



فصل اول

دستورالعمل‌های اجرایی برای مقابله با سرمازدگی محصولات زراعی و باغی



مقدمه

هنگامی که دمای هوا از صفر درجه پایین‌تر رود، گیاهان حساس آسیب می‌بینند و میزان تولید آنها شدیداً تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین خساراتی که بر تولید کنندگان محصولات کشاورزی و در نتیجه به اقتصاد یک کشور وارد می‌شود، می‌تواند بسیار مخرب و جدی باشد. با وجود این اهمیت فراوان، اطلاعات و دانش اندکی در مورد چگونگی حفاظت گیاهان در برابر سرما و یخ‌زدگی وجود دارد و در کشور ما اقدامات عملی در زمینه معرفی و بهره‌گیری از روش‌های حفاظتی نوین نیز در مراحل ابتدایی قرار دارد. بنابراین لازم است که منابع اطلاعاتی سهل‌الوصول و ساده‌ای وجود داشته باشد که بتواند زارعان را در جهت مقابله با این مشکل یاری دهد. در این طرح پژوهشی ابعاد اقتصادی، آماری، تاریخی، فیزیکی و زیستی خسارت‌های ناشی از سرما و یخ‌زدگی و نیز روش‌های حفاظت در برابر این پدیده‌ها، مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت.

نتایج نهایی این طرح دامنه وسیعی از اطلاعات را از نکات پایه و مبنایی تا نکات پیچیده و تخصصی شامل می‌شود که اصولاً با هدف تعیین راهکارهایی برای مقابله با سرما و یخ‌زدگی در مناطق مختلف کشور و کمک به زارعان و باغداران در جهت حفاظت هر چه بهتر در برابر سرما و یخ‌زدگی تهیه شده است. هدف کلی، ارائه دستورالعمل‌های اجرایی و یک راهنمای کلی برای افرادی است که وظیفه تبیین و تعیین راهکارهای مبارزه با سرمازدگی در نقاط مختلف کشور را بر عهده دارند و یا به صورت عملی با این پدیده سر و کار دارند. از آنجا که ابعاد علمی و تخصصی حفاظت در برابر یخبندان بسیار پیچیده است، برنامه‌های رایانه‌ای به کاربرانی که علاقمند به مباحث مدیریتی و عملی هستند و به نکات بسیار تخصصی علمی نیاز ندارند ارائه خواهد شد. همچنین با مروری بر آخرین مطالعات و تحقیقات انجام گرفته در دنیا، مطالبی در رابطه با ابعاد مختلف تنش‌های سرما و یخ‌زدگی از جمله احتمالات، خطر و مسائل اقتصادی حفاظت در برابر یخبندان ارائه می‌شود. هدف آن است که با ارائه نتایج نهایی این بررسی‌ها در آینده، بتوان اغلب اطلاعاتی را که زارعان محلی یا مشاوران زراعی در نقاط مختلف کشور برای تصمیم‌گیری در مورد حفاظت در برابر یخبندان نیاز دارند، برای آنان فراهم آورد تا از این طریق به آنها کمک گردد تا خسارات عظیم ناشی از سرما و یخ‌زدگی در کشور را به حداقل برسانند. مسلماً دستیابی به چنین هدفی مستلزم آشنایی با اقدامات روز انجام گرفته در سطح دنیا و تطبیق آن با شرایط اقلیمی کشور و تلاش برای اجرای برنامه‌های مدیریتی کارآمد و معرفی و بهره‌برداری از روش‌های حفاظتی نوین و قابل اجرا در کشور است، تا در نهایت با انجام مطالعات کارشناسی و تخصصی، روش‌هایی که کمترین هزینه و بیشترین کارایی را با توجه به میزان دسترسی محلی به امکانات و تجهیزات و مواد اولیه داشته باشند، شناسایی شده و به عنوان روش بهینه برای هر منطقه معرفی شوند. در ادامه به ارائه نتایج مطالعات مقدماتی سنتز ملی طرح کاهش ضایعات ناشی از سرمازدگی، درباره آشنایی با مهم‌ترین برنامه‌های مدیریتی و اقدامات عملی انجام گرفته در دنیا و لازم‌الاجرا در کشور می‌پردازیم.



الف) دستورالعمل‌های اجرایی

۱- ثبت اطلاعات

ثبت داده‌ها و اطلاعات، زیربنای تمامی تصمیم‌گیری‌ها و مهم‌ترین مرحله در تدوین برنامه‌های مدیریتی جهت مقابله با سرما و یخبندان است. مسلماً توصیه روش‌های حفاظتی خاص برای یک منطقه و تطبیق برنامه‌های کلی و عمومی به شرایط خاص یک محل، مستلزم آگاهی از اطلاعات اختصاصی ثبت شده در آن منطقه است. بنابراین باید اطلاعات مربوط به هر شب را که طی فصل سرما اتفاق می‌افتد، به دقت ثبت کرد و در صورت استفاده از وسایل حفاظتی آنها را ذکر نمود. مهمترین مواردی که لازم است تعیین و ثبت شوند عبارتند از:

دمای بحرانی: دمایی است که از آن به عنوان معیار مقاومت جوانه استفاده می‌کنند. کشاورز یا باغدار باید از وقوع این دما، جلوگیری کند، زیرا در این دما خسارت جوانه‌ها اتفاق می‌افتد.

تنظیمات دستگاه اعلام‌کننده یخبندان: تنظیمات را روی آژیر خطر یخ‌زدگی ثبت کنید.

دمای حفاظت: دمایی که پیش از راه‌اندازی سیستم گرمایی در باغ حادث می‌شود به دمای حفاظت معروف است.

دمای نقطه شب‌بیم: قرائت آخرین دمای نقطه شب‌بیم که پیش از شروع حفاظت روی می‌دهد، باید حتماً ثبت شود.

زمان شروع و ختم حفاظت: تا حد امکان باید زمان اولین اقدام برای حفاظت و زمانی که کلیه عملیات حفاظتی متوقف می‌شود را یادداشت نمود.

نوع حفاظت: هر روشی را که برای حفاظت محصول در شب استفاده می‌شود، حتی روشی را که برای قسمتی از شب استفاده می‌شود، باید از قبل امتحان و چک کرد.

مساحت زمین: کل میزان سطحی که در طول شب تحت پوشش روش حفاظتی قرار می‌گیرد، باید از قبل مشخص باشد.

دمای حداقل: حداقل دمای مشاهده شده در طول شب را باید یادداشت کرد. اگر یک دماسنج در دسترس باشد حداقل دما را می‌توان به دست آورد.

درصد از بین رفتن جوانه‌ها: باید برآورد درصد از بین رفتن جوانه طی یک روز را ثبت کرد. در صورت امکان، باید میزان از دست رفتن جوانه‌ها روی درختان را نزدیک یک دماسنج دمای حداقل در سایه و نزدیک محلی که پایین‌ترین دما مشاهده می‌شود، به کمک چشم برآورد نمود.

ملاحظات: ملاحظات و مشاهدات فرد طی شب و صبح بعد از یخبندان بسیار مفید خواهد بود. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود این است که هرچه احساس می‌شود که دارای اهمیت است، باید یادداشت کرد ولی در عمل باید موارد زیر را مورد توجه قرار داد.

- شرایط آب و هوایی منطقه.

- مشکلاتی که ممکن است برای دستگاه‌ها و ماشین‌ها پیش‌آید (مثل بد کار کردن ماشین باد).

- هر شرایط خاص قابل‌تصوری که ممکن است در شب یخبندان رخ دهد و بر تصمیم‌گیری تأثیر گذارد.



۲- تصمیم‌گیری به وسیله باغداران

فرآیند اتخاذ تصمیم به وسیله باغداران در شش مرحله توضیح داده می‌شود:

۲-۱) تهیه و تدارک ابزار و وسایل

باغدار باید تعیین کند که ابزار حفاظتی چه باشد. برای اینکه بتوان از ماشین‌های باد استفاده نمود، تانک‌های سوخت موتور آنها باید پر باشند و موتور از قبل آماده و تست شده باشد. برای بخاری‌ها، تانک‌های سوخت باید پر و چک گردند. در مورد آبپاش‌ها، خطوط لوله‌ها و نازل‌ها باید تمیز شوند. این آمادگی و تدارک، پیش از فصل یخ‌بندان و در فواصل مشخص طی فصل سرما صورت می‌گیرد. در روزهایی که یخ بندان پیش‌بینی می‌شود، باغداران باید اغلب وسایلشان را جهت اطمینان از اینکه درست کار می‌کند، مورد بررسی قرار دهند.

۲-۲) تعیین دمای بحرانی

دمای بحرانی نقطه‌ای است که خسارت به جوانه‌ها اتفاق خواهد افتاد. این دما به نوع درخت، وارسته میوه و نیز به مرحله رشد و نمو و شرایط آب و هوایی منطقه بستگی دارد. اکثر باغداران معمولاً از دمایی استفاده می‌کنند که طی آن ۱۰٪ جوانه‌ها از بین می‌روند، این دمای بحرانی مورد انتظار است و سردتر از آن به حد بحرانی می‌رسد. همه باغداران باید جدول دمای بحرانی را در اختیار داشته باشند (دماهایی که منجر به ۱۰٪ و ۹۰٪ مرگ جوانه طی ۳۰ دقیقه در مراحل مختلف رشد و نمو برای محصولات مختلف می‌شوند). مثلاً "در مورد سیب، تفاوت میان مرگ سبک ده درصدی و احتمالاً مرگ شدید ۹۰٪ قبل و بعد از غنچه‌دهی، حدود 2°C یا کمتر می‌باشد. در مورد سایر محصولات حساسیت مشابهی به تغییرات اندک دما وجود دارد.

در برخی از مناطق دنیا در فواصل زمانی مشخص طی یخ‌بندان، آزمون‌های مقاومت جوانه‌ها انجام شده و دماهای بحرانی تعیین می‌گردد و از طریق رادیو به باغداران اعلام می‌شود. برخی تولیدکنندگان همچنین، به آزمون‌های مقاومت جوانه که توسط یک شرکت محلی تولید میوه انجام می‌شود، دسترسی دارند ولی هیچ‌کدام از تولیدکنندگان جوانه‌های خود را تست نمی‌کنند. بعضی تولیدکنندگان همچنین دماهای بحرانی را بسته به شرایط آب و هوای موجود تنظیم می‌کنند. اگر باغی طی چند روز مواجه با هوای سرد باشد، جوانه‌ها مقاوم‌تر خواهند شد. از آنجا که دماهای بحرانی موجود در جدول، متوسط و میانگین هستند، باید توسط افراد تولیدکننده برای شرایط مختلف در باغشان، طی یک فصل بخصوص، تعدیل و تنظیم شوند. در نتیجه، یک عدم اطمینان در مورد اینکه جوانه‌ها چه دماهایی را می‌توانند تحمل کنند وجود دارد. آزمون‌های مقاومت در جوانه طی فصل، عدم اطمینان نسبت به این مورد را تا حدی کاهش می‌دهد ولی به یک باغ خاص اختصاص ندارد. بعضی از باغداران، آگاهانه و عمدتاً دمای بحرانی را در بعضی مواقع در طول روز تعیین می‌کنند و بقیه، از راه‌های غیرمرسوم و حسی استفاده می‌کنند. همه تولیدکنندگان از یک دمای بحرانی خاص برای باغ خود هنگامی که غروب می‌شود، در نظر می‌گیرند.



۲-۳) دستورالعمل برای پیش‌بینی

همه تولیدکنندگان معمولاً "هرشب گزارش اعلام دمای حداقل در منطقه خود را از طریق رادیو و تلویزیون گوش می‌دهند و در نتیجه از شرایط کلی مورد انتظار چند روز آینده را مطلع می‌شوند. توجه خاص به هر تغییر که طی شب انتظار می‌رود مانند حرکت ابرها یا تغییر جهت باد یا حذف شدن ضروری است. دمای نقطه شبنم نیز معمولاً "به وسیله ایستگاه مستقر در فرودگاه نزدیک منطقه در ساعات ۴ و ۷ بعدازظهر گزارش می‌شود.

باغداران به طور تجربی می‌دانند که کدام یک از ایستگاه‌های پیش‌بینی به باغشان شرایط مشابه‌تری دارد (براساس شرایط دما) و معمولاً می‌توانند بیان کنند که دمای باغ چقدر گرم‌تر یا سردتر می‌باشد (نسبت به شرایط ایستگاه). سپس براساس پیش‌بینی انجام شده در منطقه پیش‌بینی خود را تنظیم می‌کنند.

۲-۴) استفاده از دستگاه اعلام یخ‌بندان Frost Alarm

تولیدکنندگان معمولاً، از زنگ‌های اعلام‌کننده خطر یخ‌بندان استفاده می‌کنند. این ابزار آژیر اعلام‌کننده خطر یخ‌بندان حسگرهایی هستند که در باغ یا در یک منطقه‌ای قرار داده می‌شوند که دمای مشابه با دمای باغ دارد. یک زنگ اعلام‌کننده، معمولاً در زیر تخت باغدار قرار می‌گیرد و زمانی که دمای بیرون به سطح تنظیم شده می‌رسد (معمولاً چند درجه بالای دمای بحرانی) به کار می‌افتد و باغدار را مطلع می‌سازد. غالب تولیدکنندگان یک قانون خاص تجربی برای تنظیم و شروع راه‌اندازی آلارم دارند. البته این قانون با پیشرفت فصلی تفاوت می‌کند.

۲-۵) کشیک شبانه

وقتی آلارم یخ‌بندان فعال می‌شود، تولیدکننده بیدار می‌شود، یک دوره کشیک آغاز می‌شود. تولیدکننده در باغ می‌چرخد، کشیک می‌دهد و دوره‌های درجه حرارت‌های بحرانی را مشخص می‌کند. بعضی تولیدکنندگان از وسایل الکترونیکی برای نمایش مداوم دما استفاده می‌کنند. آنها همچنین از رادیو به اخبار وضعیت آب و هوا که نقاط شبنم را اطلاع می‌دهد و هر نوع تغییر در شرایط آب و هوا را اعلام می‌کند، گوش می‌دهند. یک باغدار حتی اگر ببیند همسایه‌اش بیدار نیست، معمولاً او را از خطر آگاه می‌کند.

۲-۶) تصمیم‌گیری برای اعمال حفاظت

در صورتی که همه ابزار و وسایل به درستی کار کنند، شروع به کار یک سیستم حفاظتی باید واقعاً آنی باشد. بعضی مواقع تولیدکنندگان ماشین‌ها را روشن می‌کنند و آنها را با ادامه کاهش دماها تنظیم می‌کنند. حدود ۵ دقیقه طول می‌کشد تا ماشین‌ها به حد کافی هوای مخلوط ایجاد کنند تا مؤثر باشد. شروع کار و روشن کردن آبپاش‌ها آسان‌تر است. باغدار فقط باید یک دریچه را برگرداند و در بیشتر مواقع، یک پمپ را روشن نماید. تعدادی از ماشین‌های باد الکتریکی و بعضی



آبپاش‌ها مجهز به کلیدهای روشن‌کننده خودکارند یا سوپاپ خودکار دارند که دستگاه‌ها را در یک دمای تنظیمی روشن می‌کنند.

تولیدکنندگان، حفاظت اولیه را در زمانی که دمای محیط چند درجه بالاتر از دمای بحرانی است، آغاز می‌کنند. این تصمیم به میزان کاهش دمای مشاهده شده، دمای نقطه شبنم و پیش‌بینی دمای حداقل بستگی دارد. اگر نقطه شبنم پایین باشد، شب صاف و آرام است و اگر پیش‌بینی دما پایین باشد، تولیدکنندگان برای یک کاهش و افت سریع درجه حرارت آماده می‌شوند و حفاظت را زودتر از موقعی که نقطه شبنم بالا باشد یا پوشش ابر پیش‌بینی شود، آغاز می‌کنند. به دلیل آنکه زمان کوتاه است ابزارهای حفاظت از پیش آماده می‌شوند و در زمان شروع، تنظیمات جزئی کفایت می‌کند.

تولیدکنندگان به نمایش و ثبت دما در زمانی که وسایل حفاظتی راه‌اندازی می‌شود ادامه می‌دهند و اگر شرایط بهبود یابد، کار حفاظت راحت و آسان خواهد شد. در مورد برخی باغداران، حفاظت یک فرآیند متوالی است که یک سری مراحل دارد. آنها شاید برای حفاظت از مناطق مختلف در زمان‌های متفاوت تصمیم بگیرند. در صورت داشتن بخاری، تصمیم می‌گیرند که هنگامی که دما خیلی پایین می‌افتد، آن را همراه با ماشین‌های باد استفاده کنند.

خشک بودن هوا عموماً" مقارن با زمان قبل از آغاز ماه نو یا بلافاصله قبل از کامل شدن قرص ماه و یا در زمان کامل بودن آن می‌باشد. احتمالاً شدت جزر و مد نیز با مقدار آبی که در زمان ماه نو یا کامل بودن قرص ماه تأخیر می‌شود و به هوا می‌رود و نیز با شدت بارندگی‌های بعد از آن، به نوعی ارتباط دارد. زمان خشک بودن هوا همان زمان وقوع یخبندان است. هنگامی که رطوبت افزایش یابد، موجب افزایش دمای نقطه شبنم می‌گردد که این عامل به تنهایی می‌تواند مانع از وقوع دماهای بحرانی گردد، این شرایط تا هنگامی برقرار است که هوای خشک مجدداً" از طریق مکانیزمی، جایگزین هوای مرطوب گردد. البته وقوع دماهای حداقل بحرانی را نمی‌توان تنها نتیجه سرد بودن هوا دانست، بلکه میزان خشک بودن هوا و به مقدار کمتری، میزان مرطوب بودن خاک نیز بر وقوع این دماها اثر دارند. بنابراین تا زمان ارائه پیش‌بینی‌های مربوط به اول ماه، باید منتظر ماند. شاید اگر برنامه‌ریزی برای کاشت گیاهان، بر مبنای علائم برج‌های سال و آثار طالع بینی انجام نگیرد و ارتباط احتمالی بین مقادیر مختلف دماهای پایین شبانه و میزان بارندگی در یک دوره زمانی معین، مشخص می‌شود، آنگاه دریابیم که اطلاعات مربوط به ماه را می‌توان به عنوان معیار قابل‌توجهی جهت برنامه‌ریزی در بخش‌های خاصی از کشور مد نظر قرار داد.

۳- به کارگیری روش حفاظتی

روش‌های حفاظتی به دو نوع فعال و غیر فعال تقسیم می‌شوند.

حفاظت غیر فعال شامل روش‌هایی است که در زمان قبل از فرا رسیدن شب‌های یخبندان انجام می‌شود تا نیاز به اجرای روش‌های فعال برطرف شود.

برای مثال عملیات مدیریتی غیرفعال شامل موارد زیر است:

۱. انتخاب مکان



۲. مدیریت زهکشی هوا
۳. انتخاب گیاه
۴. درختکاری در پوشش گیاهی
۵. مدیریت تغذیه گیاه
۶. هرس به موقع
۷. سرمادهی به منظور تأخیر در شکوفه‌دهی
۸. استفاده از مواد شیمیایی جهت تأخیر در شکوفه‌دهی
۹. پوشاندن گیاه
۱۰. خودداری از عملیات خاک‌ورزی
۱۱. آبیاری صحیح
۱۲. حذف گیاهان پوششی
۱۳. پوشاندن خاک
۱۴. رنگ زدن تنه درخت
۱۵. پوشاندن تنه درخت
۱۶. کنترل باکتری‌ها
۱۷. تیمار بذرها با مواد شیمیایی

مدیریت مناسب در هر یک از روش‌های حفاظتی غیرفعال در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

روش‌های حفاظتی فعال شامل اقداماتی است که در شب‌های وقوع یخبندان به منظور تعدیل و کاهش اثرات دماهای زیر صفر درجه انجام می‌گیرد. این روش‌ها عبارتند از:

۱. بخاری‌ها
۲. ماشین‌های باد
۳. بالگردها
۴. آب‌پاش‌ها
۵. آبیاری سطحی
۶. عایق‌سازی با کف
۷. مه‌سازها
۸. روش‌های ترکیبی فعال



هزینه هر یک از این روش‌ها متغیر است و به امکانات و قیمت‌های محلی بستگی دارد. اما سود حاصل از استفاده از این سیستم‌ها به سایر موارد استفاده از آنها هم بستگی دارد (مثلاً آب‌پاش‌ها را می‌توان برای آبیاری هم استفاده کرد). هزینه‌ها و سود اقتصادی حاصل از سیستم‌های مختلف در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار گرفته است. همچنین تئوری عملکرد، مدیریت مناسب و مزایا و معایب هر یک از روش‌های حفاظتی فعال، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. روش‌های غیرفعال معمولاً در دوره‌های درازمدت اجرا می‌شوند و کمتر از روش‌های فعال هزینه دارند و اغلب همین حسن آنها بس که با استفاده از آنها دیگر نیازی به حفاظت فعال وجود نخواهد داشت. در ادامه مهم‌ترین روش‌های حفاظتی غیرفعال که در سطح دنیا جهت مقابله با خسارت‌های یخبندان مورد استفاده قرار می‌گیرند و قابلیت تطبیق با شرایط کشور جمهوری اسلامی ایران و به کارگیری در مناطق مختلف کشور را دارند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱) روش‌های حفاظتی غیرفعال

۳-۱-۱) انتخاب و مدیریت مکان

کشاورزان معمولاً با برخی نقاط مزرعه یا باغ که بیشتر مستعد خسارت دیدن از یخبندان هستند، آشنایی دارند. اولین مرحله در انتخاب یک مکان برای کاشت یک گیاه جدید گفتگو با مردم محلی درباره محصولات و ارقام مناسب برای منطقه می‌باشد. کشاورزان محلی و بازدیدکنندگان اغلب به طور حسی می‌دانند که کدام مناطق ممکن است دارای مشکلات زیادی از این نظر باشند. مشخصاً نقاط گود در توپوگرافی یک محل دمای سردتری دارند و بنابراین در آنها بیشتر آسیب دیده می‌شود. با این حال ممکن است گاهی در بخشی از منطقه مورد کشت و نه در سایر بخش‌ها، بدون آنکه تفاوت‌های توپوگرافیکی در ظاهر دیده شود، خسارت رخ دهد. در برخی موارد این می‌تواند به دلیل تفاوت‌های نوع خاک باشد که ممکن است هدایت و ذخیره گرما در خاک را تحت تاثیر قرار دهد. خاک‌های شنی خشک گرما را بهتر از خاک‌های رسی سنگین انتقال می‌دهند و هر دو بهتر از خاک‌های پیت (آلی) گرما را ذخیره و منتقل می‌کنند. هنگامی که محتوای آب خاک تقریباً به حد ظرفیت مزرعه رسید (یک یا دو روز پس از مرطوب شدن کامل خاک)، خاک در وضعیتی است که برای انتقال گرما و ذخیره بسیار مناسب می‌باشد، با این حال خاک‌های آلی صرف نظر از محتوای آب در انتقال و ذخیره گرما ضعیف عمل می‌کنند. وقتی قرار است مکانی به ویژه در یک ناحیه مستعد یخبندان، انتخاب شود باید از کاشت محصول در خاک‌های آلی اجتناب کرد.

هوای خنک متراکم‌تر از هوای گرم است، بنابراین به طرف پایین تپه سرازیر می‌شود و در نقاط پست و پایین مانند آب سیلاب جمع می‌شود. بنابراین فرد باید از کاشتن گیاه در چاله‌های سرد پایین دست اجتناب کند، مگر آنکه روش‌های حفاظت فعال مناسب (از نظر هزینه) در استراتژی مدیریت طولانی مدت وی منظور شود. این مسئله در هر دو مقیاس منطقه‌ای و مزرعه‌ای حائز اهمیت است. برای مثال، در یک مقیاس ناحیه‌ای، پایین دره مجاور رودخانه‌ها معمولاً سردتر



از بالای شیب‌ها می‌باشد. همچنین می‌توان از روی نقشه‌های توپوگرافیکی، جمع‌آوری داده‌های مقادیر دما و مکان‌یابی از طریق مشاهده جاهایی که در آنجا اولین مه‌های زمینی در سطح پایین تشکیل می‌شوند، نسبت به تعیین این نقاط اقدام کرد. چاله‌های پایین دست همواره شب‌های سردتری دارند، به‌ویژه در مواقعی که آسمان صاف و وزش ضعیف باد در سراسر سال، وجود دارد. اندازه‌گیری‌های دما برای شناسایی چاله‌های سرد می‌تواند در هر زمان از سال انجام شود. کاشت گیاهان برگ‌ریز در شیب‌هایی که با نور خورشید مواجه نیستند، موجب تأخیر در شکوفایی گل‌ها در بهار می‌شود و اغلب باعث حفاظت گیاه می‌شود. درختان نواحی نیمه‌حاره ای را می‌توان به خوبی در شیب‌های رو به خورشید جایی که خاک و گیاه انرژی مستقیم نور خورشید را بیشتر دریافت و ذخیره می‌کند، کشت نمود.

۳-۱-۲) زهکشی هوای سرد

گاهی اوقات برای کنترل جریان هوا در اطراف مناطق کشاورزی از درختان، بوته‌ها، پشته‌های خاک، ساقه‌های علوفه (کاه) و حصارها استفاده می‌شود. استقرار درست آنها و قرار دادن آنها در مکان‌های مناسب می‌تواند بر پتانسیل خسارت یخ‌بندان موثر باشد. با مطالعه دقیق نقشه توپوگرافی، اغلب می‌توان از مشکلات شدید سرمازدگی جلوگیری کرد. همچنین می‌توان از بمب‌های دودزا یا سایر ابزارهای تولیدکننده دود جهت مطالعه مسیر جریان هوای سرد به طرف پایین شیب در شب استفاده نمود. این مطالعات و آزمایش‌ها باید در شب‌های با خصوصیات یخ‌بندان تشعشعی انجام شود ولی ضرورتی ندارد که دما به زیر نقطه صفر رسیده باشد. هنگامی که الگوی جریان زهکشی هوای سرد شناخته شد، قرار دادن مناسب موانع منحرف‌کننده جریان هوا می‌تواند درجه بالایی از حفاظت را فراهم آورد.

اگر محصولی قبلاً در یک چاله سرد کشت شده باشد، چندین عملیات مدیریتی وجود دارد که می‌تواند به کاهش شانس خسارت ناشی از یخ‌زدگی کمک کند. هر مانعی را که مانع از زهکشی هوای سرد از کنار یک گیاه به سمت پایین شیب می‌شود باید حذف کرد. این موانع شاید پرچین‌ها، حصارها، لنگه‌های کاه یا پوشش گیاهی متراکم در پایین شیب مزرعه باشند. گاهی تسطیح مزرعه (زمین) می‌تواند زهکشی هوای سرد یک محصول را بهبود بخشد، به گونه‌ای که ورود هوای سرد برای عبور از بین محصول ادامه یابد. ردیف‌های درختان در باغستان‌ها و تاکستان‌ها باید طوری طراحی شوند که زهکشی مطلوب و طبیعی هوای سرد به خوبی از میان آنها انجام شود. با این حال باید محاسن ایجاد ردیف‌های طراحی شده محصول برای افزایش زهکشی هوای سرد در مقابل مضرات آن از قبیل فرسایش و سایر مشکلات، سنجیده و متعادل شود.

۳-۱-۳) انتخاب بوته

انتخاب گیاهان دیرگل‌ده و گیاهان دارای تحمل بیشتر به یخ‌زدگی به منظور کاهش احتمال خسارت در اثر یخ‌بندان بسیار مهم می‌باشد. برای مثال در درختان میوه و تاک‌های برگ‌ریز مشخصاً "به تنه، شاخه‌ها یا جوانه‌های در حال خواب خسارتی وارد نمی‌شود، ولی میوه‌های کوچک در مرحله گلدهی و نمو خسارت می‌بینند. انتخاب گیاهان برگ‌ریز که خواب جوانه‌های آنها دیر می‌شکند و دیر گل می‌دهند، از نظر حفاظت در مقابل سرما خیلی موثر است، زیرا احتمال و ریسک



خسارت یخ‌بندان به سرعت در بهار کاهش می‌یابد. در مرکبات انتخاب ارقام دارای مقاومت بیشتر اهمیت دارد. برای مثال لیموها کمترین تحمل را به خسارت یخ‌بندان دارند.

برای گیاهان مزرعه‌ای و یکساله و گیاهان ردیفی، تعیین تاریخ کاشتی که در آن تاریخ پتانسیل دمای زیر صفر در حداقل ممکن باشد، اهمیت دارد. در برخی موارد محصولات مزرعه‌ای و ردیفی یک‌ساله مستقیماً در محیط اصلی بیرون کشت نمی‌شوند، بلکه در محیط‌های حفاظت شده کاشته می‌شوند و پس از رفع خطر یخ‌زدگی به محیط اصلی انتقال می‌یابند. اگر امکان اجتناب از دماهای یخ‌زدگی وجود نداشته باشد، آنگاه باید گیاهان بر اساس تحمل آنها به دماهای زیر صفر، جهت کاشت انتخاب شوند.

۳-۱-۴ پوشش (کنوپی) درختان:

در برخی از کشورها نظیر کالیفرنیا، جنوبی در ایالات متحده، کشاورزان مرکبات و خرما را با هم می‌کارند، بخشی از دلیل این کار این است که درختان خرما موجب حفاظت مرکبات در برابر یخ‌بندان می‌شوند. چون خرما یک محصول تجاری و بازار پسند است، این کار یک روش موثر و مفید برای حفاظت گیاهان در برابر یخ‌بندان، بدون تلفات اقتصادی می‌باشد. همین‌طور در Alabama برخی کشاورزان درختان pine را با درختان کوچک Satsuma mandarin در بین هم می‌کارند. درختان pine موجب افزایش تابش طول موج بلند به سوی پایین می‌شوند و باعث حفاظت گیاهان mandarin می‌گردند. دربرزیل درختان سایه‌دار (Shade tree) برای محافظت از درختان قهوه از خسارت یخ‌بندان استفاده می‌شوند.

۳-۱-۵ مدیریت کوددهی گیاه:

درختان بیمار نسبت به خسارت یخ‌بندان حساسیت بیشتری دارند. کوددهی باعث افزایش سلامت گیاه می‌شود. همچنین درختانی که به طور مناسب کوددهی نشده‌اند، خیلی زود در پاییز برگ‌های خود را از دست می‌دهند و در بهار زودتر از موقع به شکوفه می‌نشینند. این مسأله موجب حساسیت بیشتر آنها نسبت به خسارت سرما می‌شود. با این حال رابطه میان مواد غذایی خاص و افزایش مقاومت تا حدی مبهم است و در مقالات تناقض‌ها و تفاسیر ناقص زیادی وجود دارد. به طور کلی دادن کود از ته و فسفات قبل از وقوع یخ‌بندان موجب تحریک رشد و افزایش حساسیت گیاه در برابر سرما می‌شود. به منظور افزایش مقاومت گیاهان، باید از به کار بردن کود از ته در اواخر تابستان یا اوایل پاییز اجتناب نمود. با این حال فسفر برای انجام تقسیم سلولی حائز اهمیت است و در نتیجه برای بهبود دوباره گیاه پس از خسارت یخ‌زدگی اهمیت دارد. پتاسیم اثر مطلوبی روی تنظیم آب و فتوسنتز در گیاه دارد. با این حال محققین درباره فواید پتاسیم در حفاظت گیاهان از یخ‌زدگی اختلاف نظر زیادی دارند.

گیاهانی که با مقادیر بهینه و متعادل عناصر غذایی رشد می‌کنند می‌توانند دماهای پایین را بهتر تحمل کنند و آسیب‌های ناشی از سرما در آنها خیلی سریع‌تر بهبود می‌یابد. یک گیاه سالم نقطه یخ‌بندان پایین‌تری دارد، لذا به کار بردن کود برای سالم نگهداشتن گیاه ضروری است. توصیه میزان کود و زمان مناسب کوددهی از محلی به محل دیگر متفاوت

است. برای مثال در منطقه فلوریدای آمریکا، گیاهان زینتی را چهار بار در سال کود می‌دهند و یا در فصل پاییز لازم است مقدار کود مصرفی کاهش یابد، زیرا مصرف عناصر غذایی توسط گیاه در فصل سرد سال کاهش می‌یابد.



0 lb

60 lb

نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای نشان داده است که سطح نیتروژن خاک قابل دسترس گیاه معمولاً "تأثیری بر پتانسیل مقاومت به سرما ندارد، مگر آنکه نیتروژن در زمان کاشت در محل ردیف کاشت قرار گیرد. زیرا کودهای اوره و نیترات آمونیوم، هر دو در صورتی که در ردیف بذر قرار گیرند، موجب کاهش تعداد و اندازه گیاهچه‌ها خواهند شد، به ویژه هنگامی که خاک در زمان کاشت خشک باشد. کود اوره در مقایسه با نیترات آمونیوم خسارت‌های شدیدتری وارد می‌کند. قرار دادن اوره و نیترات آمونیوم در فاصله حداقل ۲/۵ سانتی‌متر از محل بذر می‌تواند آسیب‌های وارد بر گیاهچه را به حداقل برساند. نیترات آمونیوم را می‌توان در مقادیر کم در محل ردیف بذر قرار داد، با این حال حتی در مقادیر کم نیز پس از وقوع تنش‌های شدید سرما، میزان از بین رفتن گیاهان در اثر کود قرار گرفته در محل بذر، افزایش زیادی می‌یابد.

۳-۱-۶) مدیریت آفات:

استفاده از آفت‌کش‌های روغنی بر روی مرکبات باعث افزایش خسارت گیاهان از یخ‌بندان می‌شود. بنابراین باید از به کار بردن این مواد قبل از فصل سرما برای مدت کوتاهی خودداری گردد.

۳-۱-۷) هرس مناسب:

در تاکستان‌ها هرس دیر هنگام به منظور به تأخیر انداختن رشد و شکوفه‌دهی درختان توصیه می‌شود. هرس شدید را باید تا زمان شروع رشد مجدد گیاه به تأخیر انداخت تا بافت چوبی زنده بریده نشود. باغدار باید در ماه شهریور (آگوست) از هرس سنگین خودداری کند (هرس سبک مشکل‌ساز نیست)، زیرا رشد جدید گیاه را تحریک می‌کند و گیاه فرصت آنکه قبل از یخ‌بندان بالغ شود نخواهد داشت. همچنین در اواخر پاییز نیز نباید هرس سنگین انجام داد زیرا تا زمانی که محل بریدگی‌ها التیام یابد، مقاومت به سرمای گیاه شدت می‌یابد. گیاهان چوبی در ۴ تا ۶ هفته پس از اولین



یخ‌زدگی شدید زمستانه، نباید هرس شدید شوند. پس از وقوع یخ‌بندان می‌توان هرس سبک انجام داد. از هرس گیاه در تابستان و اوایل پاییز باید خودداری شود. زیرا این کار باعث برهم خوردن تعادل هورمونی گیاه و بازشدن جوانه‌های رویشی جانبی و آغاز رشد مجدد شود. این رشد جدید باعث افزایش حساسیت در برابر سرما می‌شود.

۳-۱-۸) پوشاندن گیاهان با پوشش‌های مناسب

پوشش‌های ردیفی روی گیاه گرم‌تر از آسمان صاف می‌باشند و بنابراین این پوشش‌ها موجب افزایش تابش امواج طول موج بلند به سمت پایین در شب می‌شوند. به‌علاوه این پوشش‌ها موجب کاهش جریان گرمای انتقالی به هوا و تلفات گرما می‌شوند. پوشش‌های کلشی و مواد مصنوعی هم معمولاً استفاده می‌شوند. به دلیل هزینه‌های کارگری، این روش عمدتاً در کشت‌های کوچک و گیاهان کم ارتفاع که نیاز به چارچوب محکم ندارند، به‌کار می‌رود. گاهی اوقات مشکلات بیماری به دلیل تهویه ناقص بروز می‌یابد.

پلاستیک‌های پلی پروپیلن ریسیده شده یا بافته شده گاهی برای حفاظت محصولات بسیار با ارزش استفاده می‌شود. در این موارد درجه حفاظت تأمین شده، از حدود ۱ تا ۵ درجه سانتی‌گراد بسته به ضخامت پلاستیک متفاوت است. پلاستیک سفید گاهی بر فراز ردیف نشاها به‌کار می‌رود، اما برای درختان میوه و سبزیجات نمی‌توان از آن استفاده کرد. در برخی از مناطق، پوشش تاکستان‌ها با پلی اتیلن سیاه برای افزایش دمای هوای مجاور برگ‌ها تا حد ۱/۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. پلاستیک شفاف عموماً موثرتر است.

۳-۹-۱) اجتناب از خاک‌ورزی

انجام هرگونه خاک‌ورزی موجب ایجاد فضاهای هوا در خاک می‌شود. بنابراین باید طی دوره‌های مستعد یخ‌بندان از انجام این عملیات اجتناب شود. هوا یک هادی ضعیف گرماست و دارای گرمای ویژه پایینی می‌باشد. بنابراین خاک‌های دارای فضاهای هوای بیشتر و بزرگتر، گرمای کمتری را انتقال می‌دهند یا ذخیره می‌کنند. اگر خاکی مورد عملیات خاک‌ورزی نظیر شخم قرار گرفته باشد، باید از طریق فشردن و آبیاری، به انتقال و ذخیره گرما در آن کمک کرد و از این طریق این مشکل را بهبود بخشید.

۳-۱-۱۰) آبیاری صحیح

وقتی خاک‌ها خشک هستند، فضاهای هوای بیشتری وجود دارد که باعث جلوگیری از انتقال و ذخیره گرما در خاک می‌شوند. بنابراین در سالهای خشک، حفاظت از یخ‌زدگی از طریق مرطوب کردن خاک‌های خشک بهبود می‌یابد. هدف نهایی، نگهداری محتوای آب خاک در حدود ظرفیت مزرعه (fc) است که همان محتوای آب خاک ۳-۱ روز پس از مرطوب کردن کامل و سراسری می‌باشد. مرطوب کردن عمیق خاک (تا عمق زیاد خاک) ضرورتی ندارد، زیرا بیشتر انتقال و ذخیره روزانه گرما در عمق بالاتر از ۳۰ سانتی‌متر رخ می‌دهد. مرطوب کردن خاک اغلب موجب تیره‌تر شدن خاک



می‌شود و در نتیجه باعث افزایش جذب تشعشع خورشیدی در خاک می‌گردد. هنگامی که سطح خاک مرطوب است، تبخیر نیز افزایش می‌یابد و هدررفت انرژی به صورت بخار منجر به کاهش مزایای حاصل از جذب بهتر انرژی تابشی می‌شود. بنابراین بهترین کار، مرطوب کردن مناسب خاک‌های خشک پیش از وقوع یخبندان است، به طوری که خورشید بتواند خاک را گرم کند.

۳-۱-۱۱) حذف گیاهان پوششی از مزرعه یا باغ

برای حفاظت غیرفعال در برابر یخبندان بهتر است کلیه گیاهان پوششی از باغات و تاکستان‌ها حذف شود. حذف گیاهان پوششی موجب افزایش جذب تابشی خاک می‌شود و انتقال و ذخیره گرما در خاک را بهبود می‌بخشد. گیاهان پوششی همچنین موجب افزایش تراکم باکتری‌های فعال تشکیل دهنده هسته یخی (INA)، در مقایسه با بسیاری از گیاهان باغی و مو می‌گردند. بنابراین وجود گیاهان پوششی در سطح باغ و تاکستان، باعث افزایش تراکم باکتری‌های INA روی گیاهان شده، و پتانسیل خسارت حاصل از یخبندان را افزایش می‌دهند.

معمولاً "وجین علف‌های هرز، شخم زدن و اسپری آفت‌کش‌ها، روش‌هایی هستند که جهت حذف گیاهان پوششی از سطح مزرعه یا باغ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورت امکان، گیاهان پوششی باید خیلی زود وجین شوند تا امکان تجزیه بقایا یا حذف آنها از سطح مزرعه یا باغ فراهم شود. موثرترین و کارآمدترین روش برای از بین بردن گیاهان پوششی و یا پایین نگه داشتن رشد آنها استفاده از علف‌کش‌ها است. مجدداً یادآوری می‌شود که این کار باید قبل از وقوع دوره مستعد یخبندان انجام شود.

۳-۱-۱۲) پوشش‌های روی خاک

پوشش‌های پلاستیکی، اغلب برای گرم کردن خاک و افزایش حفاظت در برابر سرما استفاده می‌شوند. پلاستیک شفاف خاک را بیشتر از پلاستیک سیاه گرم می‌کند. مرطوب کردن خاک پیش از استفاده از پلاستیک، موجب افزایش کارایی استفاده از پلاستیک می‌شود و خیلی موثر است. گاهی مالچ‌های گیاهی طی دوره خواب درختان برای کمک به جلوگیری از خسارت به ریشه‌ها در نتیجه یخ‌زدگی و آب‌شدگی خاک، استفاده می‌شوند. با این حال مالچ‌های رویشی انتقال گرما را به خاک کاهش می‌دهند و گیاهان باغی را بعد از شکسته شدن دوره خواب جوانه‌هایشان به یخبندان حساس‌تر می‌کنند. مالچ‌های گیاهی فقط برای مناطقی که خاک یخ می‌زند و مشکل ایجاد می‌کند توصیه می‌شوند. برای باغ‌های دارای درختان غیر برگ‌ریز، هرس دور تنه درختان (دامن درخت)، موجب انتقال بهتر انرژی تابشی به خاک زیر درختان می‌شود و می‌تواند باعث بهبود حفاظت گیاه شود.

۳-۱-۱۳) رنگزدن و پیچیدن پوشش به دور تنه درخت

پوسته تنه درختان برگریز گاهی در نتیجه وجود نوسانات دمایی از یک روز گرم تا یک شب یخبندان ترک می‌خورند. با رنگ کردن تنه با یک رنگ سفید لاتکس محلول در آب، که به میزان ۵۰ درصد با آب رقیق شده باشد در اواخر پاییز وقتی دمای هوا بالای ۱۰ درجه سانتی‌گراد باشد، می‌توان مشکل فوق را کاهش داد. رنگ سفید، عایق‌بندی تنه درخت و استفاده از سایر پوشش‌ها برای پیچیدن دور تنه، در بهبود مقاومت در برابر خسارت یخبندان درختان هلو موثر شناخته شده است. تنه‌ها باید از سطح زمین تا ارتفاع ممکن توسط پوشش مخصوص پیچیده شوند. پوشش‌های عایق فایبرگلاس و پلی‌اورتان با مقاومت بالاتر نسبت به انتقال گرما، بهترین حفاظت را فراهم می‌آورند و در میان پوشش‌های تجاری در دسترس، بهترین هستند. معمولاً پوشش‌های پیچیده شده روی تنه درخت، بعد از ۳-۴ سال باید برداشته شوند. پیچیدن تنه درختان مرکبات جوان با کیسه‌های حاوی آب حتی بهتر از پوشش‌های فایبرگلاس یا پلی‌اورتان، گیاهان را در مقابل سرما حفاظت می‌کند. وقتی تنه، در پوشش پیچیده می‌شود، پتانسیل حمله بیماری‌ها افزایش یافته، و مشکلات مربوط به بیماری‌ها ظاهر می‌شود، بنابراین محل تراکم شکوفه‌ها باید، حداقل در ۱۵ سانتی‌متری بالای زمین قرار داشته باشد. با استفاده از اسپری‌های قارچ کش و پیش از پیچاندن پوشش به دور تنه می‌توان به کاهش مشکلات ناشی از بیماری‌ها کمک نمود.

۳-۱-۱۴) کنترل باکتری‌ها :

برای وقوع یخ‌زدگی، فرآیند تشکیل یخ معمولاً به وسیله باکتری‌های INA آغاز می‌شود. هر چه تراکم این باکتری‌ها در مزرعه بیشتر باشد، احتمال تشکیل یخ بیشتر خواهد شد. پس از تشکیل یخ، بلورهای آن از طریق منافذ سطح بافت گیاهی وارد گیاه شده و در درون گیاهان تکثیر و توسعه می‌یابند. معمولاً علف‌کش‌ها (ترکیبات مس) برای از بین بردن باکتری‌ها استفاده می‌شود. همچنین ممکن است باکتری‌های فعال غیرتشکیل دهنده هسته یخی (NINA)، به عنوان رقیب برای رقابت و کاهش تراکم باکتری‌های INA استفاده شوند. این روش محافظت در برابر یخبندان کاربرد وسیعی ندارد. در ادامه تئوری عملکرد، مدیریت مناسب و مزایا و معایب هر یک از روش‌های حفاظتی فعال، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. اگر چه این نوشتار اطلاعاتی را در مورد مهم‌ترین روش‌های حفاظت در برابر یخبندان ارائه می‌نماید، اما مناسب بودن یا نبودن یک روش حفاظتی به عوامل متعددی بستگی دارد. در اینجا به بررسی مهم‌ترین روش‌هایی که در حال حاضر در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌پردازیم و فناوری‌های مناسب برای کشورهایمان که با محدودیت منابع و امکانات روبرو هستند، معرفی می‌شود.

۳-۲) روشهای حفاظتی فعال :

۳-۲-۱) بخاریها

یک روش برای جایگزینی انرژی از دست رفته از گیاه در شبهای یخبندان، سوزاندن توده‌های سوخت (جامد، مایع یا گاز) در انواع مختلف بخاریهاست. بسته به موقعیت مکانی بخاریها نسبت به گیاهان، مقداری از انرژی تشعشعی حاصل از بخاری، مستقیماً به قسمت‌های مختلف گیاه می‌رسد و دمای آن را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن هوایی که از شعله‌های آتش گرم شده است، آزادانه به حرکت درمی‌آید و در صورتی که باد بوزد یا از ماشین باد در ترکیب با بخاریها استفاده شود، این گرما به گیاهان و هوای داخل و بالای پوشش گیاهی منتقل می‌شود. شرایط آب و هوایی که برای افزایش کارایی بخاریها مناسب است، عبارت است از هوای آرام و بدون وزش باد و وجود وارونگی دمایی شدید. بیش از ۲۰۰۰ سال است که از بخاریها به منظور حفاظت از گیاهان در برابر یخ‌زدگی استفاده می‌شود و اثرات و روش‌شناسی این وسیله امروزه به خوبی شناخته شده است. به طور کل بخاریها به دو نوع تقسیم می‌شوند. بخاریهایی که دمای اشیای فلزی را بالا می‌برند (مانند بخاریهای دودکش‌دار) و بخاریهایی که به صورت آتش روباز عمل می‌کنند. استفاده از بخاری از نظر فنی بسیار مطمئن و قابل اعتماد است و تا قبل از اینکه مشکلات آلودگی هوا و هزینه بالای سوخت نسبت به ارزش گیاهان مطرح نشده بود، اکثر کشاورزان استفاده از این روش را برای مقابله با سرما و یخبندان ترجیح می‌دادند. امروزه در کشورهای توسعه‌یافته، بخاریها تنها به عنوان مکمل در روشهای حفاظتی دیگر و در زمان یخبندانهای شدید و برای گیاهان با ارزش اقتصادی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در شبهای یخبندان، میزان هدررفت انرژی از یک گیاه بیش از انرژی به دست آمده برای آن است و این باعث کاهش دمای گیاه می‌شود. انرژی عمدتاً به صورت تشعشع خالص به هدر می‌رود و تا حدودی به وسیله گرمای محسوس و جریان گرمایی رو به بالا در خاک جبران می‌شود. اگر پدیده تراکم بخار آب (تشکیل شبنم یا یخ) اتفاق افتد، گرمای نهان آزاد شده از این طریق هم می‌تواند بخشی از انرژی هدر رفته را جبران نماید. بخاریها به تأمین انرژی مکمل (Q) برای جایگزین کردن انرژی خالص از دست رفته کمک می‌کنند. اگر گرمای کافی به محیط گیاه اضافه شود و تمامی انرژی از دست رفته جبران شود، دما کاهش نخواهد یافت. با این حال، ناکاراییهایی در عملکرد بخاریها وجود دارد و در برخی شرایط، محدودیت‌های مالی مانع از تأمین انرژی کافی برای بازدهی کامل بخاریها می‌گردد.

با طراحی و مدیریت مناسب بخاریها می‌توان کارایی این وسیله را تا آنجا بهبود بخشید که در زمان اغلب یخبندانهای تشعشعی بتواند گیاه را به خوبی محافظت نماید. با این حال در شرایطی که وارونگی دمایی ضعیف باشد یا وجود نداشته باشد و یا باد بوزد، ممکن است بخاریها نتوانند حفاظت کافی را تأمین نمایند.

بخاریها از طریق تشعشع مستقیم گرما به گیاهان اطراف خود و نیز با اختلاط لایه‌های هوا از طریق جابه‌جایی در درون لایه وارونگی، از گیاهان حفاظت می‌کنند. بخاریهای مایع‌سوز معمولاً در حدود ۳MJ انرژی به ازای هر لیتر سوخت تأمین می‌کنند و انرژی مورد نیاز برای این خروجی، بسته به شرایط شب‌های یخبندان، در حدود ۱۴۰ تا 280 W m^{-2}



(معادل ۵ تا $10 \text{ GJha}^{-1} \text{h}^{-1}$) می‌باشد (بلانک و همکاران، ۱۹۶۳). با تقسیم کردن مقدار انرژی مورد نیاز بر حسب ژول بر هکتار بر ساعت به انرژی خروجی بر حسب ژول بر لیتر، مقدار سوخت مورد نیاز بخاری بین ۱۳۳ تا $265 \text{ Lit ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ به دست می‌آید. تعداد بخاری‌های مورد نیاز هم به سطح حفاظت مطلوب و سرعت سوختن بخاری‌ها بستگی دارد. اگر هر بخاری در حدود یک لیتر در ساعت سوخت مصرف کند، آنگاه با تقسیم کردن مقدار سوخت مورد نیاز به سرعت مصرف سوخت، تعداد بخاری مایع‌سوز مورد نیاز در حدود ۱۳۳ تا ۲۶۵ عدد در هر هکتار به دست می‌آید (H_H). برای افزایش کارایی حفاظت، بهتر است از تعداد بخاری‌های بیشتری استفاده کرد و مصرف سوخت به ازای هر بخاری را پایین نگه داشت.

توزیع بخاری‌ها در مزرعه یا باغ باید به صورت نسبتاً یکنواخت باشد و در حاشیه‌ها، به خصوص در بالادست مسیر وزش باد، بخاری‌های بیشتری قرار داده شود. اگر گیاه مورد نظر بر روی یک شیب واقع شده باشد، لازم است که در بالای شیب که هوای سرد از آنجا به طرف گیاه جریان می‌یابد، بخاری‌های بیشتری قرار داده شود. در شرایط وقوع یخ‌زدگی، هنگامی که سرعت باد از $2/2 \text{ m s}^{-1}$ ($7/9 \text{ Km h}^{-1}$) بیشتر باشد، گرمای بسیار زیادی از طریق جابه‌جایی افقی به هدر می‌رود و بنابراین در حاشیه بالادست مسیر وزش باد به تعداد بخاری بیشتری نیاز است. در نقاط پست که سردتر هستند نیز باید بخاری بیشتری قرار داده شود. ابتدا باید بخاری‌هایی که در قسمت‌های حاشیه‌ای قرار دارند روشن شوند و سپس در صورتی که نیاز باشد، تعداد بیشتری بخاری باید روشن شود (یعنی در صورتی که سرعت باد افزایش یابد یا دما بیشتر کاهش یابد). هزینه کارکرد بخاری‌ها بسیار زیاد است و بنابراین این وسیله معمولاً در ترکیب با ماشین باد و یا به عنوان گرم‌کننده قسمت‌های حاشیه‌ای در ترکیب با آب‌پاش‌ها استفاده می‌شود.

الف) بخاری‌های مایع‌سوز

بخاری‌های مایع‌سوز در اوایل دهه ۱۹۰۰ میلادی به منظور حفاظت در برابر یخبندان توسعه یافتند. با بالا رفتن قیمت نفت و نیز افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد آلودگی هوا، روند استفاده از این بخاری‌ها رو به کاهش گذاشت. امروزه هر چند که بخاری‌های مایع‌سوز در سطح وسیع مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، اما هنوز هم در مناطقی که منع قانونی وجود نداشته و یا قیمت سوخت بالا نباشد، این بخاری‌ها به عنوان یک ابزار حیاتی در مبارزه با یخبندان مطرح هستند. نیروی انسانی مورد نیاز جهت استقرار، سوخت رسانی و تمیز کردن این بخاری‌ها بسیار زیاد است و علاوه بر آن هزینه اولیه تأمین بخاری و سوخت آن خیلی بالاست. معمولاً در هر هکتار باغ، ۷۵ تا ۱۰۰ بخاری نفت‌سوز دودکش‌دار یا ۱۵۰ تا ۱۷۵ بخاری با سوخت پروپان لازم است و توان تولیدی به وسیله یک سیستم بخاری با طراحی و کارایی مناسب، در حدود $1/23 \text{ MW ha}$ (یا 123 W m^{-2}) می‌باشد. سرعت تقریبی مصرف سوخت در بخاری‌های نفت‌سوز در حدود $2/8 \text{ Lit h}^{-1}$ به ازای هر بخاری و در بخاری‌های پروپان‌سوز در حدود $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ به ازای هر بخاری است. در یک شب یخبندان معمولی، بیش از نیمی از انرژی خروجی بخاری‌ها به صورت تشعشع به آسمان و یا از طریق جریان همرفتی به هدر می‌رود، بنابراین گرمایی که به گیاه می‌رسد در مقایسه با گرمای خروجی از بخاری بسیار اندک است. لازم به ذکر است



که این اعداد و ارقام و مقادیر توصیه شده مربوط به باغ‌های بزرگ درختان خزان‌دار است که به وسیله سایر باغ‌های حفاظت شده، احاطه شده‌اند. اما در مورد باغ‌های کوچک یا دورافتاده‌تر ممکن است به تعداد بخاری بیشتری نیاز باشد. انواع مختلفی از بخاری‌ها برای حفاظت در برابر یخبندان وجود دارند. بخاری‌های با شعله روباز (بدون دودکش) معمولاً ارزان‌ترند و حمل و نقل و پر کردن مخزن آنها هم ساده‌تر است و نوسازی آنها با استفاده از قوطی‌های حلبی، رنگ یا نفت به سادگی میسر است. این بخاری‌ها اندازه کوچک‌تری هم دارند و افزایش تعداد آنها جهت اختلاط بهتر هوا بدون وجود اثرات دودزایی، به راحتی امکان‌پذیر است. این کار می‌تواند باعث بهبود حفاظت در برابر یخبندان شود. اما از سوی دیگر به دلیل فرار بودن بیشتر سوخت در این بخاری‌ها، کارآیی مصرف سوخت کمتر و آلودگی هوا بیشتر است. در برخی مناطق، استفاده از این بخاری‌ها برای حفاظت در برابر یخبندان ممنوع است.

قوانین مربوط به آلودگی هوا غالباً سخت‌گیرانه و لازم‌الاجرا هستند و قبل از خرید و استفاده از بخاری‌ها لازم است از قوانین محلی به خوبی آگاهی کسب کرد. قوانین مربوط به استفاده از سوخت‌های مختلف برای حفاظت در برابر یخبندان در اغلب مناطق یک کشور یکسان است. به علاوه در برخی مناطق قوانین خاصی برای استفاده از بخاری‌ها وضع شده است. مثلاً آژانس ایالتی محیط‌زیست در فلوریدا قانونی وضع کرده است که بر طبق آن لازم است در زمان استفاده از بخاری برای حفاظت در برابر یخبندان، دمای هوا با استفاده از یک محفظه هواشناسی کرکره‌ای استاندارد یا یک محفظه مخصوص یخ‌زدگی میوه‌ها به صورت مرتب ثبت شود. به هر حال قبل از استفاده از بخاری‌ها باید تمامی قوانین محلی را به دقت بررسی نمود.

ب) بخاری‌های با سوخت پروپان و گاز طبیعی

همان‌طور که قبلاً بیان شد، کار مورد نیاز برای پرکردن مجدد مخزن بخاری‌های مایع‌سوز خیلی زیاد است. بنابراین برخی کشاورزان به سمت استفاده از سیستم‌های توزیع سوخت مرکزی گرایش پیدا کردند. در این سیستم‌ها سوخت با استفاده از لوله‌کشی به بخاری‌ها می‌رسد. این سوخت می‌تواند گاز طبیعی، گاز مایع، پروپان مایع یا نفت باشد. در سیستم‌های پیشرفته‌تر، علاوه بر توزیع سوخت، عمل اشتعال، تنظیم سرعت سوخت و تنظیم و خاموش کردن شعله هم به طور خودکار انجام می‌گیرد. هزینه اولیه برای نصب و راه‌اندازی سیستم‌های مرکزی زیاد است، اما هزینه کارکردی این سیستم‌ها پایین است. بخاری‌های با سوخت پروپان نیاز کمتری به تمیز کردن دارند و کنترل سرعت سوخت در آنها آسان‌تر از بخاری‌های نفت‌سوز است. همچنین با توجه به کمتر بودن سرعت سوخت در این بخاری‌ها، به تعداد بیشتری از این نوع بخاری در هکتار نیاز است (حدود ۱۳۰ تا ۱۵۰ بخاری در هکتار)، اما حفاظت بهتری با استفاده از این بخاری‌ها تأمین می‌شود. در شرایط یخبندان‌های خیلی شدید، ممکن است تانکر مخزن پروپان یخ بزنند، بنابراین به یک گرمکن بخارساز هم نیاز است تا از یخ‌زدن پروپان در خطوط انتقال گاز جلوگیری کند.



ج) بخاری‌های با سوخت جامد

در سطح جهان تا قبل از آنکه سوخت‌های مایع استفاده شود، برای حفاظت در برابر یخبندان از سوخت‌های جامد استفاده می‌شد. اما با پایین آمدن قیمت سوخت‌های مایع، به ویژه در آمریکای شمالی کشاورزان به سمت استفاده از سوخت‌های مایع گرایش یافتند. هنگامی که محققان دریافتند که نسبت انرژی تشعشعی به کل انرژی آزاد شده از سوخت‌های جامد (مانند چوب، ذغال‌سنگ و کک) در حدود ۴۰ درصد و برای سوخت‌های مایع حدود ۲۵ درصد است (کپنر، ۱۹۵۱)، استفاده از سوخت‌های جامد مجدداً رواج پیدا کرد و بخاری‌های با سوخت جامد بار دیگر احیا شدند. بالا بودن نسبت انرژی تشعشعی به کل انرژی آزاد شده، یک مزیت بزرگ برای سوخت‌های جامد محسوب می‌شود و در شرایط وزش بادهای شدید (مثلاً به هنگام وقوع یخبندان‌های انتقالی) از اهمیت زیادی برخوردار است. اما عیب بزرگ سوخت‌های جامد آن است که با ادامه مصرف سوخت، میزان آزاد شدن انرژی از آن هم کاهش می‌یابد و در شرایطی که به انرژی گرمایی زیادی نیاز است، این عامل محدود کننده خواهد بود (هنز، ۱۹۶۹؛ مورت‌سولف، ۱۹۷۹). یک عیب دیگر این سوخت‌ها هم آن است که اشتعال آنها به سختی انجام می‌گیرد و باید خیلی زودتر روشن شوند. همچنین خاموش کردن شعله سوخت‌های جامد هم مشکل است و اگر نیاز به روشن کردن این سوخت باشد، معمولاً تمامی آن به هدر می‌رود.

انواع مختلفی از سوخت‌های جامد وجود دارند که برای حفاظت در برابر یخبندان استفاده می‌شوند (مانند چوب، کک، تایرهای لاستیکی کهنه، پارافین شمع و ذغال‌سنگ). بعضی از شرکت‌های نفتی هم محصولاتی مانند واکس پترولیوم که یک محصول جانبی پالایش نفت است و کک را به اشکال متنوعی مانند شمع و یا قطعه‌های مکعبی شکل به بازار عرضه می‌کنند، که برای این منظور قابل استفاده‌اند.

در مجموع سوخت‌های جامد در مقایسه با سوخت‌های مایع، نتایج بهتری را در زمینه حفاظت در برابر یخبندان حاصل می‌کنند. مثلاً استفاده از دو شمع تهیه شده از واکس نفت در زیر هر درخت گریپ‌فروت در یک باغ، باعث افزایش میانگین دمای میوه‌ها به میزان $1/7^{\circ}\text{C}$ گردید. بنابراین بازدهی انرژی (یعنی دمای میوه در داخل و خارج پوشش شاخ و برگ درخت) حاصل از شمع‌های واکسی، بیش از دو برابر بازدهی حاصل از سوزاندن سوخت‌های مایع بوده است (میلر، تورل و اوستین، ۱۹۶۶). استفاده از ۳۷۵ قطعه واکس پترولیوم و کک در هر هکتار نیز باعث افزایش دما تا ارتفاع ۱/۱ متری به میزان $2/2^{\circ}\text{C}$ گردید (پارسون، شولتز و لیدر، ۱۹۶۷). مشعل‌های مایع سوز برای گرم کردن دمای هوا در یک پوشش گیاهی به همین اندازه، به دو برابر این مقدار انرژی احتیاج دارند. مثلاً بخاری‌هایی که سوخت آنها از واکس پترولیوم بود، تنها ۶۰ درصد از مقدار انرژی که معمولاً برای تأمین سطح معینی از حفاظت نیاز است را مصرف می‌کنند (شولتز، لیدر و پارسونز، ۱۹۶۸). همچنین با استفاده از قطعات واکس پترولیوم و کک، تعدیل دما در داخل لایه وارونگی در نزدیکی سطح زمین که محل قرار گرفتن گیاه است، به شکل بهتر و مؤثرتری انجام می‌گیرد (ژربر، ۱۹۶۹). بنابراین مسلم است که برای افزایش کارایی حفاظت، بهتر است به جای استفاده از تعداد کمی آتش بزرگ، از تعداد زیادی آتش کوچک استفاده شود.

د) بخاری‌های متحرک

بخاری‌های متحرک در سطح تجاری به عنوان روشی برای حفاظت در برابر یخبندان قابل دسترسی هستند، اما تحقیقات علمی زیادی درباره‌ی این وسیله انجام نشده است. سیستم بخاری متحرک شامل ۴ مخزن ۴۵ کیلوگرمی پروپان است که سوخت مورد نیاز بخاری که بر پشت تراکتور نصب می‌شود را تأمین می‌کنند. یک پروانه‌ی سانتریفیوژی هم در این بخاری تعبیه شده است که هوای گرم شده را به صورت افقی و در جهت عمود بر مسیر حرکت تراکتور به بیرون می‌دهد. پس از روشن کردن بخاری، سوخت آن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که دمای هوای گرم شده در بخاری که به بیرون دمیده می‌شود، در حدود 100°C باشد. در هنگام کار، جریان هوای گرم تا فاصله‌ی ۵۰ تا ۷۵ متری از دو طرف تراکتور می‌رسد. تراکتور به گونه‌ای در امتداد ردیف‌های کاشت حرکت می‌کند که در هر مسیر رفت و برگشت، فضای ناحیه‌ی تحت پوشش بخاری با فضای گرم‌شده در مسیر قبلی هم‌پوشانی داشته باشد. سازندگان این نوع بخاری معمولاً توصیه می‌کنند که تراکتور با سرعتی حرکت کند که در هر ۱۰ دقیقه یک‌بار از یک گیاه عبور کند، بدین ترتیب زمان کافی برای پوشش دادن مزرعه‌ای به مساحت ۵ تا ۷ هکتار با یک تراکتور به دست می‌آید.

نتایج منتشر نشده‌ی برخی از آزمایش‌ها حاکی است که استفاده از بخاری‌های متحرک اثر ناچیزی بر دمای حداقل ثبت شده در باغ‌های تحت حفاظت دارد. البته با توجه به اینکه انرژی گرمایی خروجی از این سیستم بسیار کمتر از انرژی از دست رفته از یک گیاه در شب‌های یخبندان تشعشعی است، رسیدن به چنین نتیجه‌ای هم چندان غیرمنتظره نیست. اما با این حال، در زمان عبور بخاری متحرک از کنار یک گیاه، یک افزایش مقطعی و کوتاه مدت در دمای ثبت شده‌ی گیاه مشاهده می‌شود. این احتمال وجود دارد که همین افزایش دمای کوتاه مدت بتواند مانع از یخ‌زدگی بافت گیاهی شود، اما تحقیقات بیشتری برای تأیید چنین اثری لازم است.

اخیراً برخی محققان پیشنهاد کرده‌اند که اثر مثبت بخاری‌های متحرک ممکن است به خاطر نقش آنها در خشک کردن سطوح گیاهی باشد. از آنجا که آب معمولاً بر روی سطوح خارجی گیاه یخ می‌زند و سپس به داخل بافت گیاه توسعه می‌یابد و باعث یخ‌زدگی در فضای بین سلولی می‌شود، بنابراین می‌توان چنین نظریه‌ای را تا حدودی معتبر دانست. با این حال مسلماً برای تأیید کارآیی واقعی این نوع بخاری‌ها، تحقیقات بسیار بیشتری لازم است.

۳-۲-۲) ماشین‌های باد

ماشین‌های باد (یا پروانه‌ها) که هوا را تقریباً به صورت افقی می‌دمند، در دهه‌ی ۱۹۲۰ به عنوان یک روش حفاظت در برابر یخبندان به کالیفرنیا آمریکا وارد شدند. اما تا دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰، هنوز هم رواج زیادی پیدا نکرده بودند و کشاورزان استقبال زیادی از آن نمی‌کردند. امروزه این وسیله در مناطق زیادی از جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماشین‌های باد امروزه برای حفاظت از انواع مختلف گیاهان شامل انگور، درختان خزان‌دار و مرکبات استفاده می‌شوند.



در حال حاضر تقریباً تمامی باغ‌های مرکبات در کالیفرنیا آمریکا به وسیله ماشین باد در برابر یخبندان حفاظت می‌شوند.

ماشین‌های باد عموماً شامل یک برج فولادی بلند و یک پروانه گردان بزرگ هستند که در نزدیکی رأس این برج قرار می‌گیرد. پروانه ماشین باد معمولاً از نوع دو یا چهار پره‌ای و قطر آن بین ۳ تا ۶ متر است. ارتفاع معمول پروانه‌ها هم در حدود ۱۰ تا ۱۱ متر از سطح زمین است، اما برای پوشش‌های گیاهی کوتاه‌تر ممکن است از برج‌هایی با ارتفاع کمتر هم استفاده شود. تا آنجا که می‌دانیم، پروانه‌ها فقط برای جلوگیری از برخورد با درختان در این ارتفاع نصب می‌شوند و هیچ دلیل آیرودینامیکی خاصی برای انتخاب این ارتفاع وجود ندارد. سرعت چرخش پروانه در ماشین‌هایی که بیشترین کارایی را دارند، در حدود ۵۹۰ تا ۶۰۰ دور در دقیقه است. علاوه بر آن پروانه‌ها هر چهار تا پنج دقیقه یک‌بار حول محور برج می‌گردند. پروانه اغلب ماشین‌های باد با یک زاویه کوچک نسبت به برج (در حدود 7°) نصب می‌شود تا هوا را به طرف پایین بدمد و کارایی آن افزایش یابد. هنگامی که پروانه ماشین باد می‌چرخد، هوا را از بالا به پایین می‌کشد و با یک زاویه اندک به طرف پایین به برج و زمین می‌دمد. نیروی مورد نیاز برای چرخش پروانه معمولاً از یک موتور که در پایین برج نصب می‌شود، تأمین می‌گردد، اما در برخی از ماشین‌های باد قدیمی، موتور در قسمت بالای برج قرار می‌گیرد و به همراه پروانه می‌چرخد. تنظیم کردن نحوه چرخش پروانه‌ها به دور برج به گونه‌ای که پروانه همه ماشین‌ها هوا را به صورت هماهنگ و در یک جهت بدمند، باعث بهبود کارایی ماشین باد در اختلاط لایه‌های وارونگی می‌شود.

قبل از سرمایه‌گذاری در بخش ماشین‌های باد، باید اقلیم منطقه و هزینه‌ها و قیمت‌های محلی به دقت بررسی شود. مثلاً اگر وارونگی دمایی در یک منطقه اتفاق نمی‌افتد یا شدت آن خیلی کم است، نباید در آن منطقه از ماشین باد استفاده کرد. در کالیفرنیا آمریکا از ماشین باد در حد وسیعی در باغ‌های مرکبات استفاده می‌شود و هدف آن اصولاً حفاظت از این باغ‌ها در فاصله ماه‌های دسامبر تا ژانویه است، اما در باغ‌های درختان خزان‌دار از ماشین باد استفاده نمی‌شود، زیرا در ماه‌های زمستان که مرکبات نیاز به حفاظت دارند، در این منطقه وارونگی دمایی شدیدی روی می‌دهد، اما درختان خزان‌دار در بهار نیاز به حفاظت دارند و بنابراین برای حفاظت از درختان خزان‌دار، ماشین‌های باد باید در مناطقی استفاده شود که وارونگی دمایی در ماه‌های بهار شدید باشد.

گزارش‌هایی وجود دارد مبنی بر اینکه ماشین‌های باد در فصل بهار پس از ظهور برگ‌های درختان خزان‌دار، بهتر عمل می‌کنند. در نتیجه در باغ‌های بادام که درختان قبل از ظهور برگ‌ها نیاز به حفاظت دارند، غالباً از ماشین باد استفاده نمی‌شود. توصیه می‌شود که قبل از خرید ماشین‌های باد، ارزیابی‌های دقیقی از روند تغییرات دما و شدت وارونگی‌های دمایی در دوره‌های یخبندان به عمل آید. اگر در این مدت وارونگی‌های دمایی اتفاق نمی‌افتد یا شدت آن کم است، باید از یک روش حفاظتی دیگر استفاده شود.

ماشین‌های باد باید در محلی قرار داده شوند که باعث تشدید جریان طبیعی باد شوند. در برخی موارد هم می‌توان ماشین‌های باد را در محلی نصب کرد که هوای سرد را از نقاط پست به بیرون براند.



نیروی انسانی و هزینه کارکرد ماشین‌های باد خصوصاً ماشین‌های باد برقی، نسبت به سایر روش‌های حفاظتی، پایین‌تر است. اما هنگامی که ماشین‌های باد برقی نصب می‌شوند، کشاورز موظف است که هزینه شارژ شرکت برق را که مربوط به هزینه برق‌رسانی و نگهداری از شبکه است، به طور مرتب پرداخت نماید. این هزینه در هر صورتی، چه ماشین باد کار کند و چه کار نکند، باید پرداخت شود. در واقع امروزه به دلیل افزایش قیمت برق، ماشین‌های باد به یک وسیله پرهزینه برای حفاظت از باغ‌های مرکبات در برخی مناطق کالیفرنیا، تبدیل شده‌اند (ونر و بلانک، ۱۹۹۵).

به طور کلی به جز آلودگی‌های صوتی، ماشین‌های باد از نظر زیست‌محیطی و سالی سالم و سازگار با محیط‌زیست هستند. برای کشاورزانی که به شهرها و مناطق مسکونی نزدیک هستند، آلودگی صوتی ناشی از ماشین باد، مشکل بزرگی به شمار می‌رود. البته این مشکل هم باید در زمان انتخاب یک روش حفاظتی، مورد توجه قرار گیرد.

ماشین‌های باد از طریق افزایش چگالی جریان رو به پایین گرمای محسوس و نیز شکستن لایه‌های مرزی ساکن بر روی سطوح گیاهی، باعث تأمین حفاظت در برابر یخبندان می‌شوند. این ماشین‌ها هرگز گرمایی تولید نمی‌کنند، بلکه گرمای محسوسی که در هوا وجود دارد را به شکل مفیدی توزیع می‌کنند. در واقع ماشین‌های باد هوای گرم بالای خود را با هوای سرد مجاور سطح زمین مخلوط می‌کنند. این ماشین‌ها همچنین با حذف سردترین هوا که در مجاورت برگ‌ها و سطوح گیاهی قرار دارد و جایگزین کردن آن با هوای گرم‌تر، به حفاظت از گیاه کمک می‌کند. مقدار حفاظت تأمین شده در این روش، وابستگی شدیدی به شدت و آرونگی دمایی در شرایط عدم حفاظت دارد. شدت و آرونگی به صورت تفاوت دمای هوا بین ارتفاعات ۱۰ و ۱/۵ متری، در یک باغ حفاظت نشده اندازه‌گیری می‌شود. اصولاً در ناحیه تحت پوشش ماشین‌های باد، میانگین دمای هوا در ارتفاع ۱/۵ متری به حدود یک‌سوم شدت و آرونگی دمایی در آن منطقه می‌رسد. البته مقدار حفاظت تأمین شده در نزدیکی برج ماشین باد بیشتر است و با افزایش فاصله از این برج، مقدار حفاظت مؤثر هم کمتر می‌شود. به طور کلی بازدهی واقعی ماشین‌های باد به شرایط و آرونگی دمایی بستگی دارد و نمی‌توان نکات کلی در مورد آن ارائه کرد. قدر مسلم این‌که هر چه قدر و آرونگی دمایی شدیدتر باشد، حفاظت بهتری از گیاه به عمل می‌آید.

ماشین‌های باد معمولاً هنگامی روشن می‌شوند که دمای هوا به حدود صفر درجه برسد. در شرایط و آرونگی دمایی پایدار، هوا در نزدیکی سطح زمین لایه‌بندی می‌شود و تلاطم و اختلاط هوا بسیار کاهش می‌یابد. با این وجود، آزمایش‌های انجام شده در کالیفرنیا آمریکا و پرتغال نشان داده است که روشن کردن ماشین‌های باد پس از تشکیل و آرونگی دمایی، اثر ناچیزی بر کارایی ماشین دارد. در مدت کمتر از نیم ساعت پس از روشن کردن ماشین باد، دما در ارتفاع ۲ متری افزایش می‌یابد و بعضاً با دمای هوا در ارتفاع ۱۰ متری در یک باغ حفاظت نشده برابر می‌شود. اما از آنجا که دمای یک سطح تشعشع‌کننده در یک شب یخبندان، معمولاً کمتر از دمای هواست و دمای گیاهان هم کمتر از دمای اندازه‌گیری شده در هواست، بهتر است که ماشین‌های باد هنگامی روشن شوند که دمای هوا به حد دمای بحرانی آسیب‌دیدگی گیاه (Tc) می‌رسد.

ماشین‌های باد با جریان عمودی

تاکنون بررسی‌های متعددی در مورد استفاده از ماشین‌های بادی که جریان هوا را در جهت عمودی ایجاد می‌کنند، انجام گرفته است، اما این نوع ماشین‌های عموماً عملکرد ضعیفی دارند. زیرا تلاطم و اختلاط هوا به گونه‌ای است که با درختان تداخل پیدا می‌کند و باعث کاهش مساحت ناحیه تحت پوشش ماشین باد می‌شود. همچنین سرعت بالای باد در نزدیکی پایه برج ماشین باد می‌تواند باعث آسیب دیدن گیاهان باغی و گل‌های زینتی شود. ماشین‌های بادی که هوا را در جهت عمودی به سمت بالا می‌دمند، هم در سطح تجاری وجود دارند و هم آزمایش‌هایی هم بر روی آنها انجام شده است. ایده اصلی در طراحی این نوع ماشین آن است که هوای سرد و سنگین نزدیک سطح زمین کشیده شده و به سمت بالا وزیده شود تا با هوای گرم لایه‌های بالایی مخلوط شود. از نظر تئوری، هوای سرد نزدیک سطح زمین حذف می‌شود و هوای گرم بالایی، پایین می‌آید و بدین ترتیب وارونگی دمایی کاهش می‌یابد. آزمایش‌های محدودی که بر روی این نوع ماشین‌ها انجام گرفته است نشان می‌دهد که کارکردن این ماشین‌ها یک اثر مثبت موقتی بر دمای هوای نزدیک ماشین دارد، اما شدت و مدت زمان دوام این اثر هنوز به خوبی شناخته نشده است.

تحقیقات نشان داده است که این روش تنها در دره‌های کوچک استفاده می‌شود که هوای سرد رانده شده به بالا به سمت پایین بازمی‌گردد و در نزدیکی سطح قرار می‌گیرد. در مناطقی که وزش بادهای غالب در ارتفاعات بالا می‌تواند هوا را در جهت افقی حرکت دهد و از گیاه دور کند، این روش می‌تواند حفاظت بیشتری را تأمین نماید. با این حال تاکنون هیچ تحقیقات و گزارش معتبری در این زمینه ارائه نشده است.

۳-۲-۳) بالگردها

بالگردها هوای گرم لایه‌های بالای وارونگی را به طرف سطح زمین حرکت می‌دهند. اگر وارونگی دمایی وجود نداشته یا ضعیف باشد، بالگردها کارایی نخواهند داشت. از آنجا که هزینه‌های مربوط به نگهداری و کارکرد بالگردها بسیار زیاد است، بنابراین کاربرد این وسیله در حفاظت در برابر یخبندان به موارد اضطراری و گیاهان با ارزش اقتصادی بالا (یعنی در مواردی که روش‌های حفاظتی معمول، کفایت نمی‌کند) محدود شده است.

محققان نظرات مختلفی درباره سطح تحت حفاظت بالگردها ارائه کرده‌اند. مساحت ناحیه تحت پوشش هر بالگرد به اندازه وزن بالگرد و شرایط آب و هوایی بستگی دارد. سطح تحت پوشش یک بالگرد در تحقیقات مختلف، بین ۲۲ تا ۴۴ هکتار برآورد شده است (ایوانز، ۲۰۰۰؛ پاول و هیلیمیریک، ۲۰۰۰). بالگرد باید در هر ۳۰ تا ۶۰ دقیقه یک بار از یک ناحیه عبور کند و در شرایط یخبندان شدید باید به دفعات بیشتری دور بزند. اگر فاصله زمانی بین دو عبور بالگرد خیلی طولانی شود، گیاهان فراسرد می‌شوند و با عبور بالگرد، هسته‌بندی غیرهمگن یخ بر روی گیاهان شروع می‌شود و آسیب‌های بسیار شدیدی بر گیاهان وارد می‌آید.

غالباً در خارج بالگرد تعدادی حسگر دمایی نصب می‌شود و خلبان در ارتفاعی پرواز می‌کند که بالاترین دما را از این حسگر قرائت کند. بهترین ارتفاع پرواز بین ۲۰ تا ۳۰ متر است. سرعت معمول پرواز هم در حدود ۲۵ تا ۴۰ کیلومتر در ساعت (پاول و هیلمیریک، ۲۰۰۰) یا ۸ تا ۱۶ کیلومتر در ساعت (ایوانز، ۲۰۰۰) است. سرعت‌های بالاتر از این مقدار هیچ اثری در تأمین حفاظت ندارند. بالگردهای معمولی می‌توانند دما را بین ۳ تا $4/5^{\circ}\text{C}$ افزایش دهند. خلبان‌ها معمولاً تانکرهای بزرگ آب را هم در بالگرد قرار می‌دهند تا وزن و نیروی بالگرد افزایش یابد. در شرایط یخبندان شدید اگر وارونگی دمایی شدیدی وجود داشته باشد، یک بالگرد می‌تواند در بالای یک بالگرد دیگر و هماهنگ با آن حرکت کند تا انتقال رو به پایین گرما افزایش یابد.

بعضی مواقع در بالای پوشش گیاهی، چراغ‌هایی نصب می‌کنند تا به کمک آنها خلبان تشخیص دهد که از چه ناحیه‌ای پرواز کند. این چراغ‌ها به ترموستات متصل هستند و روشن و خاموش شدن آنها نشان‌دهنده تغییرات دماست. هنگامی که بالگرد از بالای یک ناحیه عبور می‌کند، دما بالا می‌رود و چراغ‌ها خاموش می‌شوند. با سرد شدن هوا و رسیدن دما به مقدار تعیین شده در ترموستات، چراغ‌ها مجدداً روشن می‌شوند. بدین ترتیب خلبان می‌تواند نقاط سرد را شناسایی کند و بر بالای آن پرواز کند. یک نفر دستیار هم باید شرایط دمایی داخل پوشش گیاهی را از روی زمین بررسی کند و با ارتباط دائمی با خلبان بالگرد، وضعیت را به او اطلاع دهد و نواحی سرد را به خلبان معرفی کند.

در دامنه تپه‌ها، هنگامی که هوای سرد به سطح سرایشی می‌رسد، به طرف پایین شیب منتقل می‌شود. بنابراین پرواز بالگرد در بالای شیب‌هایی که گیاه بر روی آن قرار دارد، می‌تواند به حفاظت بیشتر گیاه کمک کند، زیرا اثرات مفید آن (افزایش دما) در ناحیه پایین دست هم احساس می‌شود. هنگامی که دمای هوا در بالادست محل قرارگرفتن گیاه به بالاتر از حد بحرانی برای آسیب‌دیدگی گیاه برسد، پرواز بالگرد هم متوقف می‌شود.

۳-۲-۴) آب‌پاش‌ها

استفاده از آب‌پاش‌ها برای حفاظت در برابر یخبندان این مزیت را نسبت به سایر روش‌های حفاظتی دارد که مصرف آب معمولاً هزینه کمتری دارد. مصرف انرژی در این روش بسیار کمتر از روش بخاری‌هاست (ژربر و مارتسولف، ۱۹۷۶)، و بنابراین هزینه‌های جاری این روش در مقایسه با بخاری‌ها و حتی ماشین‌های باد خیلی کمتر است. کار انسانی مورد نیاز در این روش شامل نظارت بر سیستم جهت عدم توقف احتمالی آن و بررسی نازل آب‌پاش‌ها از نظر عدم یخ‌زدن در شب‌های یخبندان است. علاوه بر حفاظت در برابر یخبندان، آب‌پاش‌ها را می‌توان برای اهداف دیگری از جمله آبیاری، بهبود رنگ میوه‌ها از طریق آب‌پاشی رودرختی و خنک کردن میوه، کاهش سوختگی از آفتاب به وسیله آب‌پاشی رودرختی، تأخیر در شکوفه‌دهی از طریق آبیاری در زمان قبل از شکفتن جوانه‌ها، مصرف کودهای محلول و کاربردهای چند منظوره دیگر نیز مورد استفاده قرار داد. همچنین این روش نسبتاً عاری از آلودگی‌های محیطی است.

بزرگترین عیب روش آب‌پاش‌ها، هزینه بالای نصب و مقدار بسیار زیاد آب مورد نیاز است. در بسیاری از موارد، کمبود منابع آب موجب محدودیت در استفاده از این روش می‌شود. در برخی موارد هم مصرف بیش از حد آب موجب



آب‌گرفتگی خاک و بروز بیماری‌های ریشه‌ای و ممانعت از انجام عملیات خاک‌ورزی و سایر اقدامات مدیریتی می‌گردد. شسته شدن عناصر غذایی از محیط خاک نیز مشکلی است که در نتیجه استفاده زیاد از آب‌پاش‌ها پیش می‌آید. بعضی مواقع، استفاده بیش از حد از آب‌پاش‌ها بر فعالیت باکتری‌ها در خاک تأثیر می‌گذارد و از این طریق باعث تأخیر در رسیدگی میوه‌ها می‌شود (بلانک و همکاران، ۱۹۶۳).

آب هم مانند هوا، گرمای محسوس دارد که با استفاده از دماسنج اندازه‌گیری می‌شود و دمای آب هم با توجه به تغییراتی که در میزان گرمای محسوس آن صورت می‌گیرد، افزایش یا کاهش می‌یابد. کاهش دمای آب به یکی از دلایل زیر اتفاق می‌افتد:

گرمای محسوس آب به محیط اطراف منتقل می‌شود.

آب بخار می‌شود و گرمای محسوس را برای شکستن پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌ها مصرف می‌کند.

گرما از طریق تشعشع خالص از آب به هدر می‌رود.

هنگامی که قطره‌های آب از نازل آب‌پاش‌ها به روی سطح گیاه یا خاک می‌ریزد، مقداری از گرمای محسوس آن از طریق تشعشع از دست می‌رود. مقداری از آن آب گرم به هوای سرد اطراف منتقل می‌شود و مقداری دیگر از گرمای محسوس هم در نتیجه تبخیر از سطح قطرات آب، به گرمای نهان تبدیل می‌شود. تعیین مقدار تبخیر از سطح آب به سادگی امکان‌پذیر نیست، زیرا به عوامل متعددی از جمله دمای آب، کیفیت آب، اندازه قطرات، طول مسیر حرکت آب و شرایط آب و هوایی بستگی دارد.

گرمای حاصل از سرد شدن و یخ‌زدن آب می‌تواند انرژی از دست رفته در یک شب یخبندان تشعشعی را جبران نماید، اما تبخیر آب از سطوح مختلف باعث مصرف شدن گرمای محسوس و کاهش دمای هوا می‌شود. حتی در صورت پایین بودن سرعت تبخیر هم ممکن است انرژی بسیار زیادی از این طریق به هدر رود. در مورد تغییر فاز آب از مایع به بخار (تبخیر) در دمای صفر درجه، مقدار انرژی از دست رفته به 2501 kJ kg^{-1} می‌رسد و برای تغییر فاز از یخ به بخار (تصعید) در دمای صفر درجه، گرمایی معادل $2825/5 \text{ kJ kg}^{-1}$ از دست می‌رود. بنابراین انرژی آزاد شده از سرد شدن یک کیلوگرم آب از ۲۰ به صفر درجه سانتی‌گراد و یخ‌زدن آن، $418/3 \text{ kJ kg}^{-1}$ است. مقدار آبی که سرد می‌شود و یخ می‌زند باید بیش از ۶ برابر مقدار آب تبخیر شده (یا $6/8$ برابر مقدار تصعید شده) باشد تا انرژی از دست رفته و آزاد شده با هم برابر شوند. برای جبران انرژی خالص از دست رفته در شرایط عدم حفاظت، لازم است که انرژی اضافه بیشتری از سرد شدن و یخ‌زدن آب حاصل شود.

مکانیزم حفاظت گیاهان به وسیله آب‌پاش‌ها آن است که آب در دوره‌های متوالی و به مقدار کافی بر روی گیاه پاشیده شود، به طوری که در فاصله دو دور متوالی پاشش آب، دمای بافت گیاهی به پایین‌تر از حد بحرانی کاهش پیدا نکند. در مورد آب‌پاش‌های رودرختی کم مصرف و غیردورانی هم ایده اصلی آن است که آب به طور پیوسته و به مقدار کم، اما به صورت هدف‌دار در سطح کوچکی ریخته شود و از گرمای حاصل از سرد شدن آن استفاده شود.



در روش آبپاش‌های زیردرختی سنتی، آب با مقدار و سرعت کافی بر روی زمین پاشیده می‌شود تا دمای سطح زمین در حدود صفر درجه حفظ شود. این کار باعث افزایش تشعشعات موج بلند از سطح زمین و افزایش انتقال گرمای محسوس به گیاهان می‌شود. در مورد ریز آبپاش‌های زیردرختی که نسبت به آبپاش‌های سنتی آب کمتری مصرف می‌کنند، هدف اصلی آن است که دمای زمین در قسمت زیر گیاهان در حدود صفر درجه حفظ شود تا میزان تشعشع و انتقال گرمای محسوس به سمت گیاهان افزایش یابد و به صورت متمرکزتری انجام شود.

آبیاری با آبپاش‌های رودرختی برای حفاظت گیاهان کم‌رشد و برخی درختان میوه خزان‌دار در برابر یخبندان استفاده می‌شود، اما در گیاهانی که ساختار شاخه‌ای آنها ضعیف است (مانند درخت بادام) و شاخه‌های آنها ممکن است زیر بار وزن یخ بشکند، نمی‌توان از این روش استفاده کرد. مقدار آب مورد نیاز در انواع مختلف این آبپاش‌ها شامل آبپاش‌های دورانی سنتی، آبپاش‌های دور متغیر و آبپاش‌های کم‌مصرف هدف‌دار، بسیار متنوع و متفاوت است. علاوه بر آن سرعت پاشیدن آب به وسیله آبپاش‌ها به عوامل زیر بستگی دارد:

۱. سرعت باد

۲. دمای حداقل در شرایط عدم حفاظت

۳. مساحت سطحی از گیاه که باید تحت پوشش قرار گیرد

۴. یکنواختی در توزیع آبپاش‌ها در سیستم

تا زمانی که مخلوط شفاف آب و یخ بر روی شاخه‌ها گیاه وجود دارد و قطره‌های آب از قندیل‌های یخی می‌چکد، دمای قسمت‌هایی از گیاه که با یخ پوشیده شده است در حدود صفر درجه باقی می‌ماند. اما اگر سرعت پاشش آب کم باشد یا سرعت چرخش آبپاش‌ها پایین باشد، ممکن است تمامی آب پاشیده شده یخ بزند و دمای قسمت‌های پوشیده از یخ شروع به پایین آمدن نماید.

در سیستم‌های سنتی آبپاشی رودرختی از آبپاش‌های ضربه‌ای استاندارد برای خیس کردن کامل گیاهان و خاک آنها استفاده می‌شود. سطح تحت حفاظت در گیاهان بزرگ معمولاً بیشتر از گیاهان کوچک است و بنابراین برای حفاظت گیاهان بلند قد لازم است از مقدار آب بیشتری نسبت به گیاهان کوتاه قد استفاده شود. برای دستیابی به نتیجه مناسب، باید قسمت‌های مختلف گیاه با آب پوشیده شوند و هر ۳۰ تا ۶۰ ثانیه یکبار با آب خیس شوند. در صورتی که این دوره طولانی‌تر شود، باید مقدار آب بیشتری در هر دور چرخش پاشیده شود.

یکنواختی در توزیع آب از اهمیت زیادی در جلوگیری از پوشش نامناسب ناحیه تحت حفاظت و آسیب‌دیدگی گیاهان برخوردار است. قبل از آنکه فصل یخبندان‌ها فرا برسد، باید یک ارزیابی دقیق از سیستم آبپاشی انجام گیرد تا از یکنواختی مناسب توزیع آب در سیستم اطمینان حاصل شود. اطلاعات مربوط به چگونگی اجرای این آزمایش معمولاً در منابع و کتاب‌های مربوط به مدیریت آبیاری ارائه شده است و علاوه بر آن کارشناسان ترویج کشاورزی در محل‌های مختلف، اطلاعات کافی درباره روش اجرای این آزمایش دارند. اگر می‌دانید که هوای سرد از مسیر خاصی وارد می‌شود،



می‌توان با افزایش تعداد آب‌پاش‌ها در بالادست مسیر ورود هوای سرد و یا حتی قرار دادن آب‌پاش‌ها در فضا‌های باز اطراف مزرعه در جهت بالادست مسیر هوای سرد، حفاظت در برابر یخبندان را تا حد زیادی بهبود بخشید. البته در هنگام آزمایش یکنواختی آب‌پاش‌ها نباید تراکم آب‌پاش‌ها در هیچ طرفی بیشتر یا کمتر باشد.

برای حفاظت در برابر یخبندان می‌توان از هر نوع سیستم آبیاری رودرختی که بتواند آب را با مقدار و سرعت مناسب بپاشد، استفاده نمود، اما بهتر است از سیستم‌هایی استفاده شود که به طور اختصاصی برای حفاظت در برابر یخبندان طراحی شده‌اند (راجرز و میدلی بوسکا، ۱۹۶۱؛ راپوسو، ۱۹۷۹). این سیستم باید در تمام فصل یخبندان در محل مخصوص خود قرار داشته باشد. اگر یک آب‌پاش در شب یخبندان در حال کارکردن باشد، به هیچ وجه نباید آن را جابه‌جا کرد. معمولاً اگر به جای نازل‌های مستطیلی شکل از نازل‌های مثلثی استفاده شود، آب با یکنواختی بیشتری توزیع خواهد شد. سیستم‌هایی که به منظور آبیاری طراحی شده‌اند و مخصوص حفاظت در برابر یخبندان نیستند، اگر بتوانند یکنواختی و سرعت مناسب پاشش آب را تأمین کنند، در سیستم‌های حفاظتی قابل استفاده هستند. در اغلب موارد لازم است که نازل آب‌پاش‌ها در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر یا بالاتر از بالای پوشش گیاهی نصب شود تا مسیر قطره‌های آب به گیاهان برخورد نکند. در سیستم‌های مخصوص حفاظت در برابر یخبندان، از آب‌پاش‌هایی با طراحی اختصاصی استفاده می‌شود که یک حفاظ مخصوص برای جلوگیری از یخ‌زدن نازل‌ها در آنها تعبیه شده است. برای اطمینان از عملکرد مناسب آب‌پاش‌ها لازم است از صافی‌های تمیز برای فیلتر کردن آب (به ویژه آب رودخانه و تالاب) استفاده شود.

زمان روشن و خاموش کردن آب‌پاش‌ها برای حفاظت در برابر یخبندان، به دما و رطوبت هوای باغ بستگی دارد. هنگامی که یک سیستم آب‌پاش شروع به کار می‌کند، ابتدا دمای هوا مقداری کاهش می‌یابد، اما به پایین‌تر از دمای قطره‌های آب نمی‌رسد و معمولاً با شروع یخ‌زدن آب و آزاد شدن گرمای نهان، دما مجدداً بالا می‌رود.

نکته بسیار مهم در مورد زمان خاموش کردن آب‌پاش‌ها آن است که تا زمانی که دمای دماسنج در سمت بالادست گیاه به بالاتر از دمای بحرانی نرسیده است (حتی اگر آفتاب به طور کامل به گیاهان می‌تابد و دمای هوا از صفر درجه بالاتر است)، آب‌پاش‌ها به هیچ وجه نباید خاموش شوند. حتی بهتر است در صورتی که مشکل کمبود آب و آب‌گرفتگی خاک وجود ندارد، خاموش کردن آب‌پاش‌ها را تا زمانی که دمای دماسنج در مقداری از صفر درجه بالاتر می‌رود، به تأخیر انداخت. اگر از زنگ‌های هشداردهنده یخبندان استفاده می‌کنید، دمای مربوطه را در حدود 1°C بالاتر از دمای بحرانی تعیین شده تنظیم کنید تا اطمینان حاصل شود که زمان کافی برای شروع به کار آب‌پاش‌ها وجود دارد.

مقدار آب مورد نیاز در آب‌پاش‌های رودرختی سنتی، به سرعت چرخش آب‌پاش، سرعت باد و دمای حداقل هوا در شرایط عدم حفاظت بستگی دارد. هنگامی که سرعت باد بالا باشد، تبخیر بیشتری انجام می‌گیرد و گرمای محسوس بیشتری از سطح گیاه به هدر می‌رود و در نتیجه برای جبران این گرمای از دست رفته، لازم است که مقدار آب بیشتری یخ بزند. هر چقدر دمای حداقل هوا پایین‌تر باشد، لازم است که گرمای بیشتری از فرایند یخ‌زدن آب حاصل شود تا



بتواند نقصان گرمای محسوس را جبران نماید. سرعت چرخش آبپاش‌ها هم از آن جهت اهمیت دارد که با یخ زدن آب، دمای قسمت‌های خیس گیاهی افزایش می‌یابد، اما در فاصله زمانی بین دو دور متوالی پاشش آب، دمای گیاه به خاطر تبخیر و تشعشع کاهش می‌یابد. اگر در این فاصله زمانی، دمای گیاه به پایین‌تر از صفر درجه می‌رسد، باید مقدار آب بیشتری برای خیس کردن گیاه استفاده شود.

اغلب کشاورزان تنها یک بار سرعت پاشش آب به وسیله آبپاش‌ها را تعیین و تنظیم می‌کنند و پس از نصب سیستم، دیگر نمی‌توانند به سادگی مقدار تعیین شده را تغییر دهند. اغلب سیستم‌های آبپاشی برای استفاده در شرایط یخبندان در یک منطقه طراحی شده‌اند و در نتیجه در شب‌هایی که یخبندان ملایم‌تری اتفاق می‌افتد، مقدار آب بسیار بیشتر از حد مورد نیاز مصرف می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، برخی کشاورزان از سیستم‌هایی استفاده می‌کنند که نازل آبپاش‌ها در آن متغیر و قابل تنظیم است و می‌توان مقدار آب پاشیده شده را افزایش یا کاهش داد. علاوه بر آن مطالعاتی هم بر روی نوعی از آبپاش‌های دور متغیر که به صورت خودکار خاموش و روشن می‌شوند، انجام شده است (زربر و مارتسولف، ۱۹۷۹؛ پروبستینگ، ۱۹۷۵) تا از این طریق بتوان مقدار مصرف آب را کاهش داد. مثلاً همر (۱۹۸۰) توانست با استفاده از یک سیستم آبپاش دور متغیر خودکار و با مصرف تنها نیمی از مقدار معمول آب، حفاظت مؤثری را در یک شب یخبندان تأمین نماید. در این سیستم از حسگرهای الکترونیکی مخصوص برای شبیه‌سازی جوانه‌های گیاه استفاده شد و آب در زمانی پاشیده می‌شد که دمای این حسگرها به 1°C می‌رسید. با این حال وی عنوان کرد که قرار دادن حسگرهای دمایی در سطح باغ، به دلیل غیر یکنواخت بودن آبپاشی، می‌تواند کار خطرناک و غیرمحتاطانه‌ای باشد. همچنین در اواخر دوره‌های حفاظت در برابر یخبندان، تجمع یخ باعث کند شدن واکنش حسگرها نسبت به تغییرات دما و مصرف بیش از حد آب می‌شود. کالما (۱۹۹۲) روشی را ارائه کرد که در آن نیازی به اندازه‌گیری دمای حسگرهای پوشیده از یخ نیست، بلکه بر طبق روش NZAEI (۱۹۸۷)، تنها یک حسگر در فضای آزاد و در ارتفاع ۱ متری در یک ناحیه حفاظت نشده نصب می‌شود و سپس تا زمانی که دمای این حسگر از 2°C بالاتر است، آبپاش‌ها به طور متناوب، یک دقیقه روشن و یک دقیقه خاموش می‌شوند، اما هنگامی که دما از 2°C پایین‌تر رفت، آبپاش‌ها به صورت پیوسته کار می‌کنند. با استفاده از این روش در مقدار آب مصرف شده در یک فصل، ۱۸ درصد صرفه‌جویی گردید. کالما و همکاران (۱۹۹۲) مدلی را برای پیش‌بینی مقدار آب مورد نیاز در سیستم‌های آبپاش دور متغیر ارائه کرده‌اند. اخیراً کوک و همکاران (۲۰۰۰) در مقاله‌ای گزارش کردند که از طریق روشن و خاموش کردن متناوب آبپاش‌های رودرختی در یک باغ سیب، تا ۷۵ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی شده است. برای مدل‌سازی و تعیین مدت زمان روشن یا خاموش بودن آبپاش‌ها از پارامترهای محیطی و دمای جوانه‌ها استفاده می‌شود.

گزارش‌های ارائه شده حاکی است که با استفاده از یک ریز آبپاش رو درختی به ازای هر درخت در نواحی جنوب غربی ایالات متحده، حفاظت بسیار خوبی برای گیاهان تأمین شده است (پاول و هیملریک، ۲۰۰۰). اما هزینه نصب چنین سیستمی بسیار بالاست و به همین دلیل کشاورزان استقبال خوبی از آن نمی‌کنند. ایوانز (۲۰۰۰) گزارش کرد که استفاده



از یک ریزآبپاش رودرختی به ازای هر درخت، منجر به کاهش مقدار آب مورد نیاز از بین $3/8$ تا $4/6 \text{ mm h}^{-1}$ برای آبپاش‌های سنتی تا بین $2/8$ تا $3/1 \text{ mm h}^{-1}$ برای اراضی پوشیده از درخت می‌گردد. با این حال در صورت وزش باد ممکن است به مقادیر $5/6 \text{ mm h}^{-1}$ یا بیشتر هم برای حفاظت از باغ‌ها نیاز باشد.

یورگنسن و همکاران (۱۹۹۶) به مطالعه در زمینه استفاده از ریز آبپاش‌های رودرختی هدفدار برای حفاظت از تاکستان‌ها در برابر یخبندان پرداختند. آنها به ارزیابی سیستمی پرداختند که در آن قطرات آب با قطر بزرگتر تولید می‌شوند و مقدار آب مورد استفاده در حد پایین‌تری حفظ می‌شود. سپس این سیستم را با ریز آبپاش‌های سنتی مورد مقایسه قرار دادند. این ریزآبپاش‌ها یک نوار آب به عرض تقریبی $0/6 \text{ m}$ را به صورت هدفدار در اطراف پایه درخت می‌پاشند. ریزآبپاش‌ها در ردیف‌های درخت مو به گونه‌ای نصب می‌شدند که ارتفاع آنها از بالای سر درخت در حدود $0/5$ متر باشد و به صورت یک در میان به دیرک داربست درختان مو بسته می‌شدند. فاصله بین دو نازل در حدود $3/6 \text{ m}$ بود. این سیستم هدفدار با یک سیستم سنتی مورد مقایسه قرار گرفت که در آن از آبپاش‌های ضربه‌ای با نازل‌هایی به قطر $2/78 \text{ mm}$ و فواصل $15/6 \text{ m}$ در $12/8 \text{ m}$ استفاده شده بود. در نهایت میزان مصرف آب در سیستم هدفدار، 80 درصد کاهش یافت، اما در طی 2 سال اجرای این آزمایش هیچ یخبندان شدیدی روی نداد.

آبپاش‌های هدفدار برای حفاظت تاکستان‌های واقع در ارتفاعات بالاتر (820 m) در شمال کالیفرنیا هم استفاده شدند و نتایج رضایت‌بخشی از آنها به دست آمد. در آن منطقه کشاورزان مجبور بودند که به دلیل کمبود آب، به دنبال روش جایگزین مناسبی برای آبپاش‌های رودرختی سنتی باشند. میزان مصرف آب در سیستم‌های کم‌مصرف در حدود $140 \text{ lit min}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ و در سیستم‌های سنتی در حدود 515 تا $560 \text{ lit min}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ بود. در سال اول آزمایش، پایین‌ترین دمای مشاهده شده $3/9^\circ\text{C}$ بود، اما بین بلوک‌های مربوط به روش‌های کم مصرف و سنتی هیچ تفاوتی از نظر میزان بار میوه و شدت هرس درختان وجود نداشت. در سال دوم، یک شب دمای هوا تا $5/8^\circ\text{C}$ کاهش یافت و نازل برخی از آبپاش‌های ضربه‌ای یخ زد و از کار باز ایستاد. در این سال با وجود آنکه یخ بسیار زیادی بر روی گیاهان تشکیل شده بود، کشاورز مشاهده کرد که آسیب‌های ناشی از یخبندان در بلوک‌های مربوط به آبپاش‌های سنتی و کم‌مصرف با هم مشابه هستند. سیستم کم‌مصرف به گونه‌ای طراحی شده بود که آب را مستقیماً بر روی ردیف‌های درخت مو بپاشد و آب بسیار کمی در فاصله بین ردیف‌ها بر روی زمین ریخته می‌شد. کشاورز محقق این نکته را خاطر نشان کرد که نازل آبپاش‌های غیردورانی باید به گونه‌ای آرایش داده شود که ردیف‌های مو به طور کاملاً یکنواختی تحت پوشش قرار گیرند. نکته مهم دیگر اینکه آبپاش‌ها باید هنگامی روشن شوند که دمای دماسنج تر بالاتر از صفر درجه باشد و تا زمانی که دمای دماسنج تر پس از نزول، مجدداً به بالای صفر درجه برسد، به هیچ وجه نباید متوقف شوند.

آبپاش‌های زیردرختی معمولاً برای حفاظت درختان خزان‌دار در مناطقی که دمای حداقل خیلی پایین نباشد و تنها به چند درجه حفاظت نیاز باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر هزینه‌های جاری کمتری که این روش در مقایسه با سایر روش‌ها دارد، از آن برای آبیاری هم می‌توان استفاده کرد و بروز بیماری‌های گیاهی هم در این روش کمتر است و در

مجموع مزایای زیادی نسبت به آبپاش‌های رودرختی دارد. همچنین در سیستم آبپاش‌های زیردرختی، مشکل شکستگی شاخه‌ها در زیر بار سنگین یخ و اختلال و توقف در کار آبپاش، کمتر اتفاق می‌افتد. آبپاش‌های زیردرختی به مقدار آب کمتری (۲ تا 3 mm h^{-1}) نیاز دارند. مقدار حفاظت تأمین شده در این روش به شدت یخبندان و مقدار آب مصرفی بستگی دارد. آنکولی و همکاران (۲۰۰۲) دریافتند که در دماهای حداقل بالاتر از 3°C ، تفاوت زیادی بین مقادیر مختلف آب و انواع مختلف نازل‌های آبپاش وجود ندارد. اما در دماهای پایین‌تر از 3°C ، مقدار آب برابر با 65 lit h^{-1} به ازای هر درخت، حفاظت مؤثرتر و بهتری از 45 lit h^{-1} تأمین نمود.

هدف اصلی استفاده از آبپاش‌های زیردرختی آن است که دمای سطوح خیس شده در حدود صفر درجه حفظ شود. بخشی از حفاظتی که در این روش تأمین می‌شود ناشی از افزایش تشعشع از سطوح پوشیده از آب و یخ است که دمای آن از دمای سطوح حفاظت‌نشده بیشتر است. در یک باغ حفاظت‌نشده معمولاً در شرایط یخبندان، سردترین هوا در مجاورت سطح زمین قرار دارد (غالباً خیلی پایین‌تر از صفر درجه) و با افزایش ارتفاع، دما هم افزایش می‌یابد. اما در صورت کار کردن آبپاش‌ها، دمای هوای مجاور سطح زمین افزایش می‌یابد و به نزدیک صفر درجه می‌رسد، و بنابراین هوای نزدیک سطح زمین در این شرایط گرمتر از گیاهان حفاظت‌نشده است. هوای گرمی که در نزدیک سطح قرار دارد باعث ایجاد ناپایداری جوی در آن قسمت می‌شود که در نتیجه آن گرمای محسوس به طرف بالا جریان می‌یابد و به گیاهان می‌رسد. علاوه بر آن با کار کردن آبپاش‌ها ظرفیت بخار آب هوا در باغ هم افزایش می‌یابد و تراکم بخار آب و تشکیل یخ بر روی سطوح سرد گیاهی باعث آزاد شدن گرمای نهان و تأمین مقداری حفاظت می‌شود. بازدهی آبپاش‌های زیردرختی در تأمین حفاظت نیز به میزان تبخیر بستگی دارد و با افزایش سرعت باد و به دنبال آن افزایش تبخیر، بازدهی آبپاش‌ها کاهش می‌یابد. بهترین راه برای آزمایش کردن سیستم آن است که آبپاش‌ها در زمان خواب گیاهان در یخبندان‌هایی با شدت‌های مختلف کار کنند تا مشخص شود که در چه شرایطی تمام آب یخ می‌زند. اگر خاک با مخلوطی از آب و یخ پوشیده شده و دمای سطح در حدود صفر درجه است، مقدار آب مورد استفاده کافی است. اگر تمام آب یخ بزند و دمای سطح پایین‌تر از صفر درجه باشد، مقدار آب برای آن شرایط کم است. البته باید دقت شود که شاخه‌های پایینی درختان هرگز خیس نشوند.

پری (۱۹۹۴) گزارش کرد که با استفاده از آبپاش‌های زیردرختی دورانی در یک یخبندان تشعشعی معمولی می‌توان انتظار داشت که دما تا ارتفاع حدود $3/6 \text{ m}$ از $0/5$ تا $1/7^\circ\text{C}$ افزایش یابد. ایوانز (۲۰۰۰) هم نشان داد که در باغی که با آبپاش‌های دورانی سنتی و با مصرف آب سرد محافظت می‌شود، دما تا ارتفاع 2 متری تا حدود $1/7^\circ\text{C}$ افزایش می‌یابد. کونل و اشنایدر (۱۹۸۸) گزارش کردند که در یک باغ بادام که با سیستم آبپاش‌های دورانی دنده‌ای به جای آبپاش‌های ضربه‌ای محافظت می‌شود، دما در ارتفاع 2 متری تا حدود 2°C افزایش می‌یابد. در این آزمایش دمای آب خارج شده از نازل‌ها در حدود 20°C و سرعت مصرف آب 2 mm h^{-1} بود. در سیستم‌های معمولی آبپاش زیردرختی از نازل‌هایی به قطر 2 تا $2/4 \text{ mm}$ و فشار آب 276 تا 345 kPa و سرعت پاشش 2 تا 3 mm h^{-1} استفاده می‌شود.



از زمانی که آبپاش‌ها شروع به کار می‌کنند باید به صورت پیوسته و بدون وقفه به کار خود ادامه دهند. اگر با محدودیت آب مواجه هستید، قسمت‌هایی را که بیشتر در معرض یخبندان هستند و یا نواحی بالادست سمت باغ‌های حفاظت نشده را آبیاری کنید. بهتر است به جای آنکه مقدار کمی آب را در یک سطح وسیع بپاشید، آب را به صورت متمرکز و در قسمت‌هایی که به حفاظت بیشتری نیاز دارند، بپاشید. آبپاش‌های دستی به هیچ وجه نباید در حین کار، متوقف یا جابه‌جا شوند. اما در شرایط یخبندان‌ها ملایم ($T_n < -0.2^\circ\text{C}$)، می‌توان خطوط آبپاش را به صورت یک ردیف در میان در داخل ردیف‌های درختان قرار داد تا سطح وسیع‌تری تحت پوشش قرار گیرد. با این حال در زمان وقوع یخبندان‌های سبک تا شدید، لازم است که خطوط آبپاش‌ها به هم نزدیک‌تر شوند.

۳-۲-۵) آبیاری قطره‌ای

سیستم‌های آبیاری قطره‌ای هم در برخی مواقع برای حفاظت در برابر یخبندان مورد استفاده قرار گرفته و نتایج متنوعی را به دنبال داشته‌اند. به طور کلی فایده‌ای که آب برای حفاظت دارد، به خاطر یخ زدن آن بر روی سطوح مختلف و آزاد شدن گرمای نهان انجماد آب است. اما اگر مقدار تبخیر زیاد باشد، ممکن است انرژی بیشتری از آنچه که از یخ زدن آب حاصل می‌شود، صرف تبخیر آب شود و به هدر رود. با توجه به انواع بسیار متعدد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و اجزای این سیستم‌ها، به سادگی نمی‌توان کلیاتی در مورد کارایی این سیستم‌ها بیان کرد. در این روش نیز بهترین راه آن است که در فصل خواب گیاهان، آزمایش‌هایی بر روی سیستم انجام گیرد تا کارایی آن در شرایط آب و هوایی مختلف مشخص شود. اگر آب روی زمین به صورت مخلوط آب و یخ با دمای صفر درجه وجود دارد، نشان می‌دهد که سیستم عملکرد مؤثری دارد. اما اگر تمام آب یخ بزند و ظاهر یخ شیری رنگ و مات باشد، نشان‌دهنده آن است که سیستم مورد استفاده در آن شرایط از کارایی مؤثری برخوردار نیست. باید توجه داشت که اگر سیستم آبیاری قطره‌ای در زمان یخبندان‌های بسیار شدید کار کند، ممکن است یخ بزند و شدیداً آسیب ببیند. گرم کردن آب می‌تواند در جلوگیری از این نوع آسیب‌ها و نیز بهبود حفاظت گیاهان مؤثر واقع شود. اما گرم کردن آب هم ممکن است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد.

۳-۲-۶) آبیاری سطحی

یکی از رایج‌ترین روش‌های حفاظت در برابر یخبندان آن است که آب از طریق شیار، کانال و یا آبیاری غرقابی، مستقیماً" به روی خاک جریان یابد. جونز (۱۹۲۴) که اولین محقق در زمینه استفاده از آبیاری سطحی برای حفاظت در برابر یخبندان بوده است، دریافت که با آبیاری یک باغ مرکبات با آب 23°C ، دمای هوای باغ 1°C افزایش می‌یابد. در این روش آب در یک مزرعه یا باغ جریان می‌یابد و گرمای حاصل از سرد شدن آن به هوا منتقل می‌شود. دمای آب هم از آن جهت اهمیت دارد که هرچقدر آب گرم‌تر باشد، پس از سرد شدن گرمای بیشتری آزاد می‌کند. بیشترین حفاظت در اولین شب پس از جاری کردن آب تأمین می‌شود و به مرور زمان که خاک از آب اشباع می‌شود، کارایی این روش کاهش



می‌یابد. اضافه کردن آب را می‌توان تا جایی ادامه داد که قسمتی از گیاهان مقاوم یا تمام آنها به زیر آب فرو رود، اما در این صورت ممکن است بیماری‌های قارچی و خفگی ریشه مشکل‌ساز شوند. معمولاً این روش بهترین کارآیی را برای درختان کم‌رشد و مو در زمان یخبندان‌های تشعشعی دارد. در آزمایشی که بر روی گیاه گوجه‌فرنگی انجام گرفت، گیاهان حفاظت‌نشده کاملاً آسیب دیدند (روزنبرگ، بلید و ورما، ۱۹۸۳). آبیاری با آب‌پاش‌های رودرختی در مقایسه با آبیاری شیاری حفاظت بهتری را تأمین نمود، اما در هر دو روش میزان آسیب‌دیدگی بسیار کاهش یافت.

۳-۲-۷) غرقاب کردن

غرقاب کردن مستقیم گیاهان روشی است که در بسیاری از کشورها برای حفاظت در برابر یخبندان استفاده می‌شود. مثلاً در پرتغال و اسپانیا، کشاورزان یک جریان پیوسته آب را به مزرعه وارد می‌کنند تا تمام یا قسمتی از گیاهان در آب فرو رود (کونا، ۱۹۵۲؛ دیاز-کوئرتو، ۱۹۷۱). در پرتغال معمولاً از این روش برای حفاظت علف‌زارهای رای‌گراس و علف Castilian استفاده می‌شود (کونا، ۱۹۵۲)، اما در کالیفرنیا و سایر مناطق ایالات متحده، از این روش برای حفاظت از انواع مختلفی از گیاهان استفاده شده است. به دلیل هزینه نسبتاً پایین روش آبیاری غرقابی، معمولاً سود اقتصادی حاصل از این روش حفاظتی بالاست. حجم آب مورد استفاده به شدت یخبندان و دمای آب بستگی دارد. بوزینگر (۱۹۶۵) نشان داد که اگر آبیاری غرقابی قبل از وقوع یخبندان انجام شود، می‌توان با استفاده از این روش به حفاظتی معادل 4°C دست یافت، در حالی که جرج (۱۹۷۹) گزارش کرد که غرقاب کردن مستقیم گیاهان در مزارع فلفل پیمنتو در شب‌های یخبندان، باعث افزایش دما به میزان حدود 3°C گردید.

آب مایع هنگامی که دمای آن در حدود 4°C است، نسبت به دماهای کمتر از آن، متراکم‌تر است و چگالی بیشتری دارد، بنابراین آبی که دمای آن کمتر از 4°C است، بالاتر می‌آید و در سطح قرار می‌گیرد و یخ زدن آب از بالا به طرف پایین پیش می‌رود. هنگامی که یخ در قسمت‌های سطحی تشکیل می‌شود، فضاهاى هوا در فاصله بین آب مایع زیرین و یخ بالایی ایجاد می‌شود و مانع از انتقال گرما از طرف پایین به بالا می‌گردد. بدین ترتیب دمای سطح پوشیده از یخ ممکن است به پایین‌تر از صفر درجه برسد و موجب سردتر شدن قسمت‌های سطحی و کاهش دمای هوا شود.

۳-۲-۸) آبیاری شیاری

آبیاری شیاری هم معمولاً برای حفاظت در برابر یخبندان استفاده می‌شود و اصول کلی آن شبیه به آبیاری غرقابی است. با جریان یافتن آب گرم در داخل شیارها، میزان همرفتی هوای گرم شده از آب و تشعشع رو به بالای گرما از سطح آب، هر دو افزایش می‌یابند. جهت اصلی تشعشع و جریان گرمای محسوس به صورت عمودی است، بنابراین بهترین بازدهی در این روش هنگامی حاصل می‌شود که شیارها مستقیماً در زیر قسمت‌های تحت حفاظت گیاه قرار داشته باشند.



مثلاً شیارهای محل جریان آب باید درحاشیهٔ ردیف‌های درختان مرکبات به گونه‌ای تهیه شوند که هوایی که به وسیلهٔ جریان آب گرم می‌شود، مستقیماً از حاشیهٔ فضای پوشش داده شده از درخت به طرف بالا حرکت کند و شاخ و برگ درخت را گرم کند، اما این شیارها نباید کاملاً در فضای زیر درخت که هوا به خودی خود کمی گرمتر است و یا در فضای بین ردیف‌های درختان که هوای گرم بدون رسیدن به شاخ و برگ درخت به بالا صعود می‌کند، قرار داشته باشند. در درختان خزان‌دار آب باید در زیر پوشش درختان به گونه‌ای حرکت کند که هوای گرم شده در مسیر صعود خود به جوانه‌ها، گل‌ها و میوه‌های کوچک برسد. شیارها باید حتی‌الامکان عریض‌تر باشند تا سطح تماس بیشتری را بین آب و هوا تأمین کنند. در واقع انرژی برحسب وات در مترمربع آزاد می‌شود و بنابراین افزایش عرض شیارها باعث افزایش سطح تشعشع‌کننده انرژی می‌شود و هوا را بیشتر گرم می‌کند. آبیاری شیاری باید به اندازه کافی زودتر آغاز شود تا قبل از آنکه دمای هوا به پایین‌تر از حد بحرانی برای آسیب‌دیدگی گیاه برسد، جریان آب به انتهای زمین رسیده باشد. مقدار انرژی تشعشعی حاصل از آب در دمای 20°C ، در حدود 419 Wm^{-2} است، در حالی که این مقدار در آب یا یخ با دمای صفر درجه به 316 Wm^{-2} می‌رسد. همچنین هر چقدر آب گرم‌تر باشد، گرمای بیشتری را به هوای مجاور خود انتقال می‌دهد و این گرما به صورت عمودی حرکت می‌کند و به گیاه می‌رسد. تشکیل یخ بر روی سطح آب باعث ممانعت از انتقال گرما از آب به هوا و کاهش حفاظت می‌شود. هر چقدر مقدار آب جریان یافته بیشتر باشد، تشکیل یخ در پایین‌دست مسیر جریان و در فاصلهٔ نزدیک‌تری به انتهای ردیف درختان اتفاق می‌افتد، بنابراین افزایش مقدار آب باعث افزایش حفاظت تأمین شده می‌شود. آب سرد خارج شده از شیارها نباید مجدداً وارد مسیر جریان شود. گرم کردن آب هم مسلماً در بهبود حفاظت مؤثر است، اما ممکن است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. بازدهی اقتصادی گرم کردن آب به هزینهٔ اولیه، مقدار انرژی و نیروی انسانی لازم در مقایسه با ارزش اقتصادی محصول مورد نظر بستگی دارد.

۳-۲-۹) عایق‌سازی با کف

روش عایق‌سازی با کف برای حفاظت گیاهان کم‌رشد و کوتاه قد در برابر یخبندان، در حد وسیعی به ویژه در آمریکای شمالی مورد مطالعه قرار گرفته و ثابت شده است که این روش می‌تواند دمای حداقل را تا 12°C افزایش دهد (براود، کنسن و هاوتورن، ۱۹۶۸). اما کشاورزان استقبال چندانی از این روش نکرده‌اند، زیرا کار و هزینهٔ لازم برای تهیهٔ مواد مورد نیاز در این روش بسیار بالاست و علاوه بر آن به دلیل عدم دقت کافی در پیش‌بینی زمان یخبندان‌ها، فاصلهٔ زمانی بین اعلام پیش‌بینی‌ها تا وقوع یخبندان خیلی کوتاه است و معمولاً فرصت کافی برای پوشش دادن سطوح وسیع وجود ندارد (بارتولیک، ۱۹۷۹). برای ساختن کف می‌توان از مواد مختلفی استفاده کرد، اما خاصیت عایق‌سازی و حفاظتی کف عمدتاً مربوط به هوای موجود در آن است. کف باعث جلوگیری از به هدر رفتن انرژی تشعشعی ساطع شده از گیاهان می‌شود و جریان گرمای رو به بالا از سطح خاک را هم به دام می‌اندازد. بیشترین کارایی کف در تأمین حفاظت در همان شب اول حاصل می‌شود و پس از آن به تدریج کاسته می‌شود، زیرا کف در طول روز باعث کاهش رسیدن انرژی به



خاک و گیاهان می‌گردد و با گذشت زمان به تدریج تجزیه می‌شود و خواص حفاظتی خود را از دست می‌دهد. برای ساختن کفی که هدایت گرمایی پایینی داشته باشد، باید هوا و مایع را به نسبت مناسبی مخلوط کرد تا تعداد بسیار زیادی حباب کوچک هوا در داخل مایع تشکیل شود. بارتولیک (۱۹۷۹)، روش‌های متعددی را برای ساختن کف و استفاده از آن برای حفاظت گیاهان، معرفی کرده است. اما در عین حال او بیان کرده است که کشاورزان تنها پس از خسارت دیدن از یخبندان از این روش استقبال می‌کنند و در دراز مدت، بسیار به ندرت مایل و قادر به استفاده از کف هستند. اخیراً کراسوویتسکی و همکاران (۱۹۹۹) به مطالعه بر روی خواص حرارتی کف‌ها و روش‌های استفاده از آن پرداخته‌اند.

۳-۲-۱۰) مه‌سازها

مه طبیعی می‌تواند باعث تأمین حفاظت در برابر یخ‌زدگی شود، بنابراین مطالعاتی هم در زمینه امکان استفاده از مه‌های مصنوعی به عنوان روشی برای حفاظت در برابر آسیب‌های ناشی از یخبندان انجام شده است. لوله‌های مه‌ساز که با استفاده از فشار بالا و نازل‌های مخصوص، قطرات ریز مه (به قطر ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر) تولید می‌کنند، می‌توانند حفاظت خوبی را در شرایط وزش باد آرام تأمین نمایند (می و بارتولیک، ۱۹۷۹). اصولاً حفاظت در نتیجه جذب تشعشعات موج بلند سطح زمین به وسیله قطرات آب و بازتابیدن مجدد آن به صورت تشعشعات موج بلند رو به پایین حاصل می‌شود، و با توجه به اینکه دمای قطرات آب موجود در مه خیلی بالاتر از دمای ظاهری آسمان صاف است، بنابراین مقدار تشعشعات مؤثر و سطح حفاظت تأمین شده در این شرایط افزایش می‌یابد. قطر قطرات آب باید در حدود $8 \mu\text{m}$ باشد تا تشعشعات را به بهترین شکل جذب کنند و در عین حال به روی زمین سقوط نکنند. برای دستیابی به حفاظت بهینه، لازم است یک توده نسبتاً متراکم از مه ضخیم تشکیل شود و گیاه مورد نظر را به طور کامل بپوشاند. این کار مستلزم وجود باد بسیار سبک و رطوبت نسبتاً بالا در هوا است. وپیتز (۱۹۷۴) و ایتایر، هوبر و برون (۱۹۸۷) مشکلاتی را در زمینه تولید قطرات آب کافی و اثرات باد بر رانش این قطرات، گزارش کرده‌اند. می و بارتولیک (۱۹۷۹) گزارش کردند که انرژی مورد نیاز برای مه‌سازی، کمتر از یک درصد بخاری‌ها، حدود ۱۰ درصد ماشین‌های باد و حدود ۲۰ درصد آب‌پاش‌هاست. آنها همچنین گزارش کردند که حفاظت تأمین شده از مه‌سازها در برخی شرایط بهتر از حفاظت حاصل از بخاری‌هاست.

هزینه اولیه تهیه سیستم‌های مه‌ساز لوله‌ای بالاست، اما هزینه‌های جاری در این روش پایین است، با این حال بر اساس نتایج مطالعات و آزمایش‌های شخصی که کشاورزان بر روی مه‌سازهای لوله‌ای انجام داده‌اند، در مناطقی که یخبندان‌های ملایم تا شدید روی می‌دهد، این مه‌سازها مانع از بین رفتن درختان می‌شوند، اما محصول اقتصادی درخت (میوه) را نجات نمی‌دهند. بنابراین مه‌سازهای لوله‌ای باید تنها برای حفاظت در برابر یخبندان‌های سبک استفاده شوند. به علاوه، رانده شدن توده مه می‌تواند برای مناطق اطراف خطرناک باشد، بنابراین مه‌سازها را نباید در مناطقی که عبور و مرور خودروها انجام می‌گیرد، مورد استفاده قرار داد.



مه‌های طبیعی که از طریق بخار کردن آب به وسیلهٔ موتور جت ایجاد می‌شوند، نیز می‌توانند حفاظت تأمین کنند. مه تشکیل شده به وسیلهٔ تفنگ بخار اشباع (SV) گیل (Gill) به عنوان یک مه طبیعی (و نه مصنوعی) شناخته می‌شود. تفنگ SV مجهز به موتور جت، به هوا بخار آب اضافه می‌کند تا هوا اشباع شود و در آن مه تشکیل شود. روش استفاده از موتور جت این مزیت را دارد که می‌توان آن را به سمت بالادست اراضی تحت حفاظت انتقال داد. بنابراین هزینهٔ اولیه برای یک تفنگ SV بسیار کمتر از سیستم مه‌ساز لوله‌ای است. اما به دلیل آنکه با موتور جت کار می‌کند، آلودگی صوتی بسیار زیادی تولید می‌کند. مشکل رانده شدن مه به نواحی مجاور در این روش هم وجود دارد و تفنگ SV را نباید در مناطقی که عبور و مرور خودروها وجود دارد، استفاده کرد. چگونگی کارکرد این وسیله تا حدودی پیچیده است و نتایج حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای هم نسبتاً ابهام‌آمیز و متنوع است.

۳-۲-۱۱) روش‌های ترکیبی

الف) ماشین‌های باد و آب‌پاش‌های زیردرختی

آب‌پاش‌های زیردرختی با زاویهٔ پاشش کم را می‌توان همراه با ماشین‌های باد برای حفاظت در برابر یخبندان استفاده کرد. علاوه بر گرمایی که در زمان حرکت قطره‌های آب از نازل آب‌پاش تا روی زمین حاصل می‌شود، یخ‌زدن آب بر روی سطح زمین هم مقداری گرمای نهان آزاد می‌کند که هوای نزدیک سطح را گرم می‌کند. اگرچه این هوای گرم شده در مجاورت سطح زمین به طور طبیعی به طرف بالا حرکت می‌کند و به گیاه منتقل می‌شود، اما کارکردن ماشین‌های باد همراه با آب‌پاش‌ها باعث می‌شود که انتقال گرما و بخار آب به هوا و گیاهان افزایش یابد. معمولاً کشاورزان ابتدا آب‌پاش‌ها را که هزینهٔ کمتری دارند، روشن می‌کنند و سپس در صورتی که به حفاظت بیشتری نیاز باشد، ماشین‌های باد را هم روشن می‌کنند.

ب) ماشین‌های باد و آبیاری سطحی

ترکیب روش‌های ماشین‌های باد و آبیاری سطحی، در حد گسترده‌ای در کالیفرنیا و سایر مناطق ایالات متحده، به خصوص در باغ‌های مرکبات، انجام شده است. معمولاً کشاورزان ابتدا با آبیاری سطحی شروع می‌کنند و سپس در صورت لزوم، ماشین‌های باد را به عنوان مکمل روشن می‌کنند. در اینجا نیز ماشین‌های باد موجب تسهیل در انتقال گرما و بخار آب حاصل از آب در لایهٔ مختلط هوا به گیاهان و هوا می‌شوند. کشاورزان به خوبی می‌دانند که ترکیب ماشین‌های باد و آبیاری سطحی باعث بهبود حفاظت در برابر یخبندان می‌شود، اما مقدار حفاظت اضافه‌ای که از این طریق حاصل می‌شود به درستی مشخص نیست.

ج) ماشین‌های باد و بخاری‌ها

ترکیب بخاری‌ها و ماشین‌های باد برای حفاظت در برابر یخبندان، موجب بهبود تأمین حفاظت در مقایسه با هر یک از این دو روش به تنهایی می‌شود (مارتسولف، ۱۹۷۹). بروکس (۱۹۶۰) گزارش کرد که استفاده از یک ماشین باد و ۵۰ بخاری در هر هکتار، تقریباً معادل استفاده از ۱۳۳ بخاری به تنهایی در هر هکتار است. در کالیفرنیا مشخص شد که ترکیب این دو روش به مدت زمان ۱۰۰، ۵۰ و ۱۰ ساعت، باعث کاهش هزینه‌های سالیانه به ترتیب به میزان ۵۳، ۳۹ و صفر درصد می‌گردد. در کالیفرنیا توانستند با ترکیب این دو روش باغ‌های مرکبات را تا دمای 5°C حفاظت کنند و تعداد بخاری‌های مورد نیاز هم به نصف تعداد اولیه می‌رسد. یک سیستم معمولی شامل یک ماشین باد ۷۴/۵ کیلوواتی و ۳۷ بخاری دودکش‌دار در هر هکتار است که به صورت یکنواخت در سطح باغ توزیع شده‌اند و تا فاصله ۳۰ متری از ماشین باد، هیچ بخاری قرار داده نمی‌شود (آنگوس، ۱۹۶۲).

در قسمت‌های حاشیه‌ای باغ می‌توان به ازای هر ۲ درخت یک بخاری قرار داد، اما در داخل ناحیه تحت پوشش ماشین باد می‌توان بخاری‌ها را به صورت پراکنده‌تر و با فاصله بیشتری توزیع نمود. در حاشیه بالادست محل ورود هوای سرد باید تراکم بخاری‌ها کمی بیشتر باشد. تا فاصله حدود ۵۰ متری از ماشین باد به هیچ بخاری نیاز نیست و در زمان یخبندان باید ابتدا ماشین‌های باد روشن شوند. سپس اگر کاهش دما ادامه پیدا کرد، بخاری‌ها هم روشن می‌شوند.

د) آب‌پاش‌ها و بخاری‌ها

اگرچه تا کنون تحقیقات علمی معتبری در زمینه ترکیب آب‌پاش‌ها و بخاری‌ها انجام نشده است، اما مارتسولف (۱۹۷۹) گزارش کرده است که یک کشاورز در پنسیلوانیای آمریکا از این روش استفاده کرده است. این کشاورز یک پوشش مناسب (یک تخته اسکی که به صورت افقی بر روی یک دیرک در ارتفاع ۱/۵ متری بالای بخاری نصب می‌شود) طراحی کرده بود تا از ریختن آب و خاموش شدن شعله بخاری جلوگیری کند. وی ابتدا بخاری‌ها را روشن می‌کرد و در صورتی که دمای هوا خیلی کاهش می‌یافت، آب‌پاش‌ها را هم روشن می‌کرد. ترکیب این دو روش باعث کاهش تشکیل یخ بر روی گیاهان شد و برخی مواقع نیازی به کارکردن آب‌پاش‌ها هم نبود. این که آیا رسیدن آب به بخاری باعث کاهش تولید گرما به وسیله بخاری می‌شود و یا افزایش تبخیر و تشکیل مه‌های مفید را به دنبال دارد، به درستی مشخص نیست.

ب) راهنمایی‌ها و آموزش‌های راهبردی

۱- استفاده از نقطه شبنم در تعیین احتمال وقوع یخ‌بندان

هنگامی که هوا گرم می‌شود، منبسط می‌شود و در نتیجه قادر است رطوبت بیشتری را در خود نگه دارد. از سوی دیگر، هوای سرد رطوبت کمتری در خود نگه می‌دارد. توانایی هوا در نگهداری بخار آب، بستگی به دمای آن دارد. هر چقدر دمای هوا بالاتر باشد، مقدار بخار آبی که می‌تواند در خود نگه دارد، بیشتر خواهد بود. اگر با تغییر آب و هوا، تغییراتی در ظرفیت رطوبتی هوا ایجاد نشود، آنگاه هرچه هوا سردتر شود سنگین‌تر و اشباع‌تر از رطوبت خواهد شد، زیرا هنگامی که هوا سرد می‌شود قابلیت نگهداری رطوبت آن نیز کمتر و کمتر می‌شود. نهایتاً دمای هوا به حدی می‌رسد که دیگر قادر به نگهداری رطوبت نیست و در این هنگام رطوبت هوا ۱۰۰٪ خواهد بود. این دما را نقطه شبنم می‌نامند. نقطه شبنم، دمایی است که طی آن هوا باید سرد شود تا اشباع شدن (۱۰۰٪ رطوبت نسبی) رخ دهد به شرط آنکه محتوای ظرفیتی آب تغییر نکند. نقطه شبنم، مقیاس مهمی است که برای پیش‌بینی تشکیل شبنم، یخ‌بندان و مه استفاده می‌شود. دمای نقطه شبنم بنا به تعریف عبارت است از دمایی که در آن با سردتر شدن هوا (در فشار ثابت)، بخار آب موجود در هوا به شکل شبنم، مه یا ابر متراکم می‌شود. هنگامی که دمای هوا به حد نقطه شبنم می‌رسد، گفته می‌شود از بخار آب اشباع شده است و دیگر قادر به نگهداری بخار آب نیست. از آن نقطه به بعد، هر رطوبت اضافی، به شکل یخ در می‌آید. رطوبت نسبی بنا به تعریف همان نسبت مقدار بخار آب واقعی موجود در هوا بر مقدار بخار آبی (رطوبتی) که هوا می‌تواند در آن دما در خود نگه دارد می‌باشد. نقطه شبنم یک معیار خوب برای ظرفیت بخار آب هواست. نقاط شبنم بالاتر نشان دهنده ظرفیت بالای بخار آب می‌باشد و نقطه شبنم پایین ظرفیت کمتر را نشان می‌دهد.

اگر دمای نقطه شبنم، ۳۵ درجه فارنهایت باشد، بدان معناست که در دمای ۳۵ درجه، رطوبت هوا برابر با ۱۰۰ درصد خواهد بود. اگر دمای هوا از این مقدار کمتر شود، پیامد آن تشکیل مه خواهد بود. البته این دقیقاً مه نیست، بلکه ذرات ریز آب است که به شکل ابر متراکم شده است. هر چقدر رطوبت هوا بیشتر باشد گرمای بیشتری در آن به دام می‌افتد و هر چقدر هوا خشک‌تر باشد، گرمای بیشتری را از دست می‌دهد.

اگر نقطه شبنم و دمای هوا نزدیک به هم باشند به ویژه در اواخر بعدازظهر که هوا شروع به سرد شدن می‌کند، احتمال می‌رود در طول شب، مه تشکیل شود. نقطه شبنم، معیار خوبی برای محتوای واقعی بخار آب هوا می‌باشد، برخلاف رطوبت نسبی، که دمای هوا را محاسبه می‌کند. نقطه بالای شبنم، میزان بالای بخار آب را نشان می‌دهد، نقطه پایین شبنم، بخار آب کم را نشان می‌دهد. به علاوه، نقطه بالای شبنم، شانس بهتری در نشان دادن باران و طوفان‌های شدید دارد و احتمال وقوع این عوامل بیشتر می‌شود.

خطر وقوع یخ‌بندان هنگامی جدی است که به هنگام شب، ستاره‌ها به روشنی می‌درخشند و هیچ رطوبت یا ابری برای نگه داشتن گرما وجود ندارد و هیچ بادی هم نمی‌وزد. اگر دمای نقطه شبنم بالا باشد، به ندرت یخ‌بندانی اتفاق می‌افتد. اگر



دمای نقطه شبنم در حدود ۲۰ درجه فارنهایت باشد، یخبندان اتفاق می‌افتد، زمانی که نقطه شبنم به زیر نقطه یخ‌زدن می‌رسد، نقطه یخ‌بندان می‌باشد. نقطه شبنم یک معیار مهم برای پیش‌بینی زمان تشکیل شبنم، مه، یخبندان و حتی دماهای حداقل است. از آنجا که، فشار اتمسفری تنها اندکی در سطح زمین اختلاف دارد، مگر آنکه نقطه شبنم در طول روز بالاتر از ۷۰ درجه فارنهایت بوده باشد. بنابراین فرد می‌تواند از نقطه شبنم برای پیش‌بینی دمای حداقل در شب و نیمه‌های شب استفاده کند. در صورت عدم وجود جبهه هوا، در نیمه شب انتظار می‌رود رطوبت نسبی ۵۰٪ باشد و نیز در بعدازظهر، نقطه شبنم در بعدازظهر، ایده‌ای از پیش‌بینی دمای حداقل در طول شب به دست می‌دهد، زیرا احتمال نمی‌رود که هوا در هر زمان از شب، از نقطه شبنم سردتر شود. برخی حسگرها می‌توانند دمای دماسنج تر را نشان دهند که البته این دما، دمای نقطه شبنم نیست. دمای دماسنج تر بستگی به مقدار بخار آب موجود در هوا دارد و نشان دهنده دمایی است که هوا در نتیجه تبخیر آب مایع، تا آن دما سرد می‌شود. برای اندازه‌گیری این دما، معمولاً از طریق حرکت دادن هوا روی حباب یک دماسنج و یا حسگری که به وسیله یک پارچه خیس پوشیده شده است، استفاده می‌شود (معمولاً همراه با یک پنبه یا بادزن دستی). با دانستن دمای دماسنج تر، می‌توان دمای نقطه شبنم و میزان رطوبت نسبی را به دست آورد. دمای نقطه شبنم در یک زمان معین، همواره کمتر یا برابر با دمای دماسنج تر و دمای دماسنج تر نیز همواره کمتر یا برابر با دمای هواست. تنها در زمانی که رطوبت نسبی هوا ۱۰۰٪ باشد، مقدار این سه دما با هم برابر خواهند بود.

یک قاعده سرانگشتی و تقریبی برای کنترل یخبندان براساس این فرضیه است که دمای حداقل هوا در صبح یک روز معین، تقریباً نزدیک به دمای نقطه شبنم در عصر روز قبل است. این قاعده برای کنترل یخبندان‌های بهاره‌ای که در شرایط هوای صاف و آرام با زهکشی هوای سرد و لایه لایه شدن هوا در جهت عمودی اتفاق می‌افتند (شرایط وارونگی دمایی قوی)، از نظر علمی دارای ارزش است. در چنین شرایطی ممکن است مقدار رطوبت کمی در هوای واقع در داخل یا خارج یک ناحیه وجود داشته باشد و بنابراین دمای نقطه شبنم در عصر روز قبل، نشان‌دهنده میزان رطوبت هوا طی چند ساعت آینده خواهد بود. هنگامی که دمای هوا به حد نقطه شبنم برسد، دو پدیده اتفاق می‌افتد. اول آنکه بخار آب در خارج از هوا متراکم می‌شود و گرما آزاد می‌کند (گرمای حاصل از تغییر فاز از بخار آب به آب مایع). دوم آنکه بخشی از بخار آب در داخل خود هوا متراکم می‌شود و مه تشکیل می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش هدر رفت گرما از سطح زمین به فضا می‌شود. ترکیب این دو پدیده، موجب جلوگیری از کاهش بیشتر دمای هوا می‌شود. تجارب قبلی نشان داده است که حداقل دمای هوا در زمان وقوع یکی از این دو حالت، معمولاً در حدود چند درجه بالاتر از نقطه شبنم باقی می‌ماند. احتمالاً به این دلیل که دمای هوا در ارتفاع حدود ۱/۵ متری از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود و در شرایط هوای صاف و آرام، دمای هوا در این ارتفاع گرم‌تر از هوای مجاور سطح زمین است. بنابراین در چنین شرایطی دمای هوا در نزدیکی سطح زمین نسبتاً پایین‌تر است و به دمای نقطه شبنم رسیده است.

۲- نکاتی در مورد تخمین دمای نقطه شبنم

در ارتباط با قاعده تقریبی تخمین دمای حداقل از روی دمای نقطه شبنم باید چند نکته مهم را مد نظر داشت که عبارت است از:

اول آنکه این قاعده فقط برای شرایطی که در بالا توصیف شد، قابل استفاده است (یعنی در هوای صاف و آرام). تعیین دماهای یخ‌زدگی در شرایط ابرناکی بودن هوا و وزش باد، کاری بسیار دشوار و پیچیده است.

دوم آنکه در زمان یخ‌بندان‌های تشعشعی، احتمال دارد که دمای نقطه شبنم در هنگام شب چند درجه کاهش یابد و رطوبت هوا به شکل شبنم و ذرات یخ متراکم شود، در نتیجه حداقل دمای هوا نیز چند درجه پایین‌تر از دمای برآورد شده در عصر روز قبل خواهد بود. در چنین شرایطی، بهترین راهکار آن است که با استفاده از قرائت دماسنج‌های متعدد و حسگرهای تعیین‌کننده نقطه شبنم و دماسنج تر در مزرعه و یا به وسیله زنگ خطرهای الکترونیکی که زمان یخ‌بندان را هشدار می‌دهند، شرایط را تحت کنترل در آورد و اما چرا قبل از آنکه گیاهان گوجه‌فرنگی از بین بروند، بر روی برگ گیاهان علفی یخ‌بندان مشاهده می‌شود؟ هنگامی که زمین یک یخ‌بندان تشعشعی سریع را تجربه می‌کند، گرما با سرعت زیادی از سطح آن به طرف بالا می‌رود. بدین ترتیب، هوا در ارتفاع حدود ۱۲ متری از سطح زمین، گرم‌تر از هوای نزدیک سطح می‌باشد. سردترین هوا در فاصله تنها یک دانه جو از سطح زمین قرار دارد. در شرایطی که بر روی علف‌ها لایه‌های یخ مشاهده می‌شود، دماسنج دمای هوا در ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متری را در حدود ۳۳ تا ۳۴ درجه فارنهایت نشان می‌دهد و در ارتفاع دو پایی (حدود ۶۰ سانتی‌متری) دما در حدود ۲۱ درجه فارنهایت است. در واقع به ازای هر ۳۰ سانتی‌متر حدود یک درجه از دمای هوا کاسته می‌شود. از آنجا که دما در ارتفاعات مختلف از سطح زمین، مقادیر متفاوتی دارد، وسایل اندازه‌گیری و ثبت دمای هوا دقیقاً در ارتفاع ۴ پایی (۱۲۲ سانتی‌متر) نصب می‌شوند. با داشتن مقادیر داده‌های متعلق به منابع مختلف، می‌توان برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری را با دقت بیشتری انجام داد. اما به خاطر داشته باشید که در یک شب سرد و خشک، دمای سطح زمین بسته به میزان پوشش ابر، دمای نقطه شبنم و وجود یا عدم وجود باد، می‌تواند ۴ تا ۵ درجه سردتر از هوای بالای آن باشد.

در برخی از کشورها برخی از باغداران راهکار کلیدی برای پیش‌بینی اولین یخ‌بندان را شکل ماه در شب منتهی به یخ‌بندان می‌دانند. قبل از آنکه این ایده به عنوان یک ایده عوامانه مورد توجه قرار گیرد باید به مطلب زیر توجه نمود.

از آنجا که در زمان هلال باریک یا کامل بودن قرص ماه، هر دو ماه و خورشید به خط در می‌آیند و حداکثر کشش جاذبه‌ای را که منجر به پیدایش شدیدترین جزر و مدها می‌گردد، ایجاد می‌نمایند، بنابراین تصور می‌شود که این دوره‌های کوتاه زمانی، تاثیر خاصی بر اینکه چه گیاهی و در چه زمانی کاشته شود، دارند. به طور کلی عقیده بر آن است که گیاهان ریشه‌ای و غده‌ای، در زمانی که هلال ماه ضعیف و نور آن رو به افول باشد، عملکرد رضایت‌بخش‌تر و بهتری خواهند داشت. در حالی که اگر گیاهان زینتی، میوه‌ای و علوفه‌ای، در زمانی که هلال ماه ضعیف و نور آن رو به افزایش است (اول ماه)، کاشته شوند، عملکرد بیشتری تولید خواهند کرد. اگرچه تاکنون هیچ اثبات علمی برای این پدیده



ارائه نشده است، اما حتی اگر واقعا "چنین مزایا و اثراتی وجود داشته باشند، برنامه‌ریزی بر مبنای آنها عملاً" امکان‌پذیر نیست. در واقع با وجود ملاحظات و نکات متعددی که به هنگام برنامه‌ریزی برای کاشت گیاهان باید مد نظر قرار گیرند، مسلماً "برنامه‌ریزی بر اساس وضعیت ماه، در عمل مشکلات بسیار زیادی را به همراه خواهد داشت و به سادگی میسر نیست. با این حال تنها یک اثر معتبر و مستند برای ماه شناخته شده است که می‌تواند در ارتباط با کشت و کار گیاهان و سبزیجات مد نظر قرار گیرد. طی شب‌هایی که قرص ماه کامل است، گرمای قابل ملاحظه‌ای را از خورشید به جو بالای زمین باز می‌تاباند. قسمت عمده این گرما صرف تبخیر مه‌های رقیق و تشکیل لایه‌های نازک ابر می‌شود که خود این ابرها می‌توانند به حفظ گرما در نزدیکی سطح زمین کمک کنند. اما صاف شدن آسمان که معمولاً "با کامل بودن قرص ماه همراه است، موجب هدر رفتن گرمای سطح زمین از طریق تشعشع می‌شود. بنابراین در هر تاریخی در اواخر بهار و اوایل پاییز که قرص ماه کامل باشد، فراوانی وقوع یخبندان نیز افزایش می‌یابد. خشک بودن هوا عموماً مقارن با زمان قبل از آغاز ماه نو یا بلافاصله قبل از کامل شدن قرص ماه و یا در زمان کامل بودن آن می‌باشد.

احتمالاً "شدت جزر و مد نیز با مقدار آبی که در زمان ماه نو یا کامل بودن قرص ماه تبخیر می‌شود و به هوا می‌رود و نیز با شدت بارندگی‌های بعد از آن، به نوعی ارتباط دارد. زمان خشک بودن هوا همان زمان وقوع یخبندان است. هنگامی که رطوبت افزایش یابد، موجب افزایش دمای نقطه شبنم می‌گردد که این عامل به تنهایی می‌تواند مانع از وقوع دماهای بحرانی گردد، این شرایط تا هنگامی برقرار است که هوای خشک مجدداً "از طریق مکانیزمی، جایگزین هوای مرطوب گردد. وقوع دماهای حداقل بحرانی را نمی‌توان تنها نتیجه سرد بودن هوا دانست، بلکه میزان خشک بودن هوا و به مقدار کمتری، میزان مرطوب بودن خاک نیز بر وقوع این دماها اثر دارند. بنابراین تا زمان ارائه پیش‌بینی‌های مربوط به اول ماه، باید منتظر ماند. شاید اگر برنامه‌ریزی برای کاشت گیاهان، بر مبنای علائم برج‌های سال و آثار طالع بینی انجام گیرد و ارتباط احتمالی بین مقادیر مختلف دماهای پایین شبانه و میزان بارندگی در یک دوره زمانی معین مشخص شود، آنگاه دریابیم که اطلاعات مربوط به ماه را می‌توان به عنوان معیار قابل توجهی جهت برنامه‌ریزی در بخش‌های خاصی از کشور مد نظر قرار داد. هرچند ممکن است شما انسان خرافاتی و احساساتی نباشید، اما در فصول بهار و پاییز، عمل کردن بر طبق تغییرات قرص ماه می‌تواند ارزش داشته باشد.

فرد می‌تواند از نقطه شبنم برای پیش‌بینی دمای حداقل در شب و نیمه‌های شب استفاده کند. در صورت عدم وجود جبهه هوا، در نیمه شب انتظار می‌رود رطوبت نسبی %۵۰ باشد و نیز مقدار نقطه شبنم در بعدازظهر، ایده‌ای از پیش‌بینی دمای حداقل در طول شب به دست می‌دهد، زیرا احتمال نمی‌رود که هوا، در هر زمان از شب، سردتر از نقطه شبنم شود. زمانی که دمای هوا و نقطه شبنم خیلی از یکدیگر اختلاف دارند، رطوبت نسبی پایین است و وقتی نزدیک هم باشند رطوبت نسبی بالاست. هنگامی که دمای هوا برابر نقطه شبنم باشد، رطوبت نسبی ماکزیمم و %۱۰۰ است. لذا، در مرحله بعد وقتی به بیرون پا می‌گذارید، متوجه بالا یا پایین بودن رطوبت نسبی خواهید شد.



توانایی هوا در نگهداری بخار آب، بستگی به دمای آن دارد. هر چقدر دمای هوا بالاتر باشد، مقدار بخار آبی که می‌تواند در خود نگه دارد، بیشتر خواهد بود.

۳- تعریف یخ زدگی و یخبندان

از لحاظ فنی، واژه یخبندان (frost)، دلالت بر تشکیل کریستال‌های یخ بر روی سطوح دارد که این حالت ممکن است در نتیجه یخ زدن شب‌نیم و یا تغییر فاز آب از حالت بخار به حالت یخ روی دهد (بلانکس و همکاران، ۱۹۶۳؛ بتن کوت، ۱۹۸۰ و موتا، ۱۹۸۱ و کونا، ۱۹۸۲)، اما این واژه عموماً برای توصیف یک رویداد هواشناسی به کار می‌رود که با وقوع آن گیاهان زراعی و سایر گیاهان خسارت‌هایی را در نتیجه یخ زدگی متحمل می‌شوند. زارعان غالباً دو اصطلاح یخبندان (frost) و یخ‌زدگی (freeze) را به صورت معادل یکدیگر به کار می‌برند، به طوری که هر دو تعریف دو پهلویی شامل دمای هوای برابر یا کمتر از صفر درجه سانتیگراد دارند. مثال‌هایی از تعاریفی که برای یخبندان در منابع مختلف ارائه شده است عبارتند از:

* وقوع دمای هوای کمتر از صفر درجه و بدون ارائه تعریف خاصی برای نوع محفظه اندازه‌گیری دما و ارتفاع نصب آن (راپوسو ۱۹۶۷ و هیووت ۱۹۷۱).

* نزول دمای سطح به زیر صفر درجه (کونا ۱۹۵۲) و پایین بودن دمای هوا به اندازه‌ای که باعث آسیب‌دیدگی و از بین رفتن گیاه صرف نظر از نوع گیاه و تشکیل یا عدم تشکیل یخ شود (وتسکوویچ ۱۹۵۸ و ویت کوپیچ ۱۹۶۰).

* وقوع دمای کمتر یا برابر با صفر درجه که در یک محفظه نوع Stevenson – screen نصب شده در ارتفاع ۱/۲۵ و ۲ متری اندازه‌گیری شده باشد (هاگ ۱۹۵۰ و ۱۹۷۱ و فرلاورنس ۱۹۵۲)

اشنایدر، پاپیو و تامسون (۱۹۸۷) و کلا و همکاران (۱۹۹۲) یخبندان را به دو صورت انتقالی و تشعشعی تقسیم‌بندی کرده‌اند.

یخبندان انتقالی عبارت است از هجوم توده‌های هوای سرد در مقیاس وسیع در یک جو متلاطم و بادخیز و دمایی که حتی در طول روز نیز کمتر از صفر درجه است.

یخبندان تشعشعی عبارت است از سرد شدن هوا در نتیجه هدر رفتن انرژی از طریق تبادل انرژی تشعشعی در شب‌های آرام و آسمان صاف که معمولاً با وارونگی دمایی همراه است (یعنی با افزایش ارتفاع دما هم افزایش می‌یابد). در برخی از موارد هم تلفیقی از یخبندان‌های انتقالی و تشعشعی روی می‌دهد.

مثلاً "بعید نیست که در شرایط یخبندان انتقالی، یک توده هوای سرد به یک منطقه وارد شود و منجر به ایجاد یخبندان انتقالی گردد و به دنبال این شرایط چند روزی هوا آرام و آسمان صاف می‌شود و یک یخبندان انتقالی در مقیاس کوچک در نظر گرفته می‌شود. این شرایط هنگامی روی می‌دهد که در یک ناحیه یخبندان تشعشعی روی دهد و زهکشی مقطعی و محلی هوای سرد منجر به نزول سریع دما در قسمت کوچکی از ناحیه یخبندان تشعشعی می‌شود.



تعاریفی که در لغت نامه‌ها و منابع علمی برای یخ‌زدگی و یخبندان ارائه شده است بسیار متغیر و گمراه کننده است. با این حال در سطح جهانی اصطلاح حفاظت در برابر یخبندان (frost protection) معمولاً رایج‌تر و پذیرفته‌تر از حفاظت در برابر یخ‌زدگی (freeze proteion) است و به همین دلیل در اینجا نیز از همین اصطلاح استفاده خواهد شد. یخبندان عبارتست از وقوع دمای هوای صفر درجه سانتیگراد یا کمتر که در ارتفاع ۱/۲۵ تا ۲ متر بالای سطح خاک و در داخل یک محفظه مناسب اندازه‌گیری شده باشد. آب موجود در داخل گیاهان ممکن است در نتیجه یخبندان، یخ بزند یا یخ نزند که این به فاکتورهای اجتناب از یخ‌زدگی بستگی دارد (مانند قابلیت فراسردی آب یا تجمع باکتری‌هایی هسته یخ). یخ‌زدگی عبارت است از تشکیل یخ خارج سلولی در داخل بافت‌های گیاهی. آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی هنگامی روی می‌دهد که دمای بافت‌های گیاهی به پایین‌تر از یک حد بحرانی نزول کند و یک شرایط فیزیولوژیکی برگشت‌ناپذیری ایجاد شود که منجر به مرگ یا اختلال در فعالیت سلول‌های گیاهی می‌شود. این دمای خسارت‌زا برای بافت‌های گیاهی، به دمای هوای موسوم به «دمای بحرانی» هم بستگی دارد که در محفظه‌های استاندارد و به وسیله ابزارهای استانداردی اندازه‌گیری می‌شود. دمای هوای پایین‌تر از صفر درجه معمولاً ناشی از کاهش ظرفیت گرمایی محسوس هوا در نزدیکی سطح زمین است که نتایج زیر را در پی دارد:

۱) هدر رفت انرژی خالص از طریق تشعشع از سطح زمین به آسمان (یعنی یخبندان تشعشعی)

۲) وزش باد در هوای سرد برای جایگزینی هوای گرم (یخبندان انتقالی)

۳) ترکیبی از شرایط فوق (یخبندان تشعشعی و انتقالی)

۱-۳) یخبندان تشعشعی

یخبندان‌های تشعشعی در کشور ما پدیده بسیار رایجی هستند. این نوع یخبندان معمولاً با آسمان صاف، هوای آرام و بدون باد، و آرونگی دمایی، دمای پایین نقطه شبنم و دمای هوا که در طول شب معمولاً پایین‌تر از صفر درجه و در طول روز بالاتر از صفر درجه است، مشخص می‌شود. نقطه شبنم نقطه‌ای است که در آن رطوبت نسبی هوا به صد در صد می‌رسد و معیار مناسبی برای تشخیص ظرفیت بخار آب هوا به شمار می‌رود.

در شب‌هایی که آسمان کاملاً صاف باشد، گرمای بیشتری از طریق تابش از سطح زمین، به هدر می‌رود و گرمای کافی برای جایگزینی این گرمای از دست رفته تأمین نمی‌شود و در نتیجه دمای هوا کاهش می‌یابد. دمای هوا در نزدیکی سطح تابش‌کننده گرما، کاهش می‌یابد و یک آرونگی دمایی شکل می‌گیرد (یعنی با افزایش ارتفاع از سطح زمین، دما نیز افزایش می‌یابد). هنگامی که انرژی از طریق تشعشع از سطح به هدر می‌رود، ظرفیت گرمایی محسوس خاک سطحی و هوای مجاور سطح نیز کاهش می‌یابد. در این شرایط یک جریان گرمایی محسوس از لایه‌های بالایی هوا به سمت پایین و از داخل خاک به سمت بالا برقرار می‌شود تا از این طریق گرمای هدررفته جبران گردد. ارتفاع لایه آرونگی دمایی نیز متغیر است و به وضعیت توپوگرافیکی منطقه و شرایط آب و هوایی بستگی دارد، اما عموماً در حدود ۹ تا ۶۰ متر است.

(پری، ۱۹۹۳)



اگر دمای هوا در ارتفاع مناسبی از سطح خاک اندازه‌گیری شود، با افزایش ارتفاع به نقطه‌ای خواهیم رسید که از آن به بعد دما با ارتفاع شروع به کاهش می‌کند (شرایط معمولی) ارتفاعی که در آن پروفیل دمایی از حالت وارونگی به شرایط معمول تغییر می‌یابد را سقف وارونگی می‌نامند. وارونگی ضعیف (سقف بلند) هنگامی روی می‌دهد که دمای لایه‌های بالایی هوا تنها اندکی بالاتر از هوای نزدیک سطح باشد و وارونگی قوی (سقف کوتاه) هنگامی است که با افزایش ارتفاع، دما به سرعت افزایش می‌یابد. روش‌های حفاظتی که نوعی از انرژی مصرف می‌کنند، در شرایط وارونگی شدید و پایین بودن سقف وارونگی که معمولاً شاخصه یخبندان‌های تشعشعی می‌باشد، حداکثر کارایی را دارند. یخبندان‌های تشعشعی خود به دو نوع تقسیم می‌شوند. نوع اول «یخبندان سفید» نام دارد و هنگامی اتفاق می‌افتد که بخار آب بر روی سطوح یخ می‌زند و یک لایه سفیدرنگ یخ که اصطلاحاً «یخبندان» نامیده می‌شود را تشکیل می‌دهد. نوع دوم یا «یخبندان سیاه» هنگامی اتفاق می‌افتد که دما به زیر صفر درجه نزول می‌کند، اما هیچ یخی بر روی سطوح تشکیل نمی‌شود. در واقع اگر رطوبت هوا به اندازه کافی پایین باشد، دمای سطوح به حدود نقطه انجماد آب نمی‌رسد و یخبندانی تشکیل نخواهد شد. اما اگر رطوبت بالا باشد، یخ تشکیل می‌شود و یک یخبندان سفید روی می‌دهد. از آنجا که در زمان تشکیل یخ مقداری گرما آزاد می‌شود، این باعث می‌شود که یخبندان‌های سفید خسارت‌های کمتری را در مقایسه با یخبندان‌های سیاه به همراه داشته باشند.

دما در حدود ساعات غروب آفتاب اتفاق می‌افتد که تشعشع خالص از سطح زمین به سرعت از حالت منفی تغییر می‌یابد. این تغییر سریع در میزان تشعشع خالص، به آن دلیل اتفاق می‌افتد که گرمای آفتاب که در اواسط روز حداکثر مقدار خود را دارد، در هنگام غروب خورشید به صفر می‌رسد و در نتیجه میزان تشعشعات خالص با طول موج بلند، همواره منفی خواهد بود.

۳-۲) یخبندان انتقالی

یخبندان‌های انتقالی هنگامی روی می‌دهند که توده هوای سرد به یک ناحیه وارد شود تا جایگزین هوای گرمی شود که قبلاً در این ناحیه وجود داشته است. شرایط وقوع این نوع یخبندان معمولاً شامل آسمان ابری، باد ملایم تا شدید، عدم وجود وارونگی دمایی و رطوبت نسبی پایین است. دمای هوا غالباً به پایین تر از نقطه نوب کاهش می‌یابد و در تمام طول روز در همان حدود باقی می‌ماند. با توجه به اینکه اغلب روش‌های حفاظتی فعال در شرایط وجود وارونگی دمایی عملکرد و کارایی بهتری دارند، بنابراین مقابله با یخبندان‌های انتقالی که در آنها وارونگی دمایی وجود ندارد، بسیار مشکل است. در بسیاری از موارد، دمای هوا به مدت چند شب به صورت یخبندان انتقالی کاهش می‌یابد و پس از این چند شب شرایط یخبندان تشعشعی حاکم می‌شود. مثلاً یخبندان‌های سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۸ کالیفرنیا هر دو به صورت یخبندان انتقالی آغاز شدند. در آن سال‌ها اگر چه سرعت باد خیلی پایین بود، اما آسمان از ۱۸ تا ۲۰ دسامبر ۱۹۹۰ و از ۱۸ تا ۲۲ دسامبر ۱۹۹۸ کاملاً ابری بود. با این وجود دمای حداقل در طی این دوره هنوز کاملاً زیر صفر درجه بود. پس از آن



که آسمان صاف شد (یعنی ۲۱ تا ۲۵ دسامبر ۱۹۹۰ و ۲۳ تا ۲۵ دسامبر ۱۹۹۸) دماهای زیر صفر در نتیجه شرایط یخبندان تشعشعی ایجاد شد و انتقال هوای سرد دیگر نقشی نداشت.

یخبندان‌های انتقالی عمدتاً در اقلیم‌های مدیترانه‌ای روی می‌دهند اما در قسمت‌های غربی قاره‌ها که معمولاً "توده‌های هوای سرد قاره‌ای از نواحی قطبی به سمت نواحی نیمه استوایی منتقل می‌شوند، یخبندان تشعشعی بیشتر شایع است. چند نمونه از این یخبندان‌ها در مناطق تولید مرکبات فلوریدای ایالات متحده روی داده است. آتاوی (۱۹۹۷) با مراجعه به گزارش ارائه شده توسط جان لی ویلیامز، اولین یخبندان خسارت‌بار این منطقه را که در سال ۱۸۳۵ روی داده بود توصیف کرده است. ویلیامز در گزارش خود آورده است که ۱۰ روز بود که بادهای بسیار سردی از سمت شمال غرب می‌وزید و دمای هوا تا $13/9^{\circ}\text{C}$ کاهش یافت. حتی رودخانه محلی هم یخ زد و تمامی انواع درختان میوه تا عرض جغرافیایی 28°N از بین رفتند و به زمین می‌ریختند. مسلماً "حفاظت در برابر دماهای زیر صفر درجه در هوای بادی و در شرایطی که وارونگی دمایی وجود ندارد در مقایسه با حفاظت در برابر یک یخبندان تشعشعی نسبتاً" ملایم، بسیار مشکل‌تر است. تنها نقطه امیدواری آن است که یخبندان‌های انتقالی با فراوانی کم و به ندرت اتفاق می‌افتند و اغلب یخبندان‌ها از نوع تشعشعی هستند و می‌توان برای مقابله با آنها اقداماتی را انجام داد.

در ادامه اطلاعاتی درباره جنبه‌های مهم روش‌های حفاظت یخبندان بدون معادلات و مفاهیم پیچیده در اختیار خوانندگان قرار می‌گیرد. اطلاعات جزئی‌تر و کامل‌تر متعاقباً ارائه می‌گردد. جهت کاهش حجم مطالب و سهولت خواندن منابع مورد استفاده ارائه نشده‌اند.

۴- حساسیت محصول و دماهای بحرانی

خسارت یخبندان به گیاهان، ناشی از دمای سرد نیست، بلکه عمدتاً به دلیل تشکیل یخ خارج سلولی (نه داخل سلول) در درون بافت گیاه می‌باشد که طی آن، آب سلول خارج و سلول‌ها دهیدراته (آبگیری) می‌شوند و سبب خسارت به سلول‌ها می‌شود. به دنبال قرار گرفتن گیاهان در دوره سرما، آنان در برابر خسارت یخ‌زدگی مقاوم می‌شوند و دوباره پس از گرم شدن کوتاه مدت مقاومت خود را از دست می‌دهند. ترکیبی از این عوامل، و سایر عوامل دیگر، میزان درجه حرارتی که طی آن، درون بافت گیاهی یخ تشکیل می‌شود و زمان وقوع را خسارت تعیین می‌کنند. میزان خسارت یخبندان با کاهش دما افزایش می‌یابد و دمای مرتبط با سطح خاصی از خسارت، دمای بحرانی یا دمای خسارت بحرانی برای آن سطح گفته می‌شود و با نماد T_c° نشان داده می‌شود. به طور کلی بیشتر دماهای بحرانی در اتاقک رشد و از طریق سرد کردن اتاقک با یک نسبت ثابت تا حد پایین‌تر از دمای از پیش تعیین شده به مدت ۳۰ دقیقه تعیین می‌شوند. سپس درصد خسارت ثبت می‌شود.

T_{10} و T_{90} دمایی است که ۱۰ درصد و ۹۰ درصد محصولات قابل ارائه به بازار خسارت می‌بینند. به طور کلی هر دو دمای T_{10} و T_{90} پس از شروع نمو غنچه‌ها و جوانه‌های گل تا مرحله تشکیل میوه‌های هسته‌دار زمانی که گیاهان نسبت به یخ‌زدگی در حساس‌ترین مرحله هستند، افزایش می‌یابند. مقادیر T_{90} در زمان شروع رشد پایین است ولی خیلی



سریع‌تر از دمای T_{10} افزایش می‌یابد. و تفاوت کمی بین T_{90} و T_{10} در شرایطی که محصول بیشترین حساسیت را دارد وجود دارد. مقادیر T_c برای باغ‌های دارای درختان برگ‌ریز و تاکستان‌ها در مرحله فنولوژیکی بسیار متفاوت است. تصاویر مراحل فنولوژیکی معمولاً "بسیاری از این گیاهان را نشان می‌دهند که می‌توانند از طریق اینترنت به آن دست یافت. سایت‌هایی مانند:

Fruit. prosser. Wsu.edu/frsttables.htm

www. Msue.msu.edu/van_buren/crittemp.htm.

گرچه مقادیر T_c اطلاعاتی را مانند زمان شروع و خاتمه روش‌های حفاظت از یخبندان فعال در اختیار قرار می‌دهد، این روش‌ها باید با آگاهی و با دقت استفاده شوند. معمولاً مقادیر T_c ، دمای جوانه‌ها، گل‌ها یا میوه‌های کوچک را نشان می‌دهد که یک سطح شناخته شده‌ای از خسارت مشاهده شده می‌باشد. با این حال اندازه‌گیری بافت‌های حساس گیاهی دشوار می‌باشد و مقادیر این دماها احتمالاً "از مقادیر دمای اندازه‌گیری شده به وسیله کشاورزان متفاوت می‌باشد. به جز برای میوه‌های بزرگ (مثل پرتقال)، دمای جوانه‌ها، گل و میوه کوچک معمولاً "از دمای هوا سردتر می‌باشد. بنابراین روش‌های فعال حفاظت باید در دماهای هوای بالاتر از آنچه در جداول دمای بحرانی نشان داده شده است شروع شود و پایان یابد. برای میوه‌های بزرگ مثل مرکبات، دمای هوا هنگام غروب اغلب سریع‌تر از دمای میوه پایین می‌افتد، بنابراین می‌توان بخاری‌ها یا ماشین‌های باد را وقتی که دمای هوا تقریباً "یا کاملاً" به زیر دمای T_c می‌رسد راه‌اندازی و روشن کرد.

۵- ارزیابی جغرافیایی خسارت یخبندان به محصولات

خسارت یخبندان در اغلب مناطق به جز مناطق حاره، زمانی که دما به زیر نقطه ذوب یخ (۵ درجه سانتی‌گراد) می‌رسد به وقوع می‌پیوندد. میزان خسارت وارده به حساسیت محصول به یخ‌زدگی هنگام وقوع یخبندان و مدت زمانی که دمای هوا زیر دمای خسارت بحرانی قرار دارد (T_c) بستگی دارد. برای مثال در کشورهای آرژانتین، استرالیا، کانادا، فنلاند، فرانسه، یونان، اسرائیل، ژاپن، اردن، نیوزلند، پرتقال، سوئیس، آمریکا و زامبیا، تکنیک‌های پیش‌بینی دمای حداقل توسعه یافته و به حفاظت یخبندان کمک می‌کند. البته بسیاری از کشورهای دیگر مانند کشورهای واقع در مناطق معتدله و خشک و یا مناطقی که در ارتفاعات بلند قرار دارند، با خسارت حاصل از یخبندان مشکلاتی داشته‌اند.

تا حد زیادی پتانسیل خسارت یخبندان بستگی به شرایط محلی دارد، بنابراین انجام یک ارزیابی جغرافیایی از خسارت پتانسیل دشوار می‌باشد. متوسط طول دوره بدون یخبندان که از زمان افت دما به زیر صفر (آخرین حد دما) در بهار تا اولین دمای زیر صفر در پاییز به طول می‌انجامد، اغلب جهت طبقه‌بندی جغرافیایی پتانسیل خسارت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نقشه دنیا شامل طول متوسط دوره بدون یخبندان به وضوح نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل خسارت یخبندان با حرکت به سمت قطب افزایش می‌یابد. تنها در عرض‌های جغرافیایی بین نواحی حاره‌ای Cancer و Capricorn، نواحی

وسیعی با درجه حرارت‌های کم یا بالاتر از صفر وجود دارد. حتی در نواحی حاره‌ای گاهی اوقات خسارت حاصل از یخبندان در ارتفاعات بلند رخ می‌دهد. خسارت احتمالاً زمانی که منطقه در معرض وزش باد قرار دارد یا توسط حوزه‌های بزرگ آبی احاطه می‌شود تا حدی ضعیف می‌باشد که به دلیل اثر متعادل کننده محیط (دریایی) بر روی دما و رطوبت و در نهایت نوسانات دما و تشکیل شبنم یا یخ می‌باشد.

۶- اثرات دود

امروزه به خوبی مشخص شده که حفاظت از طریق استفاده از بخاری‌ها به دلیل گرمای آزاد شده از آتش و شعله آن است و نه به دلیل تولید دود (Collomb, ۱۹۶۶). دود آسمان را می‌پوشاند و جلوی دید را می‌گیرد، و اثر کمی روی دمای هوا در شرایط آسمان صاف دارد. متوسط ابعاد ذرات دود کمتر از ۱ میکرومتر (μm) می‌باشد. این ذرات می‌توانند میزان تشعشع در محدوده قابل رویت ($0.7 - 0.4 \mu\text{m}$) را کاهش دهند، با این حال اثر کمی روی انتقال تشعشعات طول موج بلند دارند. بنابراین عمده تشعشع امواج بلند ایجاد شده از سطح به سمت بالا می‌توانند، از بین دود عبور کنند، بدون آنکه جذب شوند. به همین دلیل دود اثر کمی روی تشعشع رو به بالا و پایین امواج بلند در شب دارد و بنابراین در حفاظت از یخبندان کمتر کارایی دارد. از آنجا که دود فایده کمی دارد یا اصلاً مؤثر نیست و هوا را آلوده می‌کند، بهتر است هر نوع عملیات تولید دود را به حداقل رساند و کارایی حرارتی شعله بخاری را بیشتر نمود. دود در هنگام طلوع آفتاب مانع تشعشع خورشید به زمین می‌شود و در نتیجه گرم شدن محصول به تأخیر می‌افتد. این تأخیر باعث افزایش مصرف سوخت می‌شود و خسارت بیشتری را موجب می‌شود. گزارش‌هایی از آب شدن تدریجی مرکبات یخ‌زده به وسیله دود در دست است که گفته می‌شود خسارت کاهش یافته است (Gerber, George, Bagodanas, ۱۹۷۸) ولی گزارش‌های دیگری حاکی از مخالفت با این نظریه نیز وجود دارد (Baker و همکاران، ۱۹۷۷). اگر این نظریه حقیقت داشته باشد دود ممکن است موثر باشد، ولی قوانین موجود در مورد آلودگی هوا در بیشتر مناطق استفاده از دود را غیرقانونی می‌داند. در جایی که باغات کوچکند و نزدیک جاده هستند، دود بخاری به عنوان یکی از عوامل ایجاد تصادفات اتومبیل شناخته شده است، به گونه‌ای که در شمال ایتالیا قوانین سختی وضع شده و قوانین بیمه در این زمینه خیلی جدی می‌باشد. در نتیجه تولید دود برای حفاظت در برابر یخبندان توصیه نمی‌شود.

۷- شرایط انتخاب مکان‌های مناسب برای کشاورزی

یک مشخصه برجسته تمامی تولیدکنندگان موفق آن است که تمامی آنان از احتمال وقوع یخبندان و خسارت‌های ناشی از آن آگاهی کامل دارند و کلیه شرایط یک مکان را قبل از کاشتن یک گیاه در آن محل، به دقت بررسی می‌کنند. برای برخی از گیاهان مواجهه با دماهای سرد می‌تواند مطلوب باشد (مثلاً سرماهای خفیف شبانه باعث افزایش کیفیت میوه انگور می‌شود)، اما دماهای زیر صفر که آسیب‌دیدگی گیاه را به همراه دارد، هرگز نمی‌تواند مطلوب باشد. بهترین راهکار، یافتن مناطقی است که ریزاقلیم خوبی برای تولید محصولات با کیفیت دارند و دماهای خسارت‌زا در آن مناطق اتفاق نمی‌افتد.



اگر دماهای زیر صفر درجه به صورت ادواری و متناوب و با فراوانی کم اتفاق می‌افتد، می‌توان یک راهکار اقتصادی را در پیش گرفت و از این شرایط بهره‌برداری نمود، بدین منظور از یک روش حفاظتی فعال برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از یخبندان‌ها استفاده می‌شود. اما در زمینه تعیین کارآیی هزینه‌ها باید دقت کرد که هزینه روش حفاظتی مورد استفاده و میزان خسارت‌های احتمالی به گونه‌ای در تعادل باشند که افزایش درآمد ناشی از بهبود کیفیت محصول، این هزینه‌ها را جبران کند. به طور کلی گیاهان در جایی رشد می‌کنند که شرایط آب و هوایی برای رشد آنها مناسب باشد و در این شرایط اغلب، یخبندان و آسیب‌های ناشی از آن است که عامل محدود کننده رشد می‌شود. مثلاً مرکبات در نواحی شرقی دره سان جاکوئین در ایالت کالیفرنیا آمریکا در سطح گسترده‌ای تولید می‌شوند، زیرا یخبندان‌های شدید در این منطقه کمتر اتفاق می‌افتد. دره سان جاکوئین یک شیب آرام رو به پایین در حدود ۱۰۰ کیلومتر از لبه شرقی تا مرکز دره دارد و ناحیه تولید مرکبات در ۳۰ کیلومتر شرقی این منطقه قرار دارد. در این منطقه، فصل بارش باران از دسامبر تا فوریه است و در این مدت غالباً آسمان این منطقه ابری است. با این حال حتی در زمان‌هایی که آسمان ابری نیست، دره سان جاکوئین در معرض تشکیل مه قرار دارد. وجود مه و ابر هر دو باعث افزایش تشعشعات موج بلند رو به پایین و کاهش هدررفت تشعشع خالص می‌شود. از آنجا که در شرایط ابری یا مه‌آلود بودن هوا، میزان هدررفت انرژی تشعشعی کاهش می‌یابد، بنابراین در چنین شرایطی وقوع یخبندان تشعشعی بسیار بعید است. اما در موارد نادری هم ممکن است به علت ایجاد شرایط یخبندان انتقالی، حتی در هوای ابری هم دماهای زیر صفر درجه مشاهده شود. با این حال در این منطقه یخبندان‌های تشعشعی بسیار شایع‌تر از یخبندان‌های انتقالی هستند.

علاوه بر نقشی که ابر و مه در کاهش فراوانی وقوع دماهای زیر صفر درجه دارند، زهکشی هوای سرد به طرف غرب و به سمت خارج از این منطقه نیز موجب کاهش یخبندان‌ها می‌شود. ارتفاع در قسمت شرقی (یعنی منطقه تولید مرکبات) بیشتر از کف دره و قسمت غربی آن است. در مقیاس منطقه‌ای می‌توان گفت که هوای سرد به آرامی به طرف غرب زهکشی می‌شود. بنابراین هیچ تولیدکننده با تجربه‌ای سعی نمی‌کند که باغ مرکبات خود را در قسمت غربی که احتمال آسیب‌دیدگی از یخبندان بیشتر است، احداث نماید.

سومین دلیل رایج بودن تولید مرکبات در این منطقه آن است که به هنگام بعدازظهر توده‌های مه محو می‌شوند و نور خورشید به خاک و گیاهان می‌رسد و تا قبل از غروب آفتاب مقداری گرما از این طریق ذخیره می‌شود. چنین شرایطی در قسمت‌های غربی این دره حاکم نیست، زیرا رشته کوه‌هایی که در قسمت غرب قرار دارد باعث بلوکه شدن گرمای خورشید در بعدازظهر و عصر می‌شود. در سمت شرقی دره، شیب زمین عموماً رو به طرف غرب است و بنابراین به هنگام بعدازظهر میزان دریافت انرژی خورشیدی به ازای واحد سطح بیشتر از سمت غربی دره است.

به منظور انتخاب یک مکان جدید جهت احداث باغ، اولین اقدام آن است که با افراد محلی و بومی در مورد گیاهان و ارقامی که برای آن منطقه مناسب هستند، مشورت و نظرخواهی شود. تولیدکنندگان محلی و کارشناسان و مشاوران ترویجی غالباً ایده‌های ارزشمندی در مورد مکان‌های نامناسب دارند. کاشت گیاهان هرگز نباید در نواحی پست که مه



زمینی در آنجا زودتر تشکیل می‌شود، انجام گیرد. مه‌های زمینی همان مه‌های تشعشعی هستند و همانند یخبندان‌های تشعشعی، غالباً در سردترین نقاط یک منطقه تشکیل می‌شوند.

گام بعدی در راه شناسایی مکان‌های مناسب کشت، ارزیابی داده‌های اقلیمی و تعیین احتمال خطر وقوع یخبندان در منطقه است. یک منبع اطلاعاتی خوب برای داده‌های اقلیمی مناطق مختلف، مجموعه اطلاعاتی سازمان فائو (FAO CLICOM) است که از طریق پایگاه اینترنتی آن (به نشانی www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agl/aglw/climwat.stm) قابل دسترسی است. برای مناطقی که داده‌های اقلیمی ناقص یا غیر قابل دسترسی است، بهتر است که میزان دمای حداقل هوا در محل کاشت، حداقل در یک فصل یخبندان و قبل از آن که یخبندان شدید باعث به بار آمدن خسارتی شود، تعیین و ارزیابی شود. بهترین راه آن است که دمای هوای هر روز به صورت پیوسته و مرتب به وسیله حسگر دمایی که در یک محفظه استاندارد Stevenson نصب شده است، اندازه‌گیری شود. یک مزیت استفاده از محفظه Stevenson آن است که می‌توان داده‌های ثبت شده را با داده‌های ارائه شده از مراکز هواشناسی که از این نوع محفظه استاندارد استفاده می‌کنند، مقایسه نمود. در صورت امکان بهتر است که میزان رطوبت نسبی، سرعت باد و جهت باد نیز تعیین شود. طی دهه‌های اخیر حسگرهای دمایی و رطوبتی الکترونیکی رواج بیشتری پیدا کرده‌اند و از محفظه‌های تابشی Gill بیشتر از محفظه‌های Stevenson استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری دما در شب‌های یخبندان غالباً از محفظه‌های مخصوص میوه‌ها (fruit-frost) استفاده می‌شود. محفظه‌ها و حسگرها از هر نوعی که باشند، لازم است که حسگر دمایی در ارتفاع ۱/۲۵ تا ۲ متری از سطح زمین نصب شود. مقدار دقیق این ارتفاع باید مشابه با ارتفاع نصب حسگرها در مرکز خدمات هواشناسی آن محل باشد.

برخی از هواشناسان و زارعان نیز از شاخص آکتینوترمال (*actinothermal index*) که یک دماسنج بدون محفظه است و بر روی یک پایه چوبی نصب می‌شود، استفاده می‌کنند (دوراند، ۱۹۶۵؛ پرادین، ۱۹۶۵؛ اسکربر، ۱۹۶۵). این دماسنج برای گیاهان کوتاه قد در ارتفاع ۰/۱ متری و برای گیاهان بلند قد در ارتفاع ۰/۵ متری نصب می‌شود. از آنجا که این دماسنج در داخل محفظه‌ای قرار نمی‌گیرد، انتظار می‌رود که دمای ثبت شده از آن به دمای بوته یا شاخه گیاه نزدیک‌تر باشد. برای ارزیابی قابلیت یک مکان کشت، می‌توان با جمع‌آوری داده‌های دمای شبانه طی ۱۰ تا ۲۰ شب سرد، اطلاعات کافی جهت تعیین احتمال وقوع خسارت‌های ناشی از یخبندان در یک منطقه را تأمین نمود (بوچت، ۱۹۶۵).

۸- پیش‌بینی و نمایش داده‌های آب و هوایی:

پیش‌بینی دمای حداقل و آگاهی از چگونگی تغییر دما طی شب برای حفاظت گیاهان از یخبندان بسیار مفید می‌باشد. این پیش‌بینی‌ها کشاورزان را در تصمیم‌گیری اینکه آیا حفاظت نیاز است یا نه و زمان شروع راه اندازی سیستم‌ها چه موقع است کمک می‌کند. برای این منظور توصیه می‌شود ابتدا باغدار با سرویس‌های محلی آب و هوا مشورت نماید تا معلوم شود آیا اطلاعات مربوط به پیش‌بینی‌ها در دسترس هستند. معمولاً از طریق سرویس‌های آب و هوایی می‌توان به اطلاعات زیاد و قابل توجهی دست یافت. آنها از مدل‌های سینوپتیکی و مقیاس متوسط برای انجام پیش‌بینی‌های ناحیه‌ای



استفاده می‌کنند. پیش‌بینی‌های محلی (مقیاس کوچک) عمدتاً در دسترس نیستند، مگر آنکه توسط سرویس‌های خصوصی پیش‌بینی ارائه شده است. بنابراین یک مدل تجربی پیش‌بینی که می‌تواند به آسانی برای شرایط محلی خاص تنظیم شود در این طرح ارایه خواهد شد. در این مدل از داده‌های درازمدت درجه حرارت هوا و نقطه شبنم در دو ساعت بعد از غروب آفتاب استفاده می‌شود و از دماهای حداقل مشاهده شده برای مشخص کردن ضرایب رگرسیون یک ناحیه خاص که برای پیش‌بینی دقیق دمای حداقل طی یک دوره خاصی از سال ضرورت دارد استفاده می‌شود. این مدل تنها طی وقوع یخبندان‌های تشعشعی در نواحی با زهکشی محدود هوای سرد کارایی دارد. برنامه کاربردی دیگری نیز ارائه خواهد شد که برای برآورد دمای حداقل از داده‌های ثبت شده مربوط به دو ساعت پس از غروب آفتاب تا هنگام رسیدن دمای حداقل پیش‌بینی شده در هنگام طلوع در صبح روز بعد، استفاده می‌کند. اگر دمای نقطه شبنم دو ساعت پس از غروب وارد شود، این برنامه دمای دماسنج تر را در شب هنگام محاسبه می‌کند.

۹- پیش‌بینی و نظارت بر شرایط یخبندان

پیش‌بینی دمای حداقل و چگونگی تغییر دما در طول شب، از اهمیت زیادی در زمینه حفاظت در برابر یخبندان برخوردار است، زیرا به کشاورزان کمک می‌کند تا در مورد لزوم استفاده از روش حفاظتی و زمان آغاز به کار یک سیستم، تصمیم‌گیری نمایند. برای دسترسی به پیش‌بینی‌های ارائه شده ابتدا باید با مراکز خدمات هواشناسی محلی تماس گرفت. این مراکز به اطلاعات بسیار جامع‌تری دسترسی دارند و برای انجام پیش‌بینی‌های منطقه‌ای از مدل‌های سینوپتیک و مقیاس‌های متنوعی استفاده می‌کنند. دسترسی به پیش‌بینی‌های محلی (در مقیاس خرد) معمولاً امکان‌پذیر نیست، مگر آنکه به وسیله مراکز خصوصی کوچک این پیش‌بینی‌ها انجام شود. بنابراین در این طرح یک مدل پیش‌بینی تجربی ارائه خواهد شد که به راحتی می‌توان شرایط محلی مربوط به هر منطقه را در آن وارد نمود و محاسبات آن را برای هر محل کالیبره کرد. این مدل با استفاده از داده‌های سال‌های قبل، مربوط به دمای هوا و نقطه شبنم در زمان دو ساعت پس از غروب آفتاب و دمای حداقل مشاهده شده، یک ضریب رگرسیون اختصاصی برای هر محل محاسبه می‌کند و از روی آن دمای حداقل هوا در یک دوره زمانی معین از سال را به دقت پیش‌بینی می‌کند. این مدل تنها در شرایط یخبندان تشعشعی و در مناطقی که زهکشی هوای سرد محدود است، قابل استفاده است. روش محاسبه ضرایب رگرسیون و چگونگی استفاده از این برنامه در گزارش نهایی طرح ارائه خواهد شد.



فصل دوم

ارزیابی و پیش‌بینی یخبندان

مقدمه

ارزیابی و پیش‌بینی شرایط یخبندان، مستلزم تصمیم‌گیری‌ها و تحلیل‌هایی پیچیده و استفاده از احتمالات شرطی و نکات اقتصادی است. پیش‌بینی دقیق یخبندان می‌تواند تاثیر زیادی در کاهش خسارت‌های ناشی از یخبندان داشته باشد، زیرا این فرصت را برای کشاورزان فراهم می‌کند که برای مواجهه با یخبندان مهیا شوند. برای دسترسی به پیش‌بینی‌های ارائه شده ابتدا باید با مراکز خدمات هواشناسی محلی تماس گرفت. این مراکز به اطلاعات بسیار جامع‌تری دسترسی دارند و برای انجام پیش‌بینی‌های منطقه‌ای از مدل‌های سینوپتیک و مقیاس‌های متنوعی استفاده می‌کنند. دسترسی به پیش‌بینی‌های محلی (در مقیاس خرد) معمولاً امکان‌پذیر نیست، مگر آنکه به وسیله مراکز خصوصی کوچک این پیش‌بینی‌ها انجام شود. پیش‌بینی دمای حداقل و آگاهی از چگونگی تغییر دما طی شب نیز برای حفاظت گیاهان از یخبندان بسیار مفید می‌باشد. این پیش‌بینی‌ها کشاورزان را در تصمیم‌گیری اینکه آیا حفاظت نیاز است یا نه و زمان شروع راه اندازی سیستم‌ها چه موقع است کمک می‌کند.

در این بخش خلاصه‌ای از نتایج پژوهش‌های مقدماتی سنتز ملی طرح کاهش ضایعات ناشی از سرمازدگی در زمینه آشنایی با روش‌های پیش‌بینی دماهای بحرانی و یخبندان در کشور ارائه می‌گردد و به بحث و بررسی درباره ارزش و اهمیت پیش‌بینی یخبندان، تشریح مطالعات انجام گرفته در زمینه ابعاد مختلف فرایند پیش‌بینی یخبندان و معرفی برخی از مهم‌ترین مدل‌های پیش‌بینی که در حال حاضر در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌پردازیم. نتایج کامل این مطالعات در گزارش نهایی طرح ارائه خواهد شد.

۱- ارزش پیش‌بینی یخبندان

اگر چه امروزه تصمیم‌گیری بر مبنای تحلیل‌های آماری در بسیاری از مزارع کشاورزی بزرگ در سطح جهان انجام می‌شود، اما کاربرد عملی آن جهت پیش‌بینی یخبندان تنها در موارد محدودی مشاهده شده است. Banguet, (1982) Conklin, Holter, Winkler, Murphy, Katz, (1976) با ارائه مقالاتی به بحث در مورد کاربرد تصمیم‌گیری تحلیلی در ارزیابی میزان کارایی هزینه‌ها در پیش‌بینی یخبندان پرداختند. Winkler, Murphy, Katz (1982) ارزش پیش‌بینی یخبندان در دره یاکسیما در ایالت واشینگتن ایالات متحده را به طور کامل بررسی کردند. این منطقه به خاطر تولید زیاد سیب و تا حد کمتری گلابی و هلو از شهرت زیادی برخوردار است. اما یک مشکل بزرگ هم در این منطقه وجود دارد که در زمان شکفتن جوانه‌ها و نیز در مراحل گلدهی و میوه کوچک این گیاهان، یخ‌زدگی‌های فراوانی روی می‌دهد. این محققان با استفاده از مدل تصمیم‌گیری مارکوف، مدل دیگری ارائه کردند که مشکل یخ‌زدگی‌های این منطقه را با شناسایی عملیات ممکن و رویدادها و پیامدهای احتمالی آنها، بررسی می‌نماید. حساسیت گیاه در برابر یخ‌زدگی طی مراحل شکفتن جوانه‌ها، شکوفه‌دهی و میوه ریز متفاوت است، بنابراین توابعی که رابطه بین میزان خسارت‌های وارد بر گیاه با مقدار دمای حداقل را بیان می‌کنند، برای دوره‌ها و مراحل فصولی مختلف هر گیاه تهیه شدند و بدین ترتیب ارتباط بین



خسارت‌ها و دما مشخص شد. سپس با محاسبه انحراف معیار شرطی، قابلیت مقادیر پیش‌بینی شده در زمینه تعیین حداقل دما با استفاده از داده‌های اقلیمی واقعی، ارزیابی گردید.

۲- پیش‌بینی دمای حداقل

پیش‌بینی زمانی که دمای هوا به پایین‌تر از یک حد بحرانی نزول می‌کند، اهمیت زیادی جهت شروع به کار روش حفاظتی فعال دارد. زمان مناسب شروع و توقف یک سیستم حفاظتی از آن جهت اهمیت زیاد دارد که از وقوع خسارت‌های ناشی از آغاز به کار دیر هنگام حفاظت، جلوگیری می‌کند و با کاهش مدت زمان کارکرد سیستم‌های حفاظتی مختلف، باعث صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شود. اگر چه تشریح چگونگی پیش‌بینی دماهای حداقل با استفاده از مدل‌های سینوپتیک و میان‌یابی، از محدوده این بحث فراتر است، اما کلیاتی در مورد چگونگی پیش‌بینی دمای حداقل در جریان یک یخبندان تشعشعی و با استفاده از داده‌های محلی ارائه می‌شود.

به طور کلی بهترین راه آن است که یک مدل پیش‌بینی دما در سطح کوچک (یعنی در سطح محلی) با استفاده از محاسبات مربوط به تعادل انرژی تهیه شود. چگونگی این کار توسط کالما و همکاران (۱۹۹۲) بررسی و ارائه شده است. مهمترین نتیجه تحقیقات آنها این بوده که «تنها با استفاده از محاسبات مربوط به تعادل انرژی سطحی (سطح زمین)، نمی‌توان پیش‌بینی رضایت‌بخشی در مورد دمای هوا انجام داد، حتی اگر تفاوت بین دمای سطح و دمای هوا را هم بتوان به دقت مشخص کرد» آنها عدم امکان پیش‌بینی دقیق را ناشی از موارد زیر دانستند:

۱. مشکل بودن اندازه‌گیری جریان متلاطم گرمای محسوس در طیف دمایی مربوط به شیب‌های یخبندان

۲. مشکل بودن محاسبه نقش فرایند جابه‌جایی در انتقال گرما

۳. تغییرات مداوم در میزان انتشار گرمای تشعشعی از سطح زمین

کالما و همکاران (۱۹۹۲) پیشنهاد کردند که به جای استفاده از تعادل انرژی برای مطالعه سرعت سرد شدن سطح زمین، بهتر است سرعت یک ستون هوا برآورد شود. با این حال آنان دریافتند که جریان گرمای محسوس در هر دو شکل خود یعنی متلاطم و تشعشعی، به پروفیل‌های عمودی باد، رطوبت و دما بستگی دارد که به دلیل مشکلات موجود در اندازه‌گیری آنها، امکان پیش‌بینی دقیق وجود ندارد.

کالما و همکاران (۱۹۹۲)، مدل یک بعدی پیش‌بینی دما که توسط سادرلند (۱۹۸۰) و کلایر (۱۹۸۲) و (۱۹۹۳) ارائه شده بود را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. مدل سادرلند از یک معادله تعادل انرژی سطحی با فرض ناچیز بودن گرمای نهان و نیز مدل جریان گرما در خاک و یک جریان گرمای محسوس در لایه پایین اتمسفر به ضخامت ۹/۰ متر، استفاده می‌نماید. متغیرهای ورودی عبارتند از دمای دمای هوا در ارتفاعات ۰، ۱/۵، ۳/۰ و ۹/۰ متر، دمای خاک در اعماق ۰/۱ و ۰/۵ متر، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و میزان تشعشع خالص. در نهایت این مدل با یک مدل آماری ترکیب شده تا پیش‌بینی دقیق‌تری به دست آید.



مدل دمای کلایر (۱۹۸۲ و ۱۹۹۳)، تغییرات دما در داخل لایه هوایی تا ارتفاع حدود ۱۰۰ متری در فضا و تا عمق ۱/۰ متر در خاک را اندازه‌گیری می‌نماید. متغیرهای ورودی در این مدل عبارتند از میانگین دمای خاک و سرعت باد و دمای هوا در ارتفاع ۳/۰ متری در هنگامی که تشعشع خالص منفی می‌شود و نیز منفی‌ترین مقدار مورد انتظار تشعشع خالص و دمای نقطه شبنم هنگامی که تشعشع خالص در منفی‌ترین مقدار خود قرار دارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این مدل، برآوردهای واقع‌گرایانه‌ای از تعادل انرژی سطحی به هنگام شب تأمین می‌کند، اما برآوردهای به دست آمده مربوط به انتقال گرما در خاک و ضریب تبادل گرمایی اتمسفر نیاز به انجام اصلاحاتی دارد (کالما و همکاران، ۱۹۹۲).

به طور کلی بهتر است که یک مدل جبری کارآمد برای بررسی تعادل انرژی تهیه شود که تغییرات دما در زمان وقوع یخبندان‌ها را برآورد نماید، اما تاکنون هیچ مدلی که در سطح جهانی پذیرفته شده باشد و متغیرهای ورودی آن را بتوان به سادگی فراهم نمود ارائه نشده است. اما مدل‌های تجربی زیادی برای پیش‌بینی دماهای حداقل گزارش شده‌اند (باگدوناس، جرج و ژربر، ۱۹۷۸) و برخی از آنها هم توانسته‌اند پیش‌بینی‌های نسبتاً دقیق و منطقی حاصل کنند. برای مثال، معادله ارائه شده توسط یانگ (۱۹۲۰) در حد گسترده‌ای توسط مرکز ملی هواشناسی ایالات متحده مورد استفاده قرار گرفته و توانسته است موفقیت‌های چشمگیری در زمینه پیش‌بینی دماهای حداقل به همراه داشته باشد. اما با این وجود، معادله یانگ نمی‌تواند مستقیماً مورد استفاده قرار گیرد. بلکه لازم است بر حسب شرایط محلی به گونه‌ای کالیبره شود که تاثیر فصول مختلف سال و شرایط محلی در این معادله در نظر گرفته شود. این تغییرات عمدتاً به صورت مکان-اختصاصی است و در حد وسیعی منتشر نشده است. باید مشخص شود که جهت بهبود کارایی این مدل در شرایط کشور ایران، چه تغییراتی باید در فرمول آن ایجاد شود. مسلماً با به حساب آوردن زمان سال و شرایط محلی می‌توان دقت پیش‌بینی دمای حداقل را افزایش دهد. در واقع این محققان پیشنهاد کردند که یک مدل پیش‌بینی که از فاکتورهای هواشناسی محلی و داده‌های اقلیمی مکان-اختصاصی استفاده می‌کند، می‌تواند بهترین نتایج را در زمینه پیش‌بینی دمای حداقل حاصل کند. علاوه بر پیش‌بینی دمای حداقل، می‌توان از این مدل و داده‌ها برای پیش‌بینی روند تغییر دما طی یک شب یخبندان نیز استفاده کرد.

سال‌های طولانی بود که مرکز ملی هواشناسی ایالات متحده، پیش‌بینی‌هایی را در مورد وقوع سرما و یخبندان در مناطقی از کشور که محصولات با ارزش کشاورزی و حساس به سرما تولید می‌شدند، انجام می‌داد و نتایج را در اختیار تولیدکنندگان محلی قرار می‌داد. از آنجا که کارشناسان این مرکز از تجربه زیادی در زمینه پیش‌بینی دماهای پایین برخوردارند و تجهیزات پیشرفته‌ای هم در اختیار دارند، می‌توانند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از آنچه که یک زارع در یک یا دو روز قبل از وقوع یخبندان انجام می‌دهد، تهیه نمایند. اما در اواخر دهه ۱۹۸۰، ارائه این خدمات از جانب مرکز ملی هواشناسی آمریکا متوقف شد و زارعان مجبور شدند که به صورت خصوصی پیش‌بینی‌کنندگان را استخدام کنند و یا از روش‌های خودشان برای پیش‌بینی دمای حداقل برای گیاهان زراعی استفاده نمایند.



در زمانی که مرکز خدمات پیش‌بینی یخبندان فعالیت می‌کند، کارشناسان هواشناسی در برخی از ایستگاه‌های مرکزی در یک منطقه پیش‌بینی‌هایی را انجام می‌دهند و زارعان با اعمال فاکتورهای تصحیح و کالیبره کردن این پیش‌بینی‌ها، مقادیر دمای حداقل را برای منطقه و محصول خود پیش‌بینی می‌کنند. به طور کلی تصحیح این مقادیر شامل اضافه کردن یا کم کردن یک مقدار تصحیح از مقدار پیش‌بینی ارائه شده توسط ایستگاه مرکزی است. مثلاً یک زارع ممکن است 0.5C از مقدار پیش‌بینی ارائه شده توسط ایستگاه مرکزی کم کند. در برخی موارد نیز تولیدکنندگان با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری آماری، یک معادله رگرسیون تعیین می‌کنند که در آن دمای حداقل تعیین شده توسط ایستگاه مرکزی به عنوان متغیر مستقل و دمای حداقل برای گیاه مورد نظر به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود.

پس از آنکه ارائه پیش‌بینی یخبندان به وسیله مرکز ملی هواشناسی خاتمه یافت، تولیدکنندگان بزرگ و آن دسته از زارعانی که خسارت‌های زیادی را از یخبندان متحمل می‌شدند، به صورت خصوصی خدمات پیش‌بینی هوا را راه‌اندازی کردند تا دمای حداقل مربوط به گیاه و ناحیه اختصاصی خود را پیش‌بینی نمایند. در برخی موارد نیز گروه‌هایی از کشاورزان با همکاری و سرمایه‌گذاری مشترک، یک مرکز پیش‌بینی خصوصی را اجاره کردند تا همچنان از خدمات ایستگاه‌های مرکزی بهره‌مند باشند. در این شرایط زارعان می‌توانستند کماکان با اعمال فاکتورهای تصحیح مربوط به منطقه خود، دمای حداقل مورد نظر را پیش‌بینی کنند. اگر چه استفاده از مقادیر پیش‌بینی ایستگاه‌های مرکزی و اعمال فاکتورهای تصحیح، می‌تواند در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در دوره‌های دو و سه روزه مفید و قابل استفاده باشد، اما استفاده مستقیم از داده‌های ایستگاه‌های پیش‌بینی کننده در داخل یا نزدیکی ناحیه مورد نظر می‌تواند پیش‌بینی‌ها و نتایج دقیق‌تر و بیشتری را در جریان یک شب یخبندان حاصل نماید.

۱-۲) یک مدل ساده برای پیش‌بینی دمای حداقل

در این طرح یک مدل ساده تجربی که به سادگی می‌توان آن را برای شرایط محلی کالیبره نموده، ارائه خواهد شد. این مدل با استفاده از داده‌های ثبت شده مربوط به دمای هوا و نقطه شبنم در دو ساعت پس از غروب آفتاب و دمای حداقل مشاهده شده در شب‌های یخبندان که آسمان صاف و هوا آرام است، یک رگرسیون محاسبه می‌کند که براساس آن، دمای حداقل در یک دوره خاص از سال پیش‌بینی می‌شود.

داده‌هایی که در این برنامه استفاده می‌شوند، باید تنها در شب‌های یخبندان تشعشعی جمع‌آوری شوند. برنامه در قالب نرم افزار مایکروسافت اکسل نوشته شده است تا وارد کردن داده‌ها آسان‌تر و خروجی برنامه به صورت گرافیکی و مفهوم‌تر باشد.

برای تصمیم‌گیری بهتر در مورد زمان شروع و توقف یک سیستم حفاظتی، بهتر است که علاوه بر دمای حداقل، یک پیش‌بینی از روند تغییر دمای شب نیز داشته باشیم. اطلاع داشتن از روند تغییر دمای شب، به زارع یا باغدار کمک می‌کند که زمان شروع روش حفاظتی فعال را تعیین نماید. مدل، می‌تواند روند تغییر دما را از دو ساعت پس از غروب آفتاب تا طلوع خورشید در صبح روز بعد پیش‌بینی نماید. زمان غروب و طلوع خورشید نیز با توجه به ارتفاع، عرض



جغرافیایی و تاریخ تعیین شده توسط کاربر، مشخص می‌شود. این برنامه با استفاده از یک مدل تجربی، چگونگی تغییر دمای شب را پیش بینی می‌کند. این برنامه علاوه بر دمای هوا، تغییرات دماسنج تر را نیز براساس روند تغییر دما و دمای اولیه نقطه شبنم، محاسبه می‌نماید.

۲-۲) زنگ خطر و نظارت بر شرایط آب و هوایی در شب‌های یخبندان

اگر چه پیش بینی روند تغییر دما در شب‌های یخبندان اهمیت زیادی برای شناسایی تقریبی زمان و نحوه استفاده از روش‌های حفاظتی دارد، اما می‌توان گفت که وجود یک سیستم کنترل و نظارت کارآمد، اهمیت بیشتری دارد. ضروری‌ترین موارد لازم عبارت است از یک زنگ خطر که در هنگام شروع یک روش حفاظتی و قبل از آنکه خسارتی روی دهد، زارع را آگاه نماید و یک شبکه از حسگرهای دمایی در سراسر سطح باغ یا مزرعه، انواع مختلف زنگ خطر از منابع تجاری مختلف قابل دستیابی است. هزینه یک زنگ خطر بستگی به مشخصات و قابلیت‌های آن دارد. برخی از این زنگ‌ها، سیستم‌ها و حسگرهایی دارند که می‌توان آنها را در بیرون از خانه و داخل یک محفظه استاندارد قرار داد و خود زنگ آن را در داخل خانه نصب کرد تا به وقت مقتضی زارع را آگاه نماید. انواع دیگری از این سیستم‌های هوشمند می‌توانند از طریق تلفن یا امواج رادیویی و مادون قرمز، از راه دور با زارع ارتباط برقرار کنند و یا زنگ خطر را به صدا در آورند. به طور کلی هر چقدر تجهیزات و قابلیت‌های این سیستم‌ها بیشتر باشد، هزینه آن نیز بالاتر خواهد بود. به طور معمول، درصد خسارت‌های ناشی از سرمازدگی را با توجه به وضعیت بافت گیاهی که به مدت نیم ساعت در معرض دمای بحرانی قرار گرفته است تعیین می‌کنند، در حالی که دمای هوا در داخل محفظه استاندارد که در ارتفاع $1/5\text{ m}$ نصب می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. پری (۱۹۹۴) پیشنهاد داد که دماسنج‌ها باید در پایین‌ترین ارتفاع ممکن و در همان ناحیه‌ای که حفاظت انجام می‌شود، نصب شوند. وی همچنین بیان کرد که حسگرهایی دمایی باید در جایی نصب شوند که مستقیماً تحت تاثیر سیستم حفاظتی قرار نگیرند (مثلاً در معرض تشعشع گرمایی حاصل از بخاری‌ها).

همان طور که یک لایه مرزی بر روی سطح پوشش گیاهی در مزرعه وجود دارد، یک لایه مرزی کوچک‌تر نیز در اطراف سطوح کوچک مانند برگ و جوانه و میوه تشکیل می‌شود. سطوح در معرض هوا مانند برگ، گل، جوانه و غیره معمولاً به دلیل از دست دادن تابش‌های با طول موج بلند، دمای پایین‌تر از دمای هوا در یک شب یخبندان دارند. در نتیجه گرمای محسوس از طریق لایه مرزی از هوا به سطوح سردتر انتشار پیدا می‌کند، اما انتشار این گونه گرما به اندازه‌ای نیست که بتواند گرمای تشعشعی به هدر رفته را جبران نماید. بدین ترتیب ظرفیت گرمای محسوس بافت‌های گیاهی و هوای مجاور سطوح، باعث می‌شوند که دمای هوا کاهش یابد و وارونگی دمایی در سطح کوچک بر روی بافت‌های گیاهی شکل بگیرد. عمق این لایه مرزی کوچک و شیب گرمای محسوس در این وارونگی دمایی می‌تواند در تعیین سرعت انتقال گرمای محسوس در نظر مؤثر باشد.

بخشی از گزارش نهایی طرح حاضر به مرور اصول و مبانی خطر و احتمال وقوع خسارات ناشی از یخبندان و چگونگی استفاده کشاورزان از این اطلاعات جهت اتخاذ تصمیمات اقتصادی در زمینه حفاظت در برابر یخبندان می‌پردازد. چند



برنامه رایانه‌ای کاربردی نیز جهت تسهیل در انجام محاسبات پیچیده ارائه می‌شود. یک برنامه، احتمال نزول دما به پایین‌تر از حد بحرانی را محاسبه می‌کند و از این طریق سطح اطمینان وقوع حداقل یک یخبندان در یک دوره زمانی تعریف شده (چند سال) را تعیین می‌کند. این برنامه برای تعیین احتمال و خطر وقوع یخبندان در شرایطی که میزان حساسیت به آسیب‌های یخبندان در طول دوره زمانی مورد نظر ثابت باشد، قابل استفاده است. برنامه دیگری نیز احتمال اینکه آخرین یخبندان بهاره یا اولین یخبندان پاییزه در یک روز خاص اتفاق افتد و نیز طول دوره رشد در فاصله بین یخبندان‌های بهاره تا پاییزه را محاسبه می‌کند. این برنامه برای کمک به تصمیم‌گیری درباره خطرات فیزیکی کشت زود هنگام یا برداشت دیر هنگام محصول مفید است.

یک برنامه دیگر نیز برای محاسبه خطر آسیب‌دیدگی یک گیاه یا درخت خاص در طول مراحل فنولوژیکی مختلف آن، که میزان حساسیت متفاوتی به آسیب‌های یخبندان دارند، ارائه می‌شود. این برنامه با تحلیل داده‌های ورودی، جدول داده‌های زیر را ارائه می‌کند:

۱. درصد خسارت‌های سالیانه وارد بر یک محصول در شرایط عدم حفاظت و نیز در شرایط استفاده از ۱۱ روش حفاظتی مختلف

۲. عملکرد سالیانه گیاه در شرایط عدم حفاظت و نیز در شرایط استفاده از ۱۱ روش حفاظتی مختلف

۳. میانگین و انحراف معیار درصد خسارت‌های وارد بر میوه و عملکرد محصول و میزان خسارت‌ها در طول سال‌های مورد نظر

۴. میانگین و انحراف معیار تعداد و طول مدت زمان یخبندان‌ها

در نهایت یک برنامه جامع برای کمک به تعیین ریسک اقتصادی روش‌های حفاظتی و محاسبه میزان کارایی هزینه‌ها در روش‌های حفاظتی مختلف ارائه خواهد شد. این برنامه با تلفیق مقادیر احتمال و خطر و هزینه‌ها و سایر اطلاعات مربوط به روش‌های مختلف، تعیین می‌کند که از کدام روش حفاظتی باید استفاده کرد. این برنامه‌ها به زارعان، باغداران، مشاوران و کارشناسان کشاورزی کمک می‌کند تا بهترین تصمیمات ممکن را در زمان برنامه‌ریزی برای حفاظت در برابر یخبندان اتخاذ کنند و از این طریق خسارت‌های فراوان ناشی از سرما و یخ‌زدگی را کاهش دهند.

جمع‌بندی :

دستورالعمل‌های اجرایی و اطلاعات جانبی مربوط به آنها که برای مقابله با تنش‌های سرما و یخ‌زدگی گیاهان ارائه گردید، مبتنی بر مطالعات و اقدامات عملی انجام گرفته در کشورهای مختلف جهان است که می‌توان با بهره‌گیری از نتایج مطالعات انجام شده در کشورهایی که شرایط مشابه دارند، کم‌هزینه‌ترین و بهترین روش‌ها را برای معرفی به عرصه کشاورزی کشور و استفاده در برنامه‌های مدیریت تنش‌های سرما و یخ‌زدگی انتخاب نمود.

امروزه روش‌های حفاظتی غیرفعال و درازمدت در حد بسیار گسترده‌ای در تمامی کشورهایی که با مشکل سرمازدگی مواجه هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در واقع روش‌های غیرفعال غالباً مؤثرتر و کم‌هزینه‌تر از روش‌های فعال و کوتاه‌مدت هستند. بنابراین در کشور ما نیز با به کار بردن مناسب‌ترین روش‌های غیرفعال از قبیل انتخاب مکان‌هایی که کمتر در معرض خطر یخبندان هستند، کاشت درختان خزان‌دار و واریته‌های گیاهی دیرگل، کاشت گیاهان خزان‌دار در شیب‌های غیرمواجه با نور خورشید، کاشت مرکبات در شیب‌های روبه خورشید، حفظ میزان آب خاک در حد مناسب برای دستیابی به بالاترین میزان انتشار گرما در خاک و غیره، می‌توان از اغلب خسارت‌های ناشی از سرما و یخبندان جلوگیری نمود و هزینه سنگین روش‌های حفاظتی فعال را حذف نمود. اما در شرایطی که روش‌های غیرفعال برای تأمین حفاظت در برابر سرما کفایت نکنند، ممکن است ناگزیر به استفاده از روش‌های فعال باشیم.

امروزه بخاری‌های مایع‌سوز و جامدسوز، همچنان در بسیاری از کشورها به عنوان روش حفاظتی مؤثر، مورد استفاده کشاورزان قرار می‌گیرند. مثلاً در کشور مکزیک به دلیل ارزان بودن سوخت، از بخاری‌های نفت‌سوز استفاده بسیار زیادی می‌شود. اما هزینه گزاف و مشکلات موجود در زمینه دسترسی به سوخت، به یک مشکل بزرگ در اغلب کشورهای دنیا تبدیل شده است. در کشور ما با توجه به وفور منابع سوخت فسیلی، ارزان بودن سوخت، قدمت زیاد استفاده از انواع بخاری و شناخته شده بودن بیشتر بخاری‌ها در مقایسه با سایر تجهیزات حفاظتی، هنوز هم بخاری‌ها به عنوان گزینه مناسبی جهت مقابله با سرمازدگی به شمار می‌روند. از طرفی ماشین‌های باد و بالگردها به دلیل هزینه بسیار سنگین و محدودیت استفاده در اراضی کم‌وسعت، هنوز در کشور ما مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. آب‌پاش‌های رودرختی و زیردرختی که در انواع بسیار زیادی از درختان و گیاهان زراعی و باغی در دنیا استفاده می‌شوند، می‌توانند در مناطقی از کشور که محدودیت منابع آب وجود ندارد، گزینه مناسبی باشند. روش‌های آبیاری قطره‌ای و آبیاری سطحی نیز از کارایی خوبی در برخی مناطق کشور ما برخوردارند. مزیت بزرگ روش‌های آبیاری آن است که علاوه بر اهداف حفاظتی در برابر سرما، می‌توانند جهت آبیاری نیز مورد استفاده قرار گیرند و سود اقتصادی حاصل از آنها بدین طریق افزایش می‌یابد. اما مسلماً در مناطق دارای اقلیم خشک که پهنه وسیعی از کشور ما را شامل می‌شود، استفاده از این روش‌ها بسیار پرهزینه و غیراقتصادی خواهد بود.

در مجموع انتخاب یک روش حفاظتی مناسب، بستگی به ترکیبی از عوامل اقلیمی، آب و هوایی و اقتصادی دارد. مثلاً در منطقه‌ای که پدیده وارونگی دمایی شایع باشد، اغلب روش‌های فعال قابل استفاده‌اند. زیرا کارایی این روش‌ها در شرایط



وارونگی دمایی افزایش می‌یابد. اما در مناطقی که وزش باد شایع است، معمولاً یخبندان‌ها از نوع انتقالی است و روش‌های حفاظتی مختلف نمی‌توانند حفاظت چندانی برای گیاهان تأمین کنند.

مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در نوع برنامه‌های مدیریتی مبارزه با سرما در یک منطقه، سطح هزینه‌ها و میزان دسترسی به منابع و امکانات است. اما عوامل مهم دیگری از قبیل سطح اراضی، نوع محصول رایج در منطقه، میزان پیشرفت در مکانیزه کردن عملیات کشاورزی، میزان حمایت‌های بخش دولتی، شرایط اجتماعی و فرهنگی و غیره نیز در این میان نقش برجسته‌ای دارند. نتایج ارزیابی‌های مداوم در زمینه شرایط اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی در یک منطقه می‌تواند باعث شود که روش‌های حفاظتی غالب و متداول در منطقه، با روش‌های مؤثرتر و جدیدتر جایگزین گردند. در نهایت لازم است با انجام بررسی‌های جامع و جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های کافی، روش‌های بهینه برای هر منطقه معرفی شوند تا با بهره‌گیری از آنها بتوان حجم عظیم خسارت‌های ناشی از سرمازدگی در کشور را کاهش داد و هزینه بسیار گزاف تحمیلی از جانب این تنش خسارت‌بار را به حداقل رساند.



فهرست مطالب

صفحه

موضوع

فصل اول : دستورالعمل‌های اجرایی برای مقابله با سرمازدگی محصولات زراعی و باغی

۲	مقدمه
۳	الف) دستورالعمل‌های اجرایی
۳	۱- ثبت اطلاعات
۴	۲- تصمیم‌گیری به وسیله باغداران
۴	۱-۲) تهیه و تدارک ابزار و وسایل
۴	۲-۲) تعیین دمای بحرانی
۵	۳-۲) دستورالعمل برای پیش‌بینی
۵	۴-۲) استفاده از دستگاه اعلام یخ‌بندان Frost Alarm
۵	۵-۲) کشیک شبانه
۵	۶-۲) تصمیم‌گیری برای اعمال حفاظت
۶	۳- به کارگیری روش حفاظتی
۸	۱-۳) روش‌های حفاظتی غیرفعال
۸	۱-۱-۳) انتخاب و مدیریت مکان
۹	۲-۱-۳) زهکشی هوای سرد
۹	۳-۱-۳) انتخاب بوته
۱۰	۴-۱-۳) پوشش (کنوپی) درختان:
۱۰	۵-۱-۳) مدیریت کوددهی گیاه:
۱۱	۶-۱-۳) مدیریت آفات:
۱۱	۷-۱-۳) هرس مناسب:
۱۲	۸-۱-۳) پوشاندن گیاهان با پوشش‌های مناسب
۱۲	۹-۱-۳) اجتناب از خاک‌ورزی
۱۲	۱۰-۱-۳) آبیاری صحیح
۱۳	۱۱-۱-۳) حذف گیاهان پوششی از مزرعه یا باغ
۱۳	۱۲-۱-۳) پوشش‌های روی خاک



- ۱۳-۱-۳) رنگ زدن و پیچیدن پوشش به دور تنه درخت ۱۴
- ۱۴-۱-۳) کنترل باکتری‌ها : ۱۴
- ۲-۳) روش‌های حفاظتی فعال : ۱۵
- ۱-۲-۳) بخاری‌ها ۱۵
- الف) بخاری‌های مایع‌سوز ۱۶
- ب) بخاری‌های با سوخت پروپان و گاز طبیعی ۱۷
- ج) بخاری‌های با سوخت جامد ۱۸
- د) بخاری‌های متحرک ۱۹
- ۲-۲-۳) ماشین‌های باد ۱۹
- ماشین‌های باد با جریان عمودی ۲۲
- ۳-۲-۳) بالگردها ۲۲
- ۴-۲-۳) آب‌پاش‌ها ۲۳
- ۵-۲-۳) آبیاری قطره‌ای ۳۰
- ۶-۲-۳) آبیاری سطحی ۳۰
- ۷-۲-۳) غرقاب کردن ۳۱
- ۸-۲-۳) آبیاری شیار ۳۱
- ۹-۲-۳) عایق‌سازی با کف ۳۲
- ۱۰-۲-۳) مه‌سازها ۳۳
- ۱۱-۲-۳) روش‌های ترکیبی ۳۴
- الف) ماشین‌های باد و آب‌پاش‌های زیردرختی ۳۴
- ب) ماشین‌های باد و آبیاری سطحی ۳۴
- ج) ماشین‌های باد و بخاری‌ها ۳۵
- د) آب‌پاش‌ها و بخاری‌ها ۳۵
- ب) راهنمایی‌ها و آموزش‌های راهبردی ۳۶**
- ۱- استفاده از نقطه شب‌نم در تعیین احتمال وقوع یخ‌بندان ۳۶
- ۲- نکاتی در مورد تخمین دمای نقطه شب‌نم ۳۸
- ۳- تعریف یخ زدگی و یخ‌بندان ۴۰
- ۱-۳) یخ‌بندان تشعشعی ۴۱



- ۴۲..... یخبندان انتقالی..... (۲-۳)
- ۴۳..... حساسیت محصول و دماهای بحرانی..... ۴-
- ۴۴..... ارزیابی جغرافیایی خسارت یخبندان به محصولات..... ۵-
- ۴۵..... اثرات دود..... ۶-
- ۴۵..... شرایط انتخاب مکان‌های مناسب برای کشاورزی..... ۷-
- ۴۷..... پیش‌بینی و نمایش داده‌های آب و هوایی:..... ۸-
- ۴۸..... پیش‌بینی و نظارت بر شرایط یخبندان..... ۹-

فصل دوم: ارزیابی و پیش‌بینی یخبندان

- ۵۰..... مقدمه.....
- ۵۰..... ارزش پیش‌بینی یخبندان..... ۱-
- ۵۱..... پیش‌بینی دمای حداقل..... ۲-
- ۵۳..... (۱-۲) یک مدل ساده برای پیش‌بینی دمای حداقل.....
- ۵۴..... (۲-۲) زنگ خطر و نظارت بر شرایط آب و هوایی در شب‌های یخبندان.....
- ۵۶..... جمع‌بندی :.....



وزارت کشور

کمیته ملی کاهش بلایای طبیعی



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان حفظ نباتات



واحد صنعتی اصفهان

گزارش مقدماتی

طرح مطالعاتی کاهش ضایعات سرمایه‌گذاری محصولات کشاورزی کشور

دستورالعمل‌های اجرایی برای مقابله با سرمایه‌گذاری محصولات زراعی و باغی

مجری: گروه تخصصی دفع آفات، امراض نباتی و سرمایه‌گذاری

مشاور: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان

پائیز ۱۳۸۵