رطوبت نسبی داخلی را با تخلیهٔ هوای پر از آب از گلخانه کاهش دهد.

۵- گردش هوا: حرکت هوا یکی دیگر از نکات مهم در مدیریت رطوبت در گلخانه است (شکل ۴-۱۳-ج). حرکت هوای کافی در اطراف گیاه زمانی اتفاق می افتد که برگ‌ها کمی حرکت کنند. در این شرایط رطوبت فرصتی برای متراکم شدن روی سطوح برگ پیدا نمی‌کند زیرا اختلاط ناشی از حرکت مانع می‌شود از اینکه هوا در امتداد سطح برگ به زیر نقطهٔ شبنم سرد شود. به ویژه در بهار یا پاییز و ساعات نزدیک به سحر، که دما کاهش و رطوبت در گلخانه به شدت افزایش می‌یابد، با به هم زدن هوا می‌توان از تراکم رطوبت جلوگیری کرد. با استفاده از فن‌های چرخشی و حرکت مداوم هوا می‌توان مانع از تشکیل نواحی سرد و مرطوب یا تجمع رطوبت به ویژه در اطراف پوشش گیاهی شد. در صورت نداشتن فن‌های جریان هوای افقی می‌توان

از فن کوره‌های هوای گرم، بدون راه‌اندازی کورهٔ آن، استفاده کرد.

۶- پرهیز از آب گرفتگی یا جمع‌شدن آب راکد در سطح گلخانه: وجود آب راکد روی خاک، کف گلخانه یا محیط‌های رشد می‌تواند باعث تبخیر و افزایش رطوبت نسبی شود که منجر به تراکم و ایجاد محیط مرطوب خواهد شد. از رها کردن آب گرفتگی یا آب راکد در گوشه‌ها و مناطقی که آفتاب مستقیم ندارند جلوگیری شود. آب راکد نه تنها رطوبت محیط را افزایش می‌دهد بلکه بستری خواهد بود برای رشد پاتوژن‌های قارچی و آفات خاص (شکل ۴-۱۳-ح و ۴-۱۳-خ).

۷- از بین بردن علف‌های هرز و بقایای گیاهی: علف‌های هرز در گلخانه‌ها باید از بین بروند. علف‌های هرز عاملی برای افزایش رطوبت در هوا هستند. علف‌های هرز رطوبت را در برگ نگه می دارند، سپس آن را به پوشش گیاهی منتقل و رطوبت ایجاد می‌کنند (شکل ۴-۱۳-خ).

۸- در صورت بالا بودن کمبود فشار بخار و کاهش رطوبت در گلخانه، با استفاده از سامانه‌های فن - پد و یا مه‌پاش می‌توان به افزایش رطوبت و کاهش دما در گلخانه کمک کرد (شکل ۴-۱۳-د و ۴-۱۳-ذ).

شکل ٤-١٣ : روش‌های مدیریت رطوبت و کمبود فشار بخار در گلخانه‌ها (عکس‌ها از نگارندگان)

منابع مورد استفاده

بی‌نام. ۱۳۹۱. مبانی و ضوابط توسعه گلخانه‌ها (نظام گلخانه‌ای، پرورش قارچ خوراکی و کمپوست کشور). معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، نشریه شماره ۴۷۲، ۱۴۳ صفحه.

سعیدی م. ح.، سجادی، ب. ۱۳۸۸. طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع و تاسیسات مکانیکی. دانشکده مهندسی مکانیک. دانشگاه صنعتی شریف. ۲۱۳ صفحه.

طباطبایی، م. ۱۳۸۲. محاسبات تاسیسات ساختمان: شامل حرارت مرکزی، تهویه مطبوع، آبرسانی و دفع فاضلاب ساختمان، طرح سیستم لوله‌کشی گاز ساختمان، سیستم آتش‌نشانی ساختمان همراه با مجموعه‌ای از کاتالوگ‌های وسایل تاسیساتی. چاپ نهم. انتشارات روزبهان. تهران. ایران. ۵۴۱ صفحه.

رضوانی، س.، سلگی، م. ۱۳۹۴. ارزیابی فنی و اقتصادی مصرف و بازده انرژی درکشت خیار گلخانه‌های استان همدان. گزارش نهایی پژوهشی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ثبت ۴۸۴۴۷.

رضوانی، س.، زارع ابیانه، ح.، گودرزی، م. ۱۳۹۸. توزیع تعرق و کمبود فشار بخار در گلخانه‌ی تجاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، (۵)۱۳، صفحه ۱۲۰۳-۱۱۹۱.

رضوانی، س. ۱۳۹۹. بهینه سازی تهویه و شبیه سازی تعرق در گلخانه‌های استان همدان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و تراز انرژی. پایان‌نامه دکتری. کد رهگیری ۲۶۷۰۰۶۰. دانشگاه بوعلی سینا. همدان. ۱۲۷ صفحه.

رضوانی، س. ۱۴۰۰. بررسی فنی سامانه‌های توزیع گرما در گلخانه‌های استان همدان. گزارش نهایی. شماره ثبت : ۵۹۵۷۳. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. کرج. ایران. ۱۶۳ صفحه.

زارعی، ق.، ج. جوادی‌مقدم و ح. فریدی. ۱۴۰۰. اهمیت کنترل عامل‌های مؤثر در شرایط محیطی گلخانه‌های تجاری. مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، (۲)۶: ۱۳۸-۱۲۳.

Ali, A., Ishaque, K., Lashin, A. and Al Arifi, N. 2017. Modeling of a liquid desiccant dehumidification system for close type greenhouse cultivation. Energy, 118, pp.578-589.

Alps Alpine. 2020. Alps Alpine's Humidity Sensors. https://tech.alpsalpine.com/e/products/faq/sensor-capacitive/features/

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2005 ASHRAE Handbook: Fundamentals - SI

Edition. 2005. SI ed, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditionin, ASHRAE, 2005.

Amani, M., Foroushani, S., Sultan, M. and Bahrami, M. 2020. Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications. Applied Thermal Engineering, 181, p.115979.

Amitrano, C., Arena, C., Rouphael, Y., De Pascale, S. and De Micco, V. 2019. Vapour pressure deficit: The hidden driver behind plant morphofunctional traits in controlled environments. Annals of Applied Biology, 175(3), pp.313-325.

Argus. Understanding and Using VPD [Internet]. White Rock, Canada; 2009. Available from:

ANSI/ASAE. Engineering Practice. 2003. Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. ASAE EP 406. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI 49085. https://ceac.arizona.edu/sites/default/files/asae_-_heating_ventilating_and_cooling_greenhouses.pdf

Ashraf, H., Sultan, M., Shamshiri, R.R., Abbas, F., Farooq, M., Sajjad, U., Md-Tahir, H., Mahmood, M.H., Ahmad, F., Taseer, Y.R. and Shahzad, A. 2021. Dynamic evaluation of desiccant dehumidification evaporative cooling options for greenhouse air-conditioning

application in multan (Pakistan). Energies, 14(4), p.1097.

Aqua Man. 2019. VPD (vapor pressure deficit). https://www.thcfarmer.com/threads/vpd-vapor-pressure-deficit.107967/

Auger, M. 2020. The Effects of Temperature and Relative Humidity on Tomato Fertilization. Retrieved from. https://bushorder.ca/journal/the-effects-of-temperatu

Bartok, J. B. 2009. Mist and Fog Equipment for Propagation. In UMass Amherst: Center for Agriculture, Food, and the Environment. Retrieved from https://ag.umass.edu/fact-sheets/mist-fog-equipment-for-propagation

Bartok, J. B. 2013. Natural Ventilation in Greenhouses. In UMass Amherst: Center for Agriculture, Food, and the Environment. Retrieved from https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/fact-sheets/natural-ventilation-in-greenhouses

Bhujel, A., Basak, J.K., Khan, F., Arulmozhi, E., Jaihuni, M., Sihalath, T., Lee, D., Park, J. and Kim, H.T. 2020. Sensor systems for greenhouse microclimate monitoring and control: a review. Journal of Biosystems Engineering, 45, pp.341-361.

Both, A.J., Benjamin, L., Franklin, J., Holroyd, G., Incoll, L.D., Lefsrud, M.G. and Pitkin, G. 2015. Guidelines for measuring and

reporting environmental parameters for experiments in greenhouses. Plant Methods, 11, pp.1-18.

Bray M. 2022. Calcium Deficiency In Pepper Plants: Signs And Fixes. https://pepperscale.com/calcium-deficiency-in-pepper-plants/

Bucklin, R. A., Leary, J. D., McConnell, D. B., and E. G. Wilkerson. 2014. Fan and pad greenhouse evaporative cooling systems. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2001. SE—Structures and Environment: Design of a Low-Energy Dehumidifying System for Greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research, 78(1), pp.65-73.

Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2002. SE—Structures and Environment: Dehumidification in Greenhouses by Condensation on Finned Pipes. Biosystems Engineering, 82(2), pp.177-185.

Calkins Bill. 2023. Learning Curves & Data Curves. Growertalks. https://www.growertalks.com/Article/?articleid=26085

Castilla, N. 2013. Greenhouse technology and management. Cabi.

Chantoiseau, E., Migeon, C., Chasseriaux, G. and Bournet, P.E. 2016. Heat-pump dehumidifier as an efficient device to prevent

condensation in horticultural greenhouses. Biosystems Engineering, 142, pp.27-41.

Cutress, D. 2021. The importance of vapour pressure deficits (VPD) in agricultural plant growth. Business Wales. Welsh Government. https://businesswales.gov.wales/farmingconnect/news-and-events/technical-articles/importance-vapour-pressure-deficits-vpd-agricultural-plant-growth

Danesi, S. 2023. Influence of humidity on the quality of the crops; In: Thermochemical fluids in greenhouse farming. D4.9 Practice abstracts, first set (Rev01). TheGreefa. European Commission.

Desert Aire. 2022.Impact of Design Conditions on Grow Facility Equipment Performance. https://www.desert-aire.com/sites/default/files/Brochure-AN-33-Impact-of-Design-Conditions-on-Equipment-Performance-DA135.pdf

De Zwart, H.F. 2013, October. Energy conserving dehumidification of greenhouses. In International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant 1037 (pp. 203-210).

Dimalux. 2024.Vapor Pressure Deficit: The ideal environment for your plants. https://www.dimluxlighting.com/knowledge/blog/vapor-pressure-deficit-the-ultimate-guide-to-vpd/

DryGair company. 2024. How to Grow Roses – Rose Greenhouse Guide. DryGair Energies Ltd. https://drygair.com/blog/rose-greenhouse/#:~:text=The%20ideal%20relative%20humidity%20range,rose%20growth%2C%20development%20and%20blooming.

DryGair Company. 2025. Dehumidifiers. https://drygair.com/dehumidifiers/

Gargano, D. 2022. The Cost of Evaporative Cooler Pads Adds Up Fast : Choose Power Breezer. POWERBEEZER. https://www.powerbreezer.com/the-cost-of-evaporative-cooler-pads-adds-up-fast-choose-power-breezer/

Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R. and Calautit, J.K. 2019. Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. Biosystems Engineering, 183, pp.121-150.

Grange R.L., Hand D.W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. J Hortic Sci 62: 125–134. https://doi.org/10.1080/14620316.1987.11515760.

Griffin Greenhouse Supplies. 2025. Lubing Systems – Plastic Evaporative Cooling Pads. https://www.griffins.com/lubing-systems-plastic-evaporative-cooling-pads

Hanan, J.J. 1998. Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture (1st ed.).

CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203719824

Hao, X., Zheng, J., Celeste, L., Guo, X. and Kholsa, S. 2015, July. Liquid desiccant dehumidification system for improving microclimate and plant growth in greenhouse cucumber production. In International Symposium on New Technologies and Management for Greenhouses-GreenSys2015 1170 (pp. 861-866).

Harmanto, Tantau, H.J. and Salokhe, V.M. 2006. Optimization of ventilation opening area of a naturally ventilated net greenhouse in a humid tropical environment. Acta Hortic. 719, 165-172

HENGKO Technology Co. 2024. How Humidity Sensor Works All You Should Know. https://www.hengko.com/news/how-humidity-sensor-works-all-you-should-know/#:~:text=1)%20Capacitive%20Humidity%20Sensors&text=They%20work%20by%20measuring%20changes,energy%20in%20an%20electric%20field.

Hill, L . 2022. How to read mirliton leaves for vine watering needs. https://www.mirliton.org/2022/07/12/how-to-read-mirliton-leaves-for-vine-watering-needs/

Ibidi. 2021. Parameters for Live Cell Imaging: Humidity and Evaporation. https://ibidi.com/content/371-humidity-and-evaporation

ICCEG. 2004. Minimum guidelines for measuring and reporting environmental parameters for experiments on plants in growth rooms and chambers.

Inoue, T., Sunaga, M., Ito, M., Yuchen, Q., Matsushima, Y., Sakoda, K. and Yamori, W. 2021. Minimizing VPD fluctuations maintains higher stomatal conductance and photosynthesis, resulting in improvement of plant growth in lettuce. Frontiers in Plant Science, 12, p.646144.

Iraqi, D., Gagnon, S., Dubé, S. and Gosselin, A. 1995. Vapor pressure deficit (VPD) effects on the physiology and yield of greenhouse tomato. HortScience, 30(4), pp.846E-846.

Jaradat, M., Albatayneh, A., Alsotary, O., Hammad, R., Juaidi, A. and Manzano-Agugliaro, F. 2023. Water harvesting system in greenhouses with liquid desiccant technology. Journal of Cleaner Production, 414, p.137587.

Joe, C. 2023. An Easy Guide to VPD. https://www.onestopgrowshop.co.uk/blogs/news/an-easy-guide-to-vpd

Kandil, M. 2000. Computer control and monitoring of psychrometric conditions. Thesis, Univ. of Canterbury, New Zealand, Mar. 2000. http://ir.canterbury.ac.nz/xmlui/bitstream/handle/10092/6618/Kandil_Thesis.pdf.

Kempkes, F., De Zwart, H.F., Munoz, P., Montero, J.I., Baptista, F.J., Giuffrida, F., Gilli, C., Stepowska, A. and Stanghellini, C. 2016, April. Heating and dehumidification in

production greenhouses at northern latitudes: Energy use. In III International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture 1164 (pp. 445-452).

Kgatla, L., Gidudu, B. and Chirwa, E.M.N. 2022. Feasibility study of atmospheric water harvesting augmented through evaporative cooling. Water, 14(19), p.2983.

Kittas C, Katsoulas N, Bartzanas T, Bakker S. 2013. Greenhouse climate control and energy use. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. Principles for Mediterranean Climate Areas. Rome: FAO.

Kruidhof, H.M. and Elmer, W.H., 2020. Cultural methods for greenhouse pest and disease management. Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops, pp.285-330.

Konopacki, P.J., Treder, W. and Klamkowski, K. 2018. Comparison of vapour pressure deficit patterns during cucumber cultivation in a traditional high PE tunnel greenhouse and a tunnel greenhouse equipped with a heat accumulator. Spanish Journal of Agricultural Research, 16(1), pp. e0201-e0201.

Koverda, P. 2020. The ultimate vapor pressure deficit (VPD) guide. Pulse Labs, 1.

Li, G., Tang, L., Zhang, X., Dong, J. and Xiao, M. 2018, June. Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques: A review. In IOP Conference

Series: Earth and Environmental Science (Vol. 167, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.

Landis, T.D. and Nisley, R.G. 1990. The container tree nursery manual (No. 674). US Department of Agriculture, Forest Service.

Landis, T.D.; Tinus, R.W.; McDonald, S.E.; Barnett, J.P. 1992. Atmospheric environment, Chapter 2 Humidity, Vol. 3, The Container Tree Nursery Manual. Agric. Handbk. 674. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 145 p

Ministry of Agriculture. Understanding Humidity Control in Greenhouses [Internet]. British Columbia. 2015. Available from: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/animal-and-crops/crop-production/understanding_humidity_control.pdf

Nederhoff, E. 2009. Air Humidity, Stomata and Transpiration. Practical Hydroponics and Greenhouses, (109), pp.37-42.

Passam, H.C., Karapanos, I.C., Bebeli, P.J. and Savvas, D. 2007. A review of recent research on tomato nutrition, breeding and post-harvest technology with reference to fruit quality. The European journal of plant science and biotechnology, 1(1), pp.1-21.

Pessl Instruments .2022.Guide to VPD (Vapour Pressure Deficit). https://metos.global/wp-

content/uploads/2022/07/Guide-to-VPD-EN.pdf

Petrasch, S., Knapp, S.J., Van Kan, J.A. and Blanco-Ulate, B. 2019. Grey mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen Botrytis cinerea. Molecular plant pathology, 20(6), pp.877-892.

Prenger, J.J. and Ling, P.P. 2001. Greenhouse condensation control: understanding and using vapor pressure deficit (VPD). Ohio State Univ. Extension Fact Sheet, 1608.

Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E. and MacCleery, B. 2014. Greenhouse design and control (p. 3). Boca Raton, FL, USA: CRC press.

Rabbi, B., Chen, Z.H. and Sethuvenkatraman, S. 2019. Protected cropping in warm climates: A review of humidity control and cooling methods. Energies, 12(14), p.2737.

Rezvani, S.M.E., Abyaneh, H.Z., Shamshiri, R.R., Balasundram, S.K., Dworak, V., Goodarzi, M., Sultan, M. and Mahns, B. 2020. IoT-based sensor data fusion for determining optimality degrees of microclimate parameters in commercial greenhouse production of tomato. Sensors, 20(22), p.6474.

Rezvani, S., Shamshiri, R.R., Hameed, I.A., Abyane, H.Z., Godarzi, M., Momeni, D. and Balasundram, S.K. 2021. Greenhouse crop simulation models and microclimate control

systems, a review. Next-Generation Greenhouses for Food Security. p.109.

Rogalska, S. and De Rauglaudre, C. 2023. Control of Botrytis cinerea, a foliar fungal disease. https://kcenter.lallemandplantcare.com/en/europe/protect-your-plant/control-of-botrytis-cinerea-a-foliar-fungal-disease/

Rust, B. 2023. Unlocking VPD Science: Optimize your Gardens Growth and Yields. Bokashi Earthworks. https://bokashiearthworks.net/exploring-the-science-of-vpd/

Salokhe, V.M. and Tantau, H.J. 2006. Optimization of ventilation opening area of a naturally ventilated net greenhouse in a humid tropical environment. In International Symposium on Greenhouse Cooling 719 (pp. 165-172).

Sase S, Moriyama H, Kurata K, Sabeh N, Romero P, Giacomelli GA, Kubota C, Hayashi M .2006. Effect of natural ventilation on relative humidity and water use for fog cooling in a semiarid greenhouse. Acta Hortic 719:385–392

Sase S. 2012. Greenhouse Ventilation and Management. Agricultural Environment Engineering Division. National Institute for Rural Engineering, NARO.

Shamshiri, R.R., Jones, J.W., Thorp, K.R., Ahmad, D., Man, H.C. and Taheri, S. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate

evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. International agrophysics, 32(2), pp.287-302.

Shelford, T.J. and Both, A.J. 2020. Plant production in controlled environments. Introduction to Biosystems Engineering, 28.

Soussi, M., Chaibi, M.T., Buchholz, M. and Saghrouni, Z. 2022. Comprehensive review on climate control and cooling systems in greenhouses under hot and arid conditions. Agronomy, 12(3), p.626.

Starbuck, C. 2009. Guttation: A Pressure Relief for Plants. Missouri environment and garden, 15(6). University of Missouri. (REVISED: September 30, 2015) https://ipm.missouri.edu/MEG/2009/6/Guttation-A-Pressure-Relief-for-Plants/index.cfm

Sultan, M., El-Sharkawy, I.I., Miyazaki, T., Saha, B.B. and Koyama, S. 2015. An overview of solid desiccant dehumidification and air conditioning systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46, pp.16-29.

Tucker, A.S. 1994. Heat and Mass Transfer. Course Notes ENME435, Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury.

Thomas P. 2018. Vapor Pressure Deficit? Why Should I Track That? e-GRO (Electronic Grower Resources Online). https://www.e-gro.org/pdf/2018_724.pdf

Tnau agritech. 2023. Horticulture: Deficiencies and Disorders – Tomato.

https://agritech.tnau.ac.in/horticulture/plant_nutri/tomato_cal.html#:~:text=Horticulture%20%3A%3A%20Deficiencies%20and%20Disorders-Tomato-Calcium&text=Deficiency%20Symptoms%20%3A,at%20the%20edges%20and%20died.

von Zabeltitz, C. 2011. Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 363 p.

Williams, A. 2017. A brief introduction: Humidity and greenhouse climate control**.** GrowSpan Greenhouse Structures, In: Hortidaily. https://www.hortidaily.com/article/6033024/humidity-and-greenhouse-climate-control/

Wilson, J.S. 2004. Sensor technology handbook. Elsevier.

Wollaeger, H. and Runkle, E. 2015. VPD vs. Relative Humidity. Vapor-pressure deficit is independent of temperature and is a more accurate measure to predict plant transpiration and water loss than relative humidity. Insid Grow, pp.28-29.

Xiao, J.R., Chung, P.C., Wu, H.Y., Phan, Q.H., Yeh, J.L.A. and Hou, M.T.K. 2020. Detection of strawberry diseases using a convolutional neural network. Plants, 10(1), p.31.