مقدمه‌ای بر شناخت پدیده یخبندان و سرمازدگی

تدوین و ترجمه

جلیل هلالی

۱-۱-مقدمه

از نقطه نظر هواشناسی وقتی دمای کمینه هوا به زیر صفر درجه سلسیوس افت کند، گیاهان حساس تحت تأثیر قرار گرفته، آسیب دیده و این آسیب باعث کاهش محصول خواهد شد. به عنوان مثال در ایالات متحده خسارت ناشی از یخبندان نسبت به سایر مخاطرات زیانبخش جوی بیشتر است (وایت و هاس، ۱۹۷۵). بنابراین این امر اثرات مخربی بر اقتصاد کشاورزی منطقه‌ای خواهد داشت. با وجود بدیهی بودن اهمیت موضوع آگاهی درباره چگونگی حفاظت گیاهان از یخبندان و سرمازدگی نسبتاً محدود است. بنابراین نیاز به منابع اطلاعاتی ساده‌ای است تا با استفاده از آن بتوان مشکلات متعدد کشاورزان در این زمینه را برطرف نمود. در این کتاب جنبه‌های پراکنش، اقتصادی، تاریخی، فیزیکی و بیولوژیکی خسارت ناشی از یخبندان و سرمازدگی معرفی گردیده و در ادامه روش‌های حفاظت از آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. هر چند این نوشته دامنه وسیعی از اطلاعات ساده تا پیچیده را شامل می‌شود ولی سعی شده به طور ساده بیان شده و از این طریق به کشاورزان کمک کند تا درک بیشتری از حفاظت از یخبندان داشته باشند و راهکارهایی را به اجرا گذارند که تلفات ناشی از یخبندان و سرمازدگی بر محصولات را کاهش دهند. این منابع برای کسانی که می‌خواهند اطلاعات بیشتری در مورد دانش مبارزه با یخبندان و سرمازدگی داشته باشند اهمیت دارد.

۱-۲- تعریف سرمازدگی و یخبندان

کلمه یخبندان (*Frost*) به طور عام بیان کننده نوعی پدیده هواشناسی است که در اثر آن محصولات زراعی و دیگر گیاهان، در معرض خسارت قرار می‌گیرند. کشاورزان از کلمه یخبندان و سرمازدگی (*Chilling*) با یک تعریف نامشخص و مبهم که به صورت "دمای هوای کمتر یا برابر با صفر درجه سلسیوس" می‌باشد، استفاده می‌کنند. مثال‌هایی از یخبندان که در منابع علمی به آن‌ها اشاره شده است عبارتند از:

۱-پدیده حرارتی کمتر یا مساوی صفر درجه سلسیوس در جعبه استیونسن در ارتفاع ۱/۲۵تا ۲ متری (هوگ، ۱۹۵۰ و ۱۹۷۱؛ لاورنس، ۱۹۵۲).

۲-وقوع دمایی کمتر از صفر درجه سلسیوس بدون تعریف ارتفاع و جعبه هواشناسی (راپوسو، ۱۹۶۷؛ هوت، ۱۹۷۱).

۳- کاهش دمای هوا به کمتر از صفر درجه سلسیوس (چونها، ۱۹۵۲) بدون اشاره به تشکیل بلور یخ که باعث خسارت یا مرگ گیاه شود (ونتسکویچ، ۱۹۵۸؛ ویت کویچ، ۱۹۶۰).

اشنایدر و همکاران (۱۹۸۷) و کالما و همکاران (۱۹۹۲) یخبندان را به دو صورت تعریف کرده‌اند: ۱- یخبندان فرارفتی و ۲- یخبندان تابشی. در یخبندان‌های فرارفتی پدیده‌هایی از قبیل ورود توده هوای سرد بزرگ مقیاس اختلاط شده، بادناکی و دمای زیر صفر درجه حتی در ساعات روز وجود دارد (جدول ۱-۱). در یخبندان‌های تابشی یخبندانی که به وجود می‌آید به دلیل اتلاف

انرژی از طریق تبادل تابشی در شب‌های صاف، بدون بادناکی و وارونگی دمایی (افزایش دما با ارتفاع) می‌باشد. در بعضی حالات ترکیبی از این دو نوع یخبندان نیز روی می‌دهد. برای نمونه در یخبندان فرارفتی وجود شرایط فرارفتی توده هوای سرد بر روی منطقه غیر عادی نیست. این امر ممکن است در چند روز بعدی که شرایط آرام و صاف ایجاد می‌شود منجر به یخبندان‌های تابشی گردد. علاوه بر این، شرایطی هم مشاهده شده که یخبندان فرارفتی در مقیاس کوچک ایجاد شده است. این امر وقتی روی می‌دهد که منطقه در معرض شرایط یخبندان تابشی باشد ولی تخلیه هوای سرد محلی منجر به کاهش سریع دما در مقیاس کوچک در داخل سطح یخبندان تابشی گردد.

جدول ۱-۱- انواع مختلف یخبندان و ویژگی آن‌ها

نوع یخبندان	ویژگی‌ها
تابشی	آسمان صاف، بدون بادناکی، وارونگی دمایی، دما در طول روز بیشتر از صفر درجه سلسیوس است
فرارفتی	بادناکی، بدون وارونگی دما، دما ممکن است در طی روز به کمتر از صفر درجه هم برسد

تعریف سرمازدگی و یخبندان که در دایره‌المعارف‌ها و منابع متعدد آمده متفاوت بوده و دارای اختلافات جزئی است ولی در سرتاسر جهان کلمه مبارزه با یخبندان بیشتر از حفاظت از سرمازدگی کاربرد داشته و مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس منابع موجود تعاریف مورد استفاده نیز به درستی انتخاب شده‌اند. یخبندان در دمای هوای صفر درجه سلسیوس یا کمتر رخ می‌دهد که در ارتفاع بین ۱/۲۵ تا ۲ متری بالای سطح خاک و در درون ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت یخ زدن یا نزدن آب فضای بین سلولی در گیاه بستگی به چندین عامل مهم دارد: ۱- فوق تبریدی و ۲- غلظت باکتری‌های مولّد هسته یخی. سرمازدگی وقتی روی می‌دهد که آب فضای بین سلولی درون گیاه یخ بزند (تغییر از فاز مایع به جامد). یخبندان وقتی تبدیل به سرمازدگی می‌شود که یخ زدگی فضای بین سلولی در درون گیاهان رخ بدهد. خسارت یخزدگی وقتی ایجاد می‌شود که دمای بافت گیاه به زیر مقدار آستانه برسد که از لحاظ فیزیولوژی غیرقابل برگشت بوده و باعث مرگ یا تخریب سلول‌های گیاهی می‌شود. این دمای خسارت زننده به بافت گیاه با دمای هوایی که دماهای بحرانی نامیده می‌شود همبستگی دارد و در پناهگاه‌های استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. دمای هوای زیر صفر درجه باعث کاهش ظرفیت گرمای محسوس هوای نزدیک سطح زمین می‌گردد که به طور کلی ناشی از ۳ عامل می‌باشد:

۱) اتلاف تابش خالص به واسطه تابش از سطح زمین به نیوار (یخبندان تابشی)

۲) وزش هوای زیر صفر درجه و جایگزینی آن با هوای گرم‌تر (یخبندان فرارفتی)

۳) ترکیبی از این دو فرآیند.

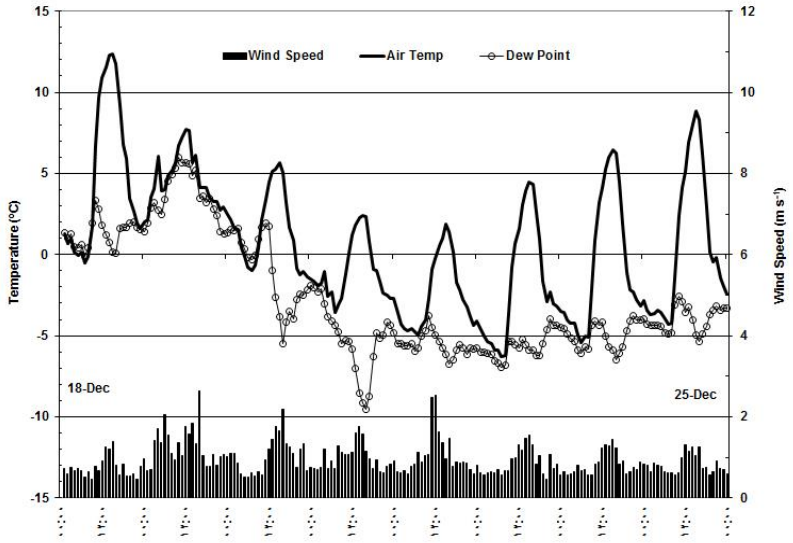
۱-۳- یخبندان تابشی

این نوع یخبندان بیشتر رخ می‌دهد. از ویژگی‌های یخبندان تابشی می‌توان به آسمانی صاف، هوایی بدون بادناکی، وارونگی دمایی، دمای نقطه شبنم پایین، دمای هوای زیر صفر درجه در شب و در طی روز دمای بالای صفر درجه سلسیوس اشاره نمود. دمای نقطه شبنم، دمایی است که در آن دما تا حدی سرد می‌شود که رطوبت نسبی به ۱۰۰ درصد برسد و به طور مستقیم با استفاده از رطوبت نسبی اندازه‌گیری می‌شود. به منظور بیان اختلاف یخبندان تابشی و فرارفتی، داده‌های مربوط به دو نمونه از بدترین یخبندان‌های قرن بیستم کالیفرنیا که مربوط به منطقه کشت مرکبات است در شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که دمای بیشینه روزانه با حرکت توده هوای سرد بر روی منطقه به طور قابل ملاحظه کاهش یافته است. بر اساس سرعت باد معلوم است که یخبندان فرارفتی رخ نداده است زیرا سرعت باد در شب که دما زیر صفر درجه بوده خیلی کم بوده و سرعتی نداشته است. همچنین به علت ابری در طی چندین روز اول وقوع یخبندان، دماهای زیر صفر را می‌توان به فرارفت هوای سرد بر روی سطح منطقه نسبت داد تا به اتلاف تابش خالص. حوادث مشابه این دو یخبندان که قبلاً نیز در سال‌های ۱۹۱۳ و ۱۹۳۷ به وقوع پیوسته نسبتاً نادر است. همچنین این پدیده در اقلیم‌های قاره‌ای که وقوع دماهای زیر صفر درجه امری عادی است طبیعی می‌باشد. در شب‌هایی که آسمان کاملاً صاف است گرمای خروجی از سطح زمین نسبت به گرمای رسیده بیشتر شده و دما کاهش می‌یابد. اُفت سریع‌تر دما در نزدیک سطح تابشی باعث پدیده وارونگی دمایی می‌شود. این فرآیند در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. بدین صورت اتلاف خالص انرژی به واسطه تابش از سطح ظرفیت گرمای محسوس سطح خاک با گرمای محسوس تلف شده جایگزین می‌شود. این امر باعث کاهش دما در ارتفاعات بالا به همان اندازه می‌شود اما نه به سرعتی که در سطح زمین رخ داده است. عمق و ارتفاع وارونگی دمایی متغیر بوده و به توپوگرافی و شرایط آب‌وهوایی محل بستگی دارد ولی معمولاً دامنه آن ۹ تا ۶۰ متری می‌باشد (پِری، ۱۹۹۴).

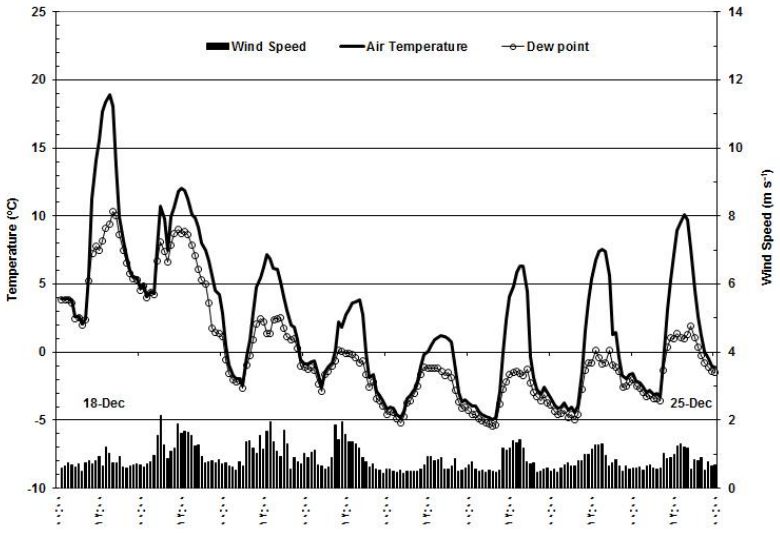
اگر دمای هوا در یک ارتفاع مناسب از سطح خاک اندازه‌گیری شود به نقطه‌ای می‌رسیم که دما با ارتفاع کم می‌شود (اُفتاهنگ). ترازی که نیمرخ دما از شرایط وارونگی به شرایط اُفتاهنگ تغییر می‌کند را سقف می‌گویند. وارونگی ضعیف (بیشینه ارتفاع) وقتی رخ می‌دهد که دمای ارتفاعات بالاتر تا حدودی بیشتر از نزدیک سطح زمین باشد و وارونگی شدید (حداقل ارتفاع) هم وقتی اتفاق می‌اُفتد که دما نسبت به ارتفاع سریع‌تر افزایش می‌یابد. روش‌های حفاظت مبتنی بر تجمع انرژی در شرایطی که وارونگی دمایی شدید و حداقل ارتفاع وجود دارد مؤثر خواهد بود. یخبندان‌های تابشی بر دو نوع است:

۱- ژاله یا یخبندان سفید: موقعی روی می‌دهد که بخار آب بر روی سطوح قرار گرفته و تشکیل پوششی سفید از یخ می‌دهد که معمولاً یخبندان نامیده می‌شود.

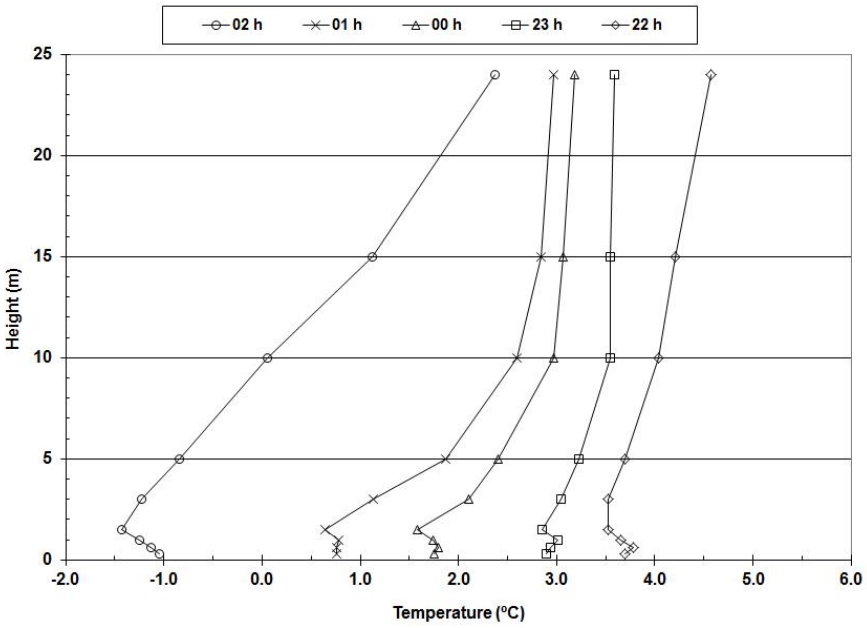
۲- یخبندان سیاه: وقتی رخ می‌دهد که دما سریعاً به زیر صفر درجه سلسیوس افت کرده و هیچ پوشش یخی بر روی سطوح تشکیل نشود. اگر رطوبت کم باشد در آن صورت حرارت سطح به دمای نقطه یخی نرسیده و پوشش یخی نیز تشکیل نخواهد شد، اما وقتی رطوبت به اندازه کافی باشد به احتمال زیاد یخ رسوب کرده و می‌تواند یخبندان سفید تشکیل شود. به دلیل اینکه در طی فرآیند یخزدگی گرما آزاد می‌گردد یخبندان‌های سفید معمولاً باعث خسارت کمتری نسبت به یخبندان سیاه می‌شوند. یادآوری می‌شود که نمودار دمای هوای روزانه برای یخبندان‌های دسامبر در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۸ در کالیفرنیا (شکل ۱-۱ و ۱-۲) در هر دو سال تا حدودی مشابه هستند اما روندهای دمای نقطه شبنم در دو سال دارای اختلاف می‌باشند.



شکل۱-۱-نمودار دمای متوسط و نقطه شبنم در ار تفاع ۱/۵ متری و سرعت متوسط باد در ارتفاع دو متری، دسامبر ۱۹۹۰، لیندکوو کالیفرنیا.

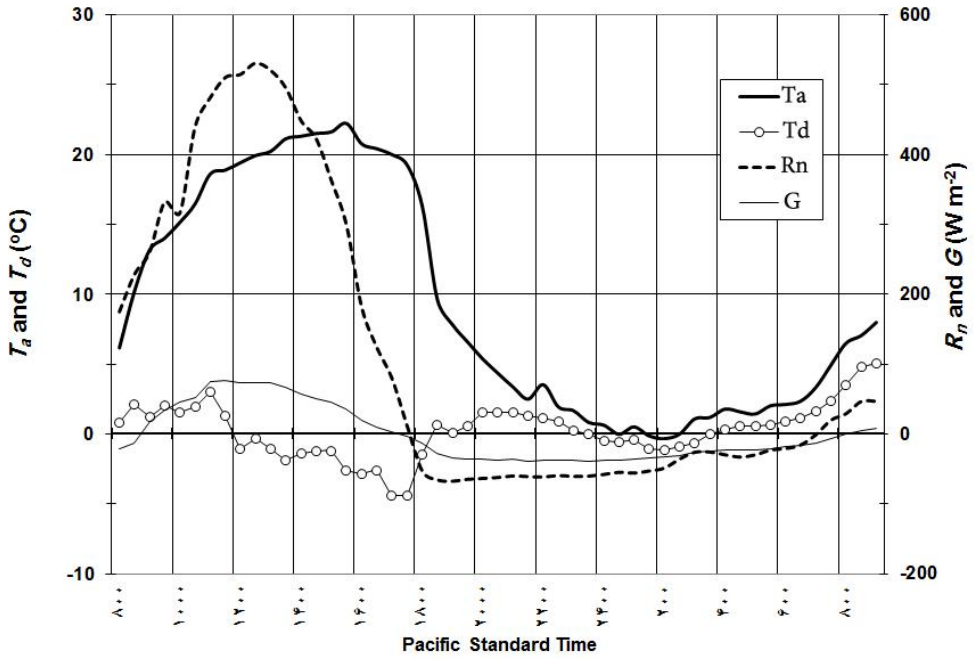


شکل ۱-۲-نمودار دمای متوسط و نقطه شبنم در ارتفاع ۱/۵ متری و سرعت متوسط باد در ارتفاع دو متری، دسامبر ۱۹۹۸، لیندکوو کالیفرنیا.



شکل۱-۳- گسترش وارونگی دمایی در باغ سیب، شمال پرتغال.

چون در بیشتر شب‌ها نمودار دمای هوا شکل مشابهی دارند روند تغییرات دمای هوای شبانه می‌تواند با یک مدل تجربی به خوبی ارائه شود. همچنین به دلیل تغییرات موجود، تقریباً ارائه مدل عمومی تغییرات دمای نقطه شبنم در طی شب غیرممکن است. از ویژگی بارز دمای هوا در شب‌هایی که یخبندان تابشی به وجود می‌آید اُفت دما در چند ساعت نزدیک طلوع آفتاب است یعنی زمانی که تابش خالص سطح زمین سریعاً از مثبت به منفی تغییر می‌کند. این تغییر سریع در تابش خالص به این دلیل است که تابش بیشینه خورشید در هنگام ظهر به کمترین مقدار خود در زمان طلوع آفتاب رسیده و تابش خالص خورشیدی با طول موج بلند همیشه منفی می‌گردد. در این رابطه جزئیات بیشتر در فصل ۳ بیان شده است. شکل ۱-۴ وضعیت کلی روند دما، تابش و چگالی جریان حرارت خاک در شب دارای یخبندان تابشی را نشان می‌دهد. در این مثال (شکل ۱-۴) در اولین ساعت بعد از اینکه تابش خالص منفی شده افت دمای ۱۰ درجه رخ داده است. سرعت تغییر دما در ۲ ساعت بعد از غروب تا طلوع آفتاب کم بوده است (کمتر از ۱ درجه سلسیوس بر ساعت).



شکل ۱-۴- دمای هوا (T_a) و دمای نقطه شبنم (T_d) در ارتفاع ۱/۵ متری، تابش خالص (R_n) و چگالی شار حرارت خاک (G) اندازه‌گیری شده در باغ گردو در دره ایندیانای کالیفرنیای شمالی، ایالات متحده.

۱-۴- یخبندان فرارفتی

این نوع یخبندان‌ها موقعی رخ می‌دهند که هوای گرم موجود منطقه در اثر وزش هوای سردتر جایگزین گردد که با شرایط ابری، بادناکی متوسط تا شدید، بدون وارونگی دمایی و رطوبت کم همراه است. علاوه بر این، ، دما در اغلب موارد به کمتر از نقطه انجماد افت نموده و در تمام طول روز ثابت باقی می‌ماند. چون بیشتر روش‌های حفاظت از یخبندان در جایی که وارونگی دما وجود دارد بیشترین تأثیر را دارند لذا مبارزه با یخبندان فرارفتی مشکل است.

در اکثر موارد دمای شب‌های زیر صفر درجه به عنوان شروع یخبندان فرارفتی لحاظ می‌گردد که بعداً به شب‌هایی با یخبندان تابشی تبدیل می‌شود. برای نمونه یخبندان‌های عمده کالیفرنیا در ۱۹۹۰ و ۱۹۹۸ در شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲ هر دو به صورت یخبندان فرارفتی شروع شده‌اند. اگر چه سرعت باد کم بوده ولی شرایط ابری از ۱۸ تا ۲۰ دسامبر ۱۹۹۰ و از ۱۸ تا ۲۲ دسامبر ۱۹۹۸ وجود داشته است. همچنین دما در طی این دوره‌ها در زیر صفر درجه سلسیوس باقی مانده است. بعد از صاف شدن آسمان (۲۱ تا ۲۵ دسامبر ۱۹۹۰ و ۲۳ تا ۲۵ دسامبر ۱۹۹۸) اُفت دما به زیر صفر درجه عمدتاً از اتلاف تابشی بوده است تا از فرارفت هوای سرد. یخبندان‌های اصلی در اقلیم‌های مدیترانه‌ای روی می‌دهند ولی در قسمت شرقی قاره‌ها که توده‌های هوای قاره‌ای

بعضی اوقات از مناطق قاره به نواحی گرمسیری فرارفت می‌شود عمومیت دارد. از مهم‌ترین چشم اندازهای بارز این فرآیندها مناطق کشت مرکبات در ایالت فلوریدای آمریکاست. آتاووی (۱۹۹۷) ذکر کرده اولین تأثیر مهم یخبندانی که در سال ۱۸۳۵ رخ داده و به وسیله جان لی ویلیامز گزارش شده این بوده که باد شمال غربی تا ۱۰ روز جریان داشته و دما به اندازه ۱۳/۹- اُفت کرده است به طوری که رودخانه محلی یخ زده و همه نوع درختان میوه تا عرض ۲۸ درجه جنوبی از بین رفته‌اند. نکته‌ای که اهمیت دارد این است که وقوع یخبندان‌های اصلی با روند دوره‌ای اتفاق می‌اُفتند، در حالی که یخبندان‌های تابشی در اغلب موارد رخ می‌دهند.

۱-۵- طبقه‌بندی روش‌های حفاظت از یخبندان

روش‌های حفاظت از یخبندان به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (باگدوناس و همکاران، ۱۹۷۸) یا فعّال و غیر فعّال طبقه-بندی می‌شوند (کالما و همکاران،۱۹۹۲). روش‌های غیرفعال آن‌هایی هستند که پیشگیرانه بوده و برای یک دوره طولانی هستند و موقعی مفیدند که شرایط یخبندان رخ می‌دهد. روش‌های فعال موقتی بوده و متمرکز بر انرژی و نیروی کار یا هر دو است. روش-های غیرفعّال با تکنیک‌های اکولوژیکی و بیولوژیکی مرتبط است که شامل اقدامات انجام شده قبل از شب یخبندان برای کاهش پتانسیل خسارت یخبندان است. روش‌های فعال به طور فیزیکی دارای اصولی بوده و مبتنی بر تمرکز انرژی است که نیاز به اقداماتی در قبل یا در طی شب وقوع یخبندان دارند. حفاظت فعّال شامل سیستم‌های حرارتی، آبیاری بارانی و ماشین‌های مولّد باد می‌باشند که در طی شب یخبندان مورد استفاده قرار می‌گیرند تا تلفات انرژی از دست رفته را جبران و جایگزین انرژی‌های تلف شده گردند. روش‌های فعّال و غیر فعّال حفاظت از یخبندان در جدول ۱-۲ ارئه شده است.

۱-۶- ارزیابی جغرافیایی خسارت یخبندان به محصولات

خسارت ناشی از یخبندان می‌تواند در هر مکانی (به جز مناطق گرمسیری)، که دما به زیر نقطه انجماد آب افت می‌کند مشاهده شود و مقدار آن بستگی به حساسیت محصول، زمان وقوع یخبندان و طول مدتی که دمای هوا زیر دمای خسارت بحرانی (T_c) باشد دارد. برای نمونه ، آرژانتین، استرالیا، کانادا، فنلاند، فرانسه، یونان، فلسطین اشغالی، اردن، نیوزلند، پرتغال، سویس، ایالات متحده آمریکا و زامبیا تکنیک‌های پیش‌بینی دمای حداقل را برای کمک به حفاظت از یخبندان گسترش داده‌اند (باگدوناس و همکاران، ۱۹۷۸). البته مشکل کشورهای دیگر در اقلیم‌های معتدل و خشک و در ارتفاعات بالا با خسارت یخبندان دائمی می-باشد.

جدول ۱-۲- طبقه‌بندی روش‌های حفاظت از یخبندان

غیرفعال	بیولوژیکی(فرار از تنش)	القا مقاومت به یخبندان بدون اصلاح ژنتیکی گیاه
		تیمار بذور با مواد شیمیایی
		گزینش گیاهان و اصلاح ژنتیکی
		گزینش گیاهان برای تنظیم توسعه فنولوژیکی
		گزینش تاریخ کشت برای گیاهان یکساله برای کاهش احتمال یخبندان در بهار
		استفاده از تنظیم کننده‌های رشد و مواد شیمیایی دیگر
	اکولوژیکی	انتخاب محل مناسب برای کشت
		اصلاح منظر و خرد اقلیم
		کنترل وضعیت تغذیه‌ای
		مدیریت خاک
		کنترل پوشش گیاه (علف هرز) و مالچها
فعال	پوشش‌ها و تابش	استفاده از مواد آلی بدون حمایت کننده‌ها
		پوشش با حمایت کننده‌ها
	آب	آبیاری بارانی در بالای گیاه
		آبیاری بارانی زیر گیاهان
		پودر کننده‌های آب
		آبیاری سطحی
		مه پاشی مصنوعی
	بخاری‌ها	سوخت جامد
		سوخت مایع
		پروپان
	ماشین‌های باد	ماشین‌های افقی تولید کننده باد
		ماشین‌های عمودی تولید کننده باد
		هلیکوپترها
	ترکیبی	پنکه‌ها و بخاری‌ها
		پنکه با آب

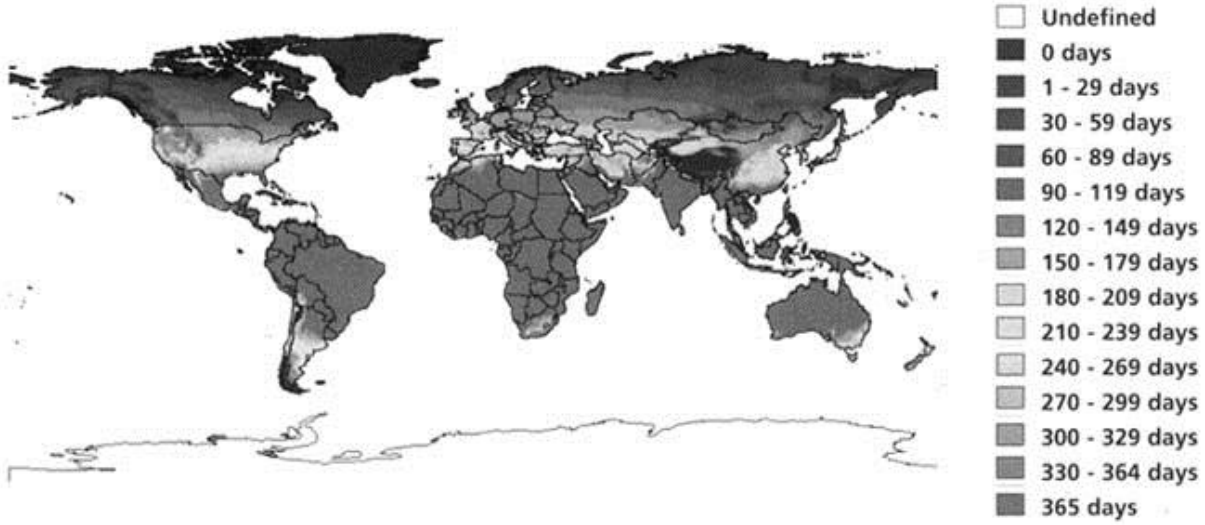
شدت خسارت ناشی از یخبندان تا حد زیادی به شرایط منطقه بستگی دارد. بنابراین ارائه ارزیابی جغرافیایی از مقدار خسارت ناشی از یخبندان مشکل است. متوسط طول دوره بدون یخبندان (آخرین زمان وقوع دمای زیر صفر درجه سلسیوس در بهار تا اولین زمان وقوع دمای زیر صفر درجه در پاییز) در موارد زیادی برای ارزیابی جغرافیایی پتانسیل یخبندان استفاده می‌شود. نقشه جهانی متوسط طول دوره بدون یخبندان (شکل ۱-۵) به وضوح نشان می‌دهد که با حرکت به سوی قطب‌ها خسارت یخبندان افزایش می‌یابد. تنها در عرض‌های جغرافیایی گرمسیری یعنی بین رأس‌السرطان و رأس‌الجدی که ناحیه نسبتاً بزرگی است (بین

۲۳/۵ درجه جنوبی و ۲۳/۵ شمالی) دماهای زیر صفر درجه کم بوده یا اصلاً وجود ندارد. با این حال در نواحی گرمسیری در ارتفاعات بالاتر نیز خسارت یخبندان رخ می‌دهد. خسارت در مواقعی که زمین در معرض وزش باد یا نزدیک منابع آب است به علت وجود اثر تعدیل کنندگی محیط دریایی، نوسانات دما و شبنم یا تشکیل یخبندان کمتر می‌شود. اگر چه نقشه متوسط طول دوره بدون یخبندان راهنمای عمومی خوبی برای شناسایی مکان‌هایی که پتانسیل خسارتی بالایی دارند است ولی جزییات بیشتر در این نقشه‌ها قابل مشاهده نیست. علاوه بر این، احتمال وقوع دماهای خسارت زا تحت تأثیر شرایط محلی نیز وجود دارد که نمی‌توان بخوبی آن‌ها را روی نقشه نشان داد.

در حقیقت حتی اگر یخبندان به ندرت رخ دهد کشاورزان تا حدودی تلفات اقتصادی ناشی از خسارت یخبندان را تجربه می-کنند. اخیراً تلاش‌هایی در جهت تصحیح جغرافیایی خطر یخبندان در مقیاس منطقه‌ای صورت گرفته است. کالما و همکاران (۱۹۹۲) مرور گسترده‌ای از توزیع جغرافیایی خطر یخبندان را منتشر کردند. برای نمونه لوماس و همکاران (۱۹۸۹) اطلسی از نقشه‌های ریسک یخبندان برای فلسطین اشغالی تهیه کردند. آن‌ها از داده‌های ۲۵ ساله دما و اطلاعات توپوگرافی برای توسعه نقشه‌ها استفاده کردند که به وضوح رابطه دقیقی بین ارتفاع و ریسک دمای زیر صفر درجه را نشان می‌دهد. دیگران از دمای متحرک موجود یا اطلاعات خاک و توپوگرافی بدون استفاده از داده‌های دمایی نقشه‌های ریسک را به دست آوردند. مطالعات موردی دیگری نیز به منظور توسعه نقشه‌ای از ریسک یخبندان که از طریق استفاده از مدل ارتفاعی باشد به وسیله کالما و همکاران (۱۹۹۲) با تکیه بر کارهای انجام شده به وسیله لاوقلین و کالما (۱۹۸۷و۱۹۹۰) و زینونی و همکاران (۲۰۰۲b) توسعه داده شد. تا موقعی که اطلاعات مکانی بهتر و بیشتر از ریسک خسارت یخبندان مورد نیاز است وجود نداشته باشد هیچ جایگزینی برای اطلاعات مکانی خوب و پایش آن وجود ندارد. بیشتر کشاورزان تصوّر و آگاهی خوبی درباره مکان‌های سرد منطقه خودشان دارند. قطعاً ارزش دارد که قبل از کشت گیاهان حساس در مکان‌های خاص مطالعاتی صورت گیرد. معمولاً باید از کشت گیاهان در نقاط پست که هوای سرد در آن جمع می‌شود اجتناب گردد. همچنین باید از مناطقی که موانع توپوگرافی اصلاح شده یا تهویه طبیعی هوای سرد ندارند اجتناب کرد زیرا موجب تشکیل مه زمینی در نقاط پست می‌شود و نیز از انتخاب مکان‌هایی که تشکیل مه زمینی در آن زود انجام می‌شود، اجتناب نمود. در نتیجه قبل از کشت گیاهان حساس به یخبندان در مناطق دارای ریسک بالا باید نقشه‌های پستی و بلندی محلی را بررسی نمود. برای نمونه چون شکوفه‌دهی دیر صورت می‌گیرد به ندرت نیاز به حفاظت از یخبندان باغ‌های گردو در کالیفرنیاست ولی مؤلفان ذکر کرده‌اند که عموماً باغ‌های کمی در نقاط سرد در خطر یخبندان هستند. این امر را می‌توان با استفاده از داده‌های دراز مدت و نقشه‌های توپوگرافی به دست آورد. انتخاب محل مناسب بعداً در بخش حفاظت‌های غیرفعّال بحث خواهد شد.

۱-۷- اهمیت اقتصادی خسارت یخبندان

در ایالات متحده خسارت اقتصادی ناشی از یخبندان نسبت به پدیده‌های زیانبخش دیگر بیشتر است. در ایالت فلوریدا صنعت مرکبات چندین مورد خسارت تخریبی را متحمل شده است که در نهایت باعث خسارت بسیار زیادی در میوه‌ها و درختان آن شده است (کوپر، یونگ و تورل، ۱۹۶۴؛ مارتسولف و همکاران، ۱۹۸۴؛ آتاوی، ۱۹۹۷). در کالیفرنیا در دسامبر سال ۱۹۹۰ یخبندان باعث خسارت ۵۰۰ میلیون دلاری به میوه‌ها و خسارت به حدود ۴۵۰۰۰۰ هکتار درخت گردید (آتاوی، ۱۹۹۷). در یخبندان سال ۱۹۹۸ نیز حدود۷۰۰ میلیون دلار خسارت گزارش شده است (تیفنباکر، هاگلمن و سکورا، ۲۰۰۰). همچنین به دلیل یخبندان در نقاط مختلف جهان نیز خسارت اقتصادی زیادی به گیاهان باغی مشاهده شده است. برای مثال، هویت (۱۹۸۳) اثرات یخبندان در تولید قهوه در برزیل دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ را مورد بررسی قرار داد. سرمای زمستانه نیز مشکل اصلی در تولید غلات است (استبلسکی، ۱۹۸۳؛ کاپریو و اشنایدر، b,a ۱۹۸۴؛ کوک، لارسن و برن، ۱۹۸۶).



شکل ۱-۵- توزیع جغرافیایی جهانی متوسط طول دوره بدون یخبندان.

اگر چه خسارت ناشی از یخبندان و سرمازدگی برای کشاورزان زیاد است ولی تبعات زیادی نیز بر ساکنین منطقه‌ای و محلی خواهد داشت. برای نمونه اگر میوه‌ای برای برداشت وجود نداشته باشد کارگران بیکار شده و تولید کنندگان میوه نیز متحمل خسارت شده و به این ترتیب شغل آنان نیز از دست خواهد رفت و به واسطه این بیکاری‌ها، درآمد کمتری به گردش در آمده و اقتصاد منطقه‌ای دچار اختلال می‌گردد. بنابراین تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای برای کاهش خسارت مورد نیاز خواهد بود. هزینه بهره-وری حفاظت از یخبندان بستگی به فراوانی وقوع یخبندان‌ها، هزینه روش مبارزه با یخبندان و ارزش محصول دارد. عموماً روش

حفاظت غیرفعّال به آسانی توجیه می‌شود. هزینه روش‌های حفاظت فعّال بستگی به ارزش محصول و هزینه روش دارد. در این کتاب در مورد هر دو روش فعّال و غیر فعّال بحث و به همان اندازه درباره هزینه‌های اقتصادی نیز مطالبی ارائه خواهد شد.

۱-۸- تاریخچه حفاظت از یخبندان

خسارت ناشی از یخبندان از زمان کشت و کار گیاهان توسط انسان وجود داشته است. حتی اگر تمام جنبه‌های حفاظت از یخبندان مدیریت گردد، وقوع یک شب با دماهای یخبندانی می‌تواند منجر به تخریب کامل محصول گردد. به استثنای عرض‌های جغرافیایی گرمسیری که در آن‌ها دما به ندرت به زیر نقطه انجماد افت می‌کند، خسارت ناشی از یخبندان در سایر نقاط جهان مشکلی همه‌گیر و جهانی است. معمولاً در اقلیم‌های جنب حاره‌ای با حرکت آرام توده‌های هوای سرد ممکن است ۲ تا ۴ شب به مدت ۸ تا ۱۰ ساعت دما در زیر نقطه انجماد باقی بماند (باگدوناس، جرج و گربر، ۱۹۷۸). در مناطق شرقی قاره‌ای رخداد خسارت-بار عموماً از نوع فرارفتی با مشخصه وارونگی ضعیف است. در اقلیم دریایی و غربی قاره‌ای، رخداد یخبندان با شرایط آرام و وارونگی‌های شدید همراه است. رخدادهای خسارت‌بار یخبندان در ابتدا با فرارفت هوای سرد و در ادامه چندین شب با یخبندان تابشی ادامه پیدا می‌کند. در اقلیم‌های معتدله دوره‌های یخبندان تداوم کوتاهی داشته و با تکرار بیشتری نسبت به سایر اقلیم‌ها رخ می‌دهند (باگدوناس، جرج و گربر، ۱۹۷۸). خسارت ناشی از یخبندان برای درختان میوه برگ‌ریز در پاییز و برای خشکبار عموماً در بهار و در بعضی مواقع در پاییز نیز رخ می‌دهند. برای درختان میوه نیمه گرمسیری خسارت به محصولات، بیشتر در طی فصل زمستان روی می‌دهد. در اقلیم‌های حاره‌ای به جز در ارتفاعات، هیچ یخبندانی وجود ندارد. بنابراین وقتی محصولات حاره‌ای از سرما خسارت می‌بینند دما عموماً بالای صفر درجه است. وقتی خسارت در دمای بالای صفر درجه رخ می‌دهد عموماً در این حالت به جای یخبندان، از واژه سرمازدگی استفاده می‌کنند.

در اقلیم‌های معتدله خسارت به محصولات می‌تواند در قبل از پنجه‌زنی در یخبندان‌های شدید و حتی در گلدهی در یخبندان-های ملایم رخ دهد. برای کشاورزان اقدام اساسی، کشت گیاهان یا ارقامی است که استعداد کمتری به خسارت دارند (کشت گندم بهاره نسبت به کشت گندم پاییزه ارجح است) یا عدم کشت گیاهان حساس در مناطقی است که خسارت ناشی از یخبندان به فراوانی رخ می‌دهد. در هر حالتی باید تاریخ کشت با محصول، رقم و خُرد اقلیم منطقه تنظیم شود. مثال خوب برای این موضوع انتقال و حرکت صنایع مرکبات به جنوب فلوریدا در واکنش به یخبندان‌های شدید در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ بوده است (آتاوی ، ۱۹۹۷). در عین حال به علت وجود دماهای مساعدتر صنعت زیتون به طرف شمال ایتالیا کشیده می‌شود که دارای شرایط اقلیمی و خاک مناسب برای تولید با کیفیت روغن زیتون هستند. همچنین این امر ناشی از افزایش خسارت حاصل از یخبندان به زیتون در سال‌های ۱۹۵۸، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۶ نیز بوده است (روتوندی و ماگلی، ۱۹۹۸). همان طور که گفته شد زمان وقوع آخرین سرمای

دیررس بهاره و اولین سرمای زودرس پاییزه هستند که تعیین کننده کشت یک گیاه مشخص در یک منطقه خواهند بود. برای نمونه بیشتر درختان خشکبار و درختان میوه خزان کننده تمایل به کشت در اقلیم‌های مدیترانه‌ای دارند زیرا احتمال خسارت ناشی از یخبندان به این گیاهان نسبت به اقلیم‌های قاره‌ای کمتر است. آگاهی درباره حفاظت از یخبندان و مقابله با وقوع خسارت متناوب در اقلیم‌های نسبتاً مستعد مورد بررسی قرار گرفته است. اگر خسارت ناشی از یخبندان به طور منظم اتفاق بیافتد بهترین راهکار، کشت محصول در جای دیگر و در منطقه مناسب‌تر می‌باشد. در برخی موارد تغییر مناطق کشت در واکنش به تغییر اقلیم است. برای نمونه آتاوی (۱۹۹۷) بیان نموده که قبل از ۱۸۳۵ درختان مرکبات عموماً در جنوب کارولینا، جورجیا و شمال فلوریدا کشت می‌شده است که به علت تلفات ناشی از یخبندان، مردم به دلایل اقتصادی به تولید مرکبات در این مناطق نمی‌پردازند. وی چندین نمونه از باغ‌های نیمه گرمسیری را که تا حدود سال ۱۸۳۵ وجود داشته‌اند و خسارت شدید یخبندان در آن‌ها روی داده بود را، ذکر کرده است. در واقع شواهد نشان می‌دهند که میوه‌های کشت شده در مناطق جنب حاره‌ای در جنوب غرب آمریکا برای رقابت با تولید کنندگان میوه‌های تولید شده در کشورهای مدیترانه‌ای اروپا کشت می‌شده است. با اقلیم کنونی، تولید میوه‌های نیمه گرمسیری در این مناطق امکان‌پذیر نیست. آتاوی (۱۹۹۷) بیان کرده مشاهداتش بیشتر بر اساس تجربه تولید کنندگان بوده تا داده‌ها و اطلاعات اقلیمی ؛ اما خسارت یخبندان در طی ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ میلادی برای میوه‌های نیمه گرمسیری که هیچ یک امروزه از لحاظ اقتصادی مفید نیستند کمتر رخ داده است. با توجه به اطلاعات موجود، تاریخ نشان داده که خسارت یخبندان در اقلیم مدیترانه‌ای کالیفرنیا تناوبی است. خسارت‌های اصلی از زمانی به زمان دیگر متفاوت بوده‌اند ولی تنوع محصولات و زمان یخبندان‌ها اثر کمتری بر کالیفرنیا داشته است. اخیراً کالیفرنیا دو خسارت مخرب از یخبندان را تجربه کرده که بر صنعت مرکبات تأثیر خسارت باری گذاشته است. یکی از این یخبندان‌ها در دسامبر ۱۹۹۰ و دیگری در دسامبر ۱۹۹۸ روی داده است. خسارت ناشی از یخبندان ۱۹۹۰ نسبت به یخبندان‌هایی که در سال‌های ۱۹۱۳ و ۱۹۳۷ روی داده بود تأثیر بیشتری بر مرکبات گذاشت (آتاوی، ۱۹۹۷). به شکل باور نکردنی بعضی مناطق خسارت کمتری دیدند در حالی که بقیه مناطق خسارت سنگینی دیده بودند.

آتاوی (۱۹۹۷) بیان کرده است با اینکه خسارت به میوه‌ها قابل ملاحظه بوده ولی بیشتر درختان در شرایط نسبتاً بهتری بوده و دماهایی که درختان فلوریدا را از بین برده است را تحمل کرده‌اند. یخبندان دسامبر سال ۲۰۰۰ نمونه خوبی از این سخن بوده که می‌توان جهت جلوگیری از خسارت یخبندان از آن استفاده کرد. در فلوریدا قبل از عبور یک جبهه سرد و سقوط دما به زیر نقطه صفر درجه یک هوای نسبتاً گرم قبل از یخبندان شدید به وجود می‌آید. در نتیجه خسارت درختان نسبت به دو یخبندان کالیفرنیا کمتر بوده است. به طور قابل ملاحظه‌ای، آتاوی (۱۹۹۷) به طبیعت متناقض خسارت یخبندان که در ادامه یخبندان دیگر به وجود می‌آید تاکید کرده است. برای مثال در یک منطقه نسبتاً کوچک تلفات ناشی از یخبندان به مرکبات را ۷۰ تا ۸۰ درصد در دره

اوجای، ۶۰ تا ۷۰ درصد در سانتا پائولو کانیون و تنها ۲۰ درصد در دره سانتا کارلا که نسبتا به هم نزدیک هستند برآورد کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که طبیعت خاص منطقه به ویژه در مناطق کوهستانی و تپه‌ای مثل شهرستان ونتورا در کالیفرنیا نیز بر خسارت یخبندان تأثیر دارد. اگر چه یخبندان سال ۱۹۹۸ برای صنایع مرکبات کالیفرنیا به اندازه یخبندان ۱۹۹۰ نبوده ولی یکی از یخبندان‌های اصلی قرن بیستم به شمار می‌آید. اگر چه در این یخبندان خسارت اقتصادی بالا بوده ولی به اندازه یخبندان سال ۱۹۹۰ نبوده است به طوری که بیشتر تولید کنندگان قادر به جبران خسارت وارده بوده‌اند (تیفن باخر، هاگلمن، سکورا، ۲۰۰۰). از یک نگاه دیگر مؤلفان فوق (۲۰۰۰) ذکر کرده‌اند که رابطه نسبتاً آشکاری بین عرض جغرافیایی و خسارت یخبندان و عرض جغرافیایی و نتیجه اولیه یخبندان وجود دارد. آن‌ها پی بردند که بیشتر باغ‌های شمالی خسارت یخبندان را بیشتر تحمل کرده‌اند ولی به طور قابل ملاحظه‌ای زودتر از اولین یخبندان برداشت شده بودند که به آن‌ها این امکان را داده از یخبندان خسارت کمتری ببینند. آن‌ها رابطه‌ای بین طول جغرافیایی، سن و اندازه باغ‌ها که با ارتفاع نیز رابطه داشت پیدا نمودند. در دره سان جان کاوین باغ‌های با عمر زیادتر در طرف شرقی ارتفاعات قرار داشتند در حالی که باغ‌های با عمر کمتر در ارتفاعات پایین دره در طرف غربی قرار داشتند. این محققان توصیه کردند که باید مدل‌های میکرو اقلیمی با داده‌های مدل ارتفاعی رقومی و اطلاعات جزئی‌تر خسارت یخبندان ترکیب شوند تا بتوانند کمک شایانی در ترسیم و طراحی الگوهای مکانی خطر خسارت یخبندان نماید. تیفن باخر و همکاران (۲۰۰۰) مشاهده کرده‌اند که تولید کنندگان بزرگ تلفات بیشتری را در محصول داشته‌اند در حالی که تولید کنندگان کوچک‌تر و اعضای تعاونی تلفات کمتری داشته‌اند. این موضوع به این واقعیت بر می‌گردد که بین شرکت‌های تعاونی ارتباط وجود داشته است به طوری که بیشتر تولید کنندگان کوچک قبل از وقوع یخبندان محصولات خود را برداشت کرده بودند. بعد از یخبندان ۱۹۹۰ بیشتر کشاورزان شروع به درخواست بیمه محصولات کشاورزی کردند و آن‌هایی که این بیمه را دریافت کرده بودند مقداری از خسارت ناشی از یخبندان را جبران نمودند. زیرا بیشتر باغ‌های آن‌ها در معرض خسارت بوده‌اند و یا به جهت بیمه محصولاتشان تلاش کمتری برای استفاده از روش‌های حفاظت داشته‌اند که مشخص نیست. علاوه بر این،، تیفن باخن و همکاران (۲۰۰۰) ذکر کرده‌اند که کمک دولت در این وقایع ممکن است بر فعالیت‌های مبارزه با یخبندان توسط کشاورزان مؤثر باشد. در هر دو سال ۱۹۹۰ و ۱۹۹۸ دولت برای کمک به کشاورزان به جهت جبران خسارت‌ها اقدام به کمک می‌کرد. هر چند این کمک‌ها برای کشاورزان مفید است ولی ممکن است باعث دلسرد کردن آن‌ها به استفاده از روش‌های حفاظت از یخبندان و موجب توسعه این صنایع به مناطقی که ریسک خسارت یخبندان بالاتر است، نیز گردد (تیفن باخن و همکاران، ۲۰۰۰). مدت زمان استفاده از بخاری‌ها در حفاظت گیاهان از یخبندان به بیش از ۲۰۰۰ سال می‌رسد (پاول و هیمرلیک، ۲۰۰۰). در آغاز اکثر بخاری-ها از نوع باز بوده‌اند هر چند در این اواخر المنت‌های فلزی نیز برای بهتر باقی ماندن حرارت برای تابش و همرفت محصول نیز

استفاده شده است. پاول و هیمرلیک (۲۰۰۰) گزارش کرده‌اند که حدود ۷۵ درصد انرژی خارج شده از بخاری‌ها به طور مستقیم برای گرم کردن هوا استفاده می‌شود که بعداً با همرفت شدن بر روی محصول به طور مستقیم و غیر مستقیم با استفاده از اختلاط لایه وارونگی به گرم شدن بیشتر هوا کمک می‌کنند. آن‌ها نشان دادند که ۲۵ درصد باقیمانده انرژی، به صورت انتقال از بخاری‌ها به گیاهان به صورت تابش مستقیم صورت می‌گیرد که حتی در طی یخبندان‌های فرارفتی نیز مؤثر است. اولین المنت‌های فلزی معروف بخاری‌ها برای مبارزه با یخبندان به وسیله دبلیو سی چو در ۱۹۰۷ در گراند جاکشن کلرادو امریکا ارائه شد. وی یک وسیله روغن سوز برای گرم کردن ابداع کرد که مؤثرتر از آتش روباز بود که بعداً به بخاری‌های باغی معروف شد که به وسیله کارخانه چو ساخته می‌شد و امروزه در بخاری‌های قابل حمل نیز استفاده می‌شود. حتی قبل از بخاری‌های باغی نیز کشاورزان از حامل‌های فلزی ساده‌تر استفاده می‌کردند که با روغن سنگین و لاستیک‌ها و خاک اره می‌سوختند. این آتش‌ها دودهای روغنی زیادی تولید می‌کردند که برای مدت طولانی باقی می‌ماند و با استفاده از بلوکه کردن تابش‌های انعکاسی از سطح زمین، حفاظت از یخبندان را بیشتر می‌کرد. در حالی که امروزه معلوم شده که با اضافه کردن ذرات بخار و دود به بخاری‌های باغی حفاظت کمتری از باغ صورت می‌گیرد (می و بارتولیک، ۱۹۷۹). استفاده از بخاری‌های باغی در بعضی از مناطق جهان روش استانداردی است ولی باعث آلودگی نیز می‌شود که امروزه به دلیل ایجاد مشکلات زیست محیطی و بهداشتی متعدد در امریکا و همچنین انتقاد عمومی، استفاده از این روش محدود شده است.

در ایالات متحده کشاورزان طی چندین سال تلاش‌های زیادی برای کشف روشی که دارای آلودگی کمتری از نظر زیست محیطی باشد، انجام داده‌اند. اخیراً بخاری‌های برگشتی که بخار و دود را در مسیری جریان می‌دهد بیشتر توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرند (لئونارد، ۱۹۵۱). امروزه در بسیاری از مناطق، استفاده از بخاری‌های برگشتی و بخاری‌های پاک سوز با سوخت پروپان مرسوم شده است، ولی با این حال قوانین محلی نیز باید مد نظر قرار گیرند. به هر حال آگاهی از افزایش قیمت سوخت و بحث آلودگی در طی اواسط دهه ۱۹۹۰ منجر به استفاده کمتر از بخاری‌های مذکور شده است. در طی دهه ۱۹۵۰ استفاده از ماشین‌های مولّد باد، جایگزین بخاری‌ها به عنوان روش پیشنهادی برای حفاظت از یخبندان مطرح شد. اگر چه هزینه خرید این ماشین‌ها گران‌تر بود ولی هزینه‌های عملیاتی و نیروی کار کمتری نیاز داشتند. در دهه ۱۹۷۰ استفاده از بخاری‌ها به منظور مبارزه با یخبندان در کالیفرنیا چندان معمول نبود. سوخت‌های کوچک‌تر و بخاری‌هایی با سوخت جامد هنوز در بخش‌های کوچکی از جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. به هر حال می‌توان از همه روش‌ها استفاده کرد ولی استفاده از بخاری‌های نیازمند سوخت، نهایتاً متوقف خواهد شد.