پژوهش های کاربردی در خشک میوه ها
Journal of Applied Researches in

Frost and the role of ice nucleating bacteria in frost damage in the pistachio orchards of Rafsanjan.

Mahdieh Rostami*

Assistant Professor, Department of Plant Pathology, Rafsanjan Branch, Islamic Azad University, Rafsanjan, Iran

***Corresponding author:** M.Rostami_1355@yahoo.com

Receive: 2024/6/16 Accepted: 2024/7/31

Abstract

Pistachio is a strategic product with a special position among agricultural products. In recent years, climate change poses a threat to the pistachio market. These changes, including frost and adverse weather phenomena, have affected the quality and quantity of the pistachio product in different ways. Despite the development of different methods of protection against cold, frost damage to plants is a widespread serious economic problem for agricultural and horticultural producers. For this reason, many researches and studies have been done in this field. This paper reviews the results of frosting, the role of ice nucleating bacteria in Pistachio frost damage and frost management research that have been reported over the past 10 years. Ice-nucleating bacteria are the chief initiators of frost damage to many economically important crop plants. This paper also reviews the results of research including isolation and identification of epiphytic Ice Nucleation active bacteria, evaluation of Ice Nucleation Activity (INA) and INA gene detection in the bacteria Isolated from Pistachio Trees in Kerman Province, comparison of ice nucleation frequency and the possibility of biological control of them. Lastly, this review also explores the role of these bacteria in plant frost damage and the strategies and limitations of avoiding plant frost damage by managing these bacterial populations by bactericides, antagonistic bacteria, or cultural control strategies.

Key words: pistachio, frost, Ice nucleation bacteria, Rafsanjan.

پژوهش های کاربردی در خشک میوه ها
Journal of Applied Researches in
واحد رفسنجان

سرمازدگی و نقش باکتری‌های هسته ی یخ در افزایش خسارت آن در باغات پسته رفسنجان

مهدیه رستمی*

استادیار گروه گیاه‌پزشکی، واحد رفسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، رفسنجان، ایران

* نویسنده مسئول: M.Rostami_1355@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۰

چکیده

پسته به‌عنوان یک محصول استراتژیک، جایگاه خاصی در بین تولیدات کشاورزی ایران دارد. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، بزرگترین خطری است که بازار پسته را تهدید می‌کند. این تغییرات از جمله سرمازدگی و پدیده‌های ناگوار جوی به شکل‌های مختلف کیفیت و کمیت محصول پسته را تحت تاثیر قرار داده است. علیرغم توسعه‌ی روش‌های مختلف حفاظت در برابر سرما، خسارت‌های سرمازدگی وارد به گیاهان همچنان به‌عنوان یک مشکل عمده‌ی اقتصادی برای تولیدکنندگان کشاورزی و باغی مطرح است. به همین دلیل پژوهش‌ها و مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. این مقاله، مروری است بر بخشی از پژوهش‌های ده سال گذشته که در زمینه سرمازدگی، نقش باکتری‌های هسته یخ در سرمازدگی پسته و مدیریت جمعیت این باکتری‌ها انجام شده است. باکتری‌های هسته‌ی یخ، آغازگر اصلی آسیب سرمازدگی به بسیاری از گیاهان زراعی مهم اقتصادی هستند. این مقاله همچنین مروری است برتحقیقات انجام شده شامل جداسازی و شناسایی باکتری‌های هسته‌ی یخ ساکن سطح درختان پسته در استان کرمان، ردیابی ژن هسته‌زای یخ، مقایسه فرکانس هسته‌ی یخ بین آن‌ها و همچنین امکان کنترل بیولوژیک آن‌ها. در نهایت این مقاله نقش این باکتری ها را در خسارت سرمازدگی گیاهان و راهبردها و محدودیت‌های جلوگیری از آسیب سرمازدگی گیاهی با مدیریت این جمعیت‌های باکتریایی توسط باکتری‌کش‌ها، باکتری‌های آنتاگونیست، یا راهبردهای کنترل زراعی را بررسی می‌کند.

واژگان کلیدی: باکتری هسته یخ، پسته، رفسنجان، سرمازدگی

مقدمه

در قلمرو زیست‌شناسی گیاهی، عوامل محیطی مختلف، تأثیر زیادی بر رشد و نمو گیاهان دارند. تغییرات آب و هوایی معاصر، جمعیت گیاهان را در معرض تنش‌های جدیدی از دما، خشکی، دی‌اکسیدکربن و سایر شرایط غیرزیستی و زیستی قرار می‌دهد. این تغییرات به‌سرعت پویایی تکاملی گیاهان را مختل می‌کند. تنش‌ها هر کدام به‌تنهایی می‌توانند بر فیزیولوژی گیاه در کل چرخه‌ی زندگی آن تاثیرگذار باشند. به‌عنوان مثال تغییرات دما یا رطوبت و حتی طول روز یا تغییرات الگوی بارش در یک اقلیم خاص بر فیزیولوژی جوانه زنی، گلدهی، گرده افشانی، فنولوژی میوه دهی و حتی پیری برگی و خزان گیاه تاثیرات پیچیده‌ای می‌گذارد. از سوی دیگر تغییرات جوی تعاملات زیستی بین گیاهان و موجودات زنده دیگر از قبیل گرده افشان‌ها، آنتاگونیست‌ها، میکرواورگانیسم های هم‌زیست آنها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا مطالعه و بررسی هر کدام از این عوامل و پیامدهای اکولوژیکی آن می‌تواند ما را به درک بهتری از تغییرات روند تکاملی گیاهان، رشد محصولات کشاورزی و پر کردن شکاف‌های اطلاعاتی در این زمینه برساند.

آثـار سـوء پدیـده‌هـای مخـرب جـوی، از جملـه سرمازدگی و نوسانات دمایی بزرگترین خطری است که بازارمحصولات کشاورزی، به‌ویژه، پسته را تهدید مـی‌کنـد. پسته، به‌عنوان یک محصول کشاورزی با ارزش و یکی از منابع درآمدهای ارزی غیرنفتی کشور به‌شمار می‌آید. سرمازدگی شدید بهاره، پدیده پرخطری برای فعالیت‌های کشاورزی، از جمله تولید پسته است. طبق آمار به‌دست آمده از اداره حفظ نباتات استان کرمان، سرمازدگی، هر سال بین ۱۵ تا ۱۰۰ درصد خسارت در اغلب باغات پسته مناطق مختلف استان کرمان، ازجمله رفسنجان وارد می‌کند. سرمازدگی معمولا زمانی رخ می‌دهد که دما به زیر نقطه انجماد برسد و اغلب اثرات مخربی بر سلامت گیاهان دارد. در سال‌های اخیر با گرمایش روز افزون زمین، گیاهان در معرض آسیب بیشتری نسبت به سرمازدگی هستند. به دلیل اینکه با گرمایش زمین، گیاهان در فصل زمستان سرمای معتدلی را تجربه می‌کنند و مکانیسم‌های پاسخ به استرس سرما کمتر فعال می‌شوند. لذا گیاه در مقابل سرمای دیررس بهاره و زودرس پاییزه، که هر دو ناشی از تغییرات اقلیمی زمین است، حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. پاسخ‌های مولکولی و متابولیکی که در زمستان‌های سرد، باعث مقاومت سلول به سرما می‌شوند، بسیار پیچیده هستند. این فرایندها شامل تغییرات در ترکیب دیواره سلولی، نگهداری هموستاز سلولی، تغییر در ترکیبات غشای سلولی با محتوای لیپید غیراشباع بالاتر، سنتز پروتئین‌های شوک سرما، آنزیم‌های فعال و سنتز متابولیت‌های اولیه و ثانویه می‌باشد. این مقاله‌ی مروری، پس از مرور فیزیولوژی سرمازدگی در سلول گیاهی، به نقش باکتری‌های هسته‌ساز یخ در افزایش خسارت سرمازدگی می پردازد.

فیزیوبولوژی سرمازدگی در درختان پسته

سرمای وارده و تغییرات جوی ایجاد شده در چند سال اخیر نشان داده است که محصول پسته نیز یکی از محصولات حساس به سرمای بهاره بوده و بنا به تغییرات جوی احتمال سرمازدگی شدید دور از انتظار نخواهد بود. بنابراین نظر به اهمیت محصول پسته در کشور از لحاظ اقتصادی و ارز آوری آن، لزوم اعمال روش‌هایی جهت جلوگیری از سرمای بهاره ضروری می باشد. به‌طورکلی در نقاط مختلف دنیا از این روش‌ها به‌منظور پیشگیری از سرمازدگی استفاده می‌کنند. استفاده از ماشین‌های مولد مه، سیستم چاهک معکوس، استفاده از کودهای پتاسیمی، استفاده از ترکیبات با میزان بالای آمینواسید آزاد (به‌ویژه پرولین)، کنترل باکتری‌های تشکیل دهنده هسته یخ، عدم انجام هرس زودهنگام، عدم انجام عملیات خاکورزی، عملیات آبیاری در خاک‌های خشک قبل از یخبندان و حذف علف‌های هرز، از راهکارهایی است که برای کاهش خسارت سرمازدگی به کشاورزان توصیه می‌شود.

مطالعه ی علمی و هدفمند تنش‌های طبیعی و اطلاع از میزان حساسیت یا دمای بحرانی خسارت، در ارقام مختلف یک گونه‌ی گیاهی، به انتخاب انواع مناسب برای کاشت در یک منطقه کمک می‌کند. دمای بحرانی خسارت به پسته، نقطه‌ای است که به جوانه‌ها خسارت وارد می‌گردد. این دما به نوع درخت، مرحله‌ی رشد و نمو و شرایط آب و هوایی بستگی دارد. اکثر باغداران معمولا دمایی را بحرانی می‌دانند که طی آن ۱۰٪ جوانه‌ها از بین می‌رود. افت دما در مراحل مختلف، آسیب‌های مختلفی به جوانه‌ها و گل‌های در حال باز شدن وارد می کند (Sorkhan et al., 2011). دمای بحرانی آسیب‌زا در سه مرحله گل، جوانه‌ی در حال باز شدن وجوانه رکود پسته، به ترتیب ۲+۲ - و۴ - درجه سانتیگراد است (به شرط آنکه درخت به مدت دو ساعت در این دما قرار بگیرد). معمولا در دماهای بحرانی اندام‌های زایشی در گل‌های در حال بازشدن دچار اختلال می‌شوند. این آسیب می تواند کلاله‌ها را در جذب دانه‌های گرده و یا رشد لوله گرده دچار مشکل کند. هر چند اگر مدت زمان افت دما به طول انجامد آسیب‌های عمیق‌تری وارد خواهد شد و یا به نکروز اندام‌های زایشی منجر شود. این آسیب ها در ارقام مختلف پسته، با دمای بحرانی یکسان نیز، با هم متفاوت است. به‌عنوان مثال، دو رقم پسته قزوینی و اوحدی از نظر حد بحرانی دما اختلاف معنی داری نشان نداده‌اند. اما با این‌حال تفاوت در زمان مراحل باز شدن جوانه و گل

حتی برای یکی، دو روز مهم و حیاتی است. علاوه بر سرمای دیررس بهاره، سرمای پاییزه و زمستانه در اقلیم‌های سرد می‌تواند به‌آوندهای چوب، ریشه و پوست درخت آسیب غیرقابل برگشت وارد نماید (Gholipour, 2005). در مقایسه ی مقاومت برخی ارقام تجاری دامغان به سرمای بهاره، نتایج نشان داده که حساس‌ترین مرحله به سرمای بهاره مرحله گل کامل بوده و بیش‌ترین خسارت سرما در دمای ۶- درجه سانتی گراد وارد شد و هم چنین، رقم عباسعلی مقاوم‌ترین و رقم شاه پسند حساس‌ترین رقم به سرمای پاییزه بود و رقم خنجری نیمه مقاوم مشخص شد (Afshri et al., 2009). در مطالعه سرخان و همکاران، پنج پایه مقاوم و پنج پایه مستعد به سرمازدگی انتخاب و از نظر فیزیولوژیکی مورد ارزیابی قرار گرفتند تا پارامتر فیزیولوژیکی موثر بر مقاومت مشخص شود. لذا در شرایط آزمایشگاهی پرولین، قندهای محلول، پروتئین‌ها، عناصر غذایی شامل پتاسیم، منیزیم، کلسیم، فسفر، آهن، روی، مس، منگنز اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد که در بین پایه‌های مقاوم و حساس از نظر محتوای قندهای محلول و پرولین تفاوت معنی داری مشاهده نشد. اما پایه‌های مقاوم دارای بیشترین میزان پروتئین، پتاسیم و منیزیم در مقایسه با پایه‌های حساس بود. بر اساس این تحقیق در فیزیولوژی سرمازدگی پسته، غلظت پروتئین محلول، پتاسیم و منیزیم در مقاومت به سرمازدگی در پسته نقش داشته است (Sorkhan et al., 2011) .

سازگاری گیاهان با سرما

گیاهان در آغاز فصل رشد و جوانه‌زنی، در حساس‌ترین مرحله به سرما هستند. به‌دلیل اینکه تمام مواد انباشته شده و انرژی گیاه جهت مقابله با سرما، در راستای رشد رویشی و زایشی سال جدید صرف می‌شود و در این هنگام سرماهای خیلی خفیف هم، آسیب جدی به محصولات کشاورزی در گیاهان وارد می‌کند (Keenan et al., 2020).

بسیاری از گونه‌های گیاهی که شرایط آب و هوایی سرد رشد می‌کنند، می‌توانند با این شرایط آب و هوایی سازگار شوند. سازگاری با سرما در گیاهان در آب و هوای سرد، توانایی آنها را به تحمل دمای پایین و روزهای کوتاه افزایش می‌دهد. فرایند سازگاری با سرما یا تحمل دمای پایین، با تغییرات فیزیولوژیکی و مولکولی همراه است که در نهایت با بیان ژن‌ها به‌منظور تولید ترکیبات دو لایه لیپیدی و تجمع اسمولیت ها در سلول تعریف می شود. اسمولیت‌ها مولکول‌های طبیعی و آلی کوچکی هستند که بر خواص مایعات بدن موجود زنده اثر می‌گذارند. این مولکول‌ها شامل گروه‌های شیمیایی مختلفی از جمله اسیدهای‌آمینه (بتائین، گلایسین، پرولین و...)، متیل‌آمین‌ها و پلی‌اُل (چندالکلی) می‌شوند. در واقع اسمولیت‌ها یا محلول‌های آلی سازگارکننده، به سلول در شرایط تنش جهت تنظیم و تعادل اسمزی سیتوپلاسم کمک می‌کنند (Serraj and Sinclair, 2002). جانداران، از تجمع بالای اسمولیت‌ها برای حفظ ساختارهای پروتئینی خود بهره می‌برند. از آنجایی که فرایندهای حیاتی سلول‌های بیشتر موجودات زنده در غلظت یک مولار (یا کمی پایین تر از آن) انجام می‌شود، افزایش غلظت سلولی در شرایط سرما، تحمل گیاه را به سرمازدگی بالا می برد. پاشش برگی گلایسین و بتائین روی گیاهان آرابیدوپسیس دمای انجماد را یک درجه سانتی گراد افزایش داده است. به‌طور مشابه، کاربرد خارجی گلایسین-بتائین، باعث افزایش تحمل گوجه‌فرنگی به دماهای پایین شده است. مطالعات نشان داده است که اسپری گلایسین-بتائین به میزان دو میلی‌مولار تحمل به سرما را در برگ‌های توت فرنگی بیش از دو برابر تا ۷۲ ساعت بعد از استعمال افزایش داد و به علاوه موجب بقا در یخ زدگی و رشد مجدد در تمام گیاهان شد . یافته های اخیر نیز نشان می‌دهد که مهندسی گیاهان برای افزایش بیان این ترکیب در گیاهانی نظیر آرابیدوپسیس، برنج و توتون سبب افزایش تحمل به تنش سرما و حفظ فعالیت فتوسنتزی در دماهای پایین شده است. در کل، با وجود نقش گلایسین-بتائین به‌عنوان تخفیف دهنده اثرات تنش، مکانیسم‌های حفاظتی آن بر علیه تنش سرما کمتر شناخته شده است (Esmaili et al., 2012).

منابع آسیب سرمازدگی

دمای کره زمین رو به افزایش است و این گرمایش، باعث گرم‌تر شدن دمای متوسط زمستان و همچنین سرماهای دیررس بهاره شده و در نهایت یک بی‌ثباتی در سازگاری گیاهان به سرما ایجاد کرده و مقاومتشان به سرما (حتی اگر سرما خفیف باشد) کمتر می شود. این گرمایش که به‌تدریج از سال‌های گذشته آغاز شده، در هر دهه یک روز جوانه‌زنی و بیدار شدن گیاهان و ورود به مرحله رشد آنها را به جلو می اندازد (Francis and Skific, 2015). از سوی دیگر افزایش میزان دی‌اکسیدکربن در جو زمین سبب کاهش مقاومت به سرمازدگی در گیاهان و آسیب‌پذیری بیشتر آنها می شود (Repo et al., 2021).

عوامل دیگری از جمله وضعیت جغرافیایی محل، میزان رطوبت، وزش باد، طول مدت زمان ماندگاری در دمای انجماد و بسیاری عوامل دیگر در میزان خسارت سرمازدگی دخالت دارند. از آنجا که هوای سرد از هوای گرم سنگین‌تر است و در دره‌ها مستقر می شود، شرایط یخبندان در این مناطق مستعدتر است. دره‌ها همچنین منطقه را از بادهای قوی‌تر محافظت می‌کنند و پتانسیل یخبندان را افزایش می‌دهند (Francis and Skific, 2015). از سوی دیگر رطوبت موجود در جو یک عامل مهم در تعدیل دمای هوا می‌باشد. مولکول‌های بخار آب، یک گاز گلخانه‌ای بسیار قوی است که در طیف بسیار وسیعی می‌تواند امواج برگشتی از زمین را جذب نماید. هر چه مقدار بخار آب موجود در جو بیشتر باشد، انرژی برگشتی بیشتری را جذب نموده و از کاهش دمای محیط جلوگیری می‌نماید. در مقابل هنگامی که رطوبت هوا کم باشد امواج تابشی برگشتی کمتر به مانع برخورد نموده و موجب کاهش سریع دمای محیط می‌گردند. هرچند که با توجه به درصد میزان رطوبت این تاثیر می تواند متغیر باشد. بر اساس دمای نقطه ی شبنم در روز قبل (I) احتمال سرمازدگی و دمای کمینه روز جاری (I+1) را پیش‌بینی کرد. بر این اساس اگر میزان رطوبت نسبی حدود ۴۵ تا ۵۵ درصد باشد، دمای نقطه‌ی شبنم روز I با دمای کمینه ی روز (I+1) برابر است. اما اگر رطوبت نسبی بیشتر یا کمتر از این باشد، دمای کمینه ی روز (I+1) به ترتیب کمتر یا بیشتر از دمای نقطه ی شبنم در روز I خواهد بود. به‌عنوان مثال اگر درصد رطوبت نسبی در روز جاری ۷۰ تا ۸۰ باشد و دمای نقطه‌ی شبنم در عصر این روز صفر یا منفی یک درجه‌ی سانتیگراد باشد. احتمال اینکه کمینه ی دما در روز بعد به کمتر از منفی یک درجه سانتیگراد برسد و احتمال سرمازدگی خواهد بود. معمولا شدت سرمازدگی در هنگام وقوع کمینه دما پیش از طلوع آفتاب به اوج خود می رسد (Nazemosadat et al., ۲۰۰۲).

انواع سرمازدگی

سرمازدگی تابشی (تشعشعی): یخبندان تابشی یک تنش غیر زیستی عمده و یکی از عوامل محدود کننده اصلی تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان است. سرمازدگی تابشی زمانی رخ می دهد که در طول روز با تابش خورشید، گیاهان و زمین گرم می‌شوند و در طول شب این انرژی را به‌صورت تابش امواج با طول موج بلند ازدست می‌دهند. بنابراین، هوای مجاور سطح زمین سرد شده و با افزایش ارتفاع از سطح زمین، دمای هوا افزایش می‌یابد. سطح خاک و گیاه در اثر تشعشع خالص منفی سردتر از هوا می‌گردد. هوا نیز در اثر برخورد با این سطح سردتر و در نتیجه با از دست دادن حرارت به سطوح سرد و متراکم تبدیل می‌شود و این هوای متراکم سرد در سطح زمین باقی مانده و در تحت شرایط پایدار ایجاد یخبندان تشعشعی می شود. حاصل این امر پدیده ای به نام وارونگی دما[1] است که دمای هوا با زیاد شدن ارتفاع افزایش می‌یابد و به سطحی می‌رسد که ارتفاع انورسیون یا سقف نامیده می‌شود. یخبندان تشعشعی در شرایط آسمان صاف و بدون ابر واقع می‌گردد، در چنین شرایطی امکان دارد که بعضی مواقع نسیم‌های ملایم، ضعیف و

[1] inversion

کم دوام وجود داشته باشد. این سرمازدگی در یک محدوده معین و محیط محدود بدون اینکه هوای سرد از سایر مناطق نفوذ نماید به وجود می‌آید معمولا در اواخر پاییز و اوایل بهار زمانی که گیاه فعال می‌باشد اتفاق می افتد. در حالتی که رطوبت هوا کم باشد میزان خسارت افزایش خواهد یافت. قابل ذکر است که در این نوع سرمازدگی چون انتقال دما از قسمت های مختلف بدن انسان به کندی صورت می‌گیرد لذا انسان سرما را کمتر احساس می‌نماید و موجب اشتباه کشاورزان در تشخیص احتمال این نوع سرمازدگی می‌شود. این نوع سرما زدگی همان سرمای بهاره ایست که همه ساله خسارت بالایی به باغداران مناطق مختلف وارد می‌نماید و البته در بسیاری کشورهای دارای کشاورزی پیشرفته کاملا کنترل شده است.

سرمازدگی انتقالی: در برخی مواقع عامل سرمازدگی تابع تابش برگشتی از زمین نبوده بلکه حرکت توده های سرد هوا از روی نقاط سطحی زمین نقش اصلی را در سرمازدگی ایفا می نماید. در این حالت گذر توده‌های سرد می‌تواند دمای هوا را در مناطق کشاورزی برای مدتی کاهش داده و بسته به شدت آن موجب سرمازدگی یا یخ زدگی گیاهان گردد. به این نوع کاهش دما اصطلاحاً سرمای انتقالی گفته می شود. درنوع سرمازدگی انتقالی در اثرعبور یک جبهه هوای سرد از روی یک منطقه بروزمی‌کند به طوریکه دمای آن کمتر یا درحد دمای بحرانی برای محصولات خاص منطقه می باشد. یکی از علائم مشخص سرما زدگی انتقالی وجود باد شدید سرد در منطقه است. شرایط وقوع یخبندان جبهه ای را می توان به وسیله باد شدید و آسمان ابری تشخیص داد آسمان ممکن است ابری یا نیمه ابری باشد. در واقع ابرها ممکن است چند ساعت بعد از رسیدن جبهه سرد به منطقه ظاهر شوند اگر آسمان ابری باشد ستاره ها خیلی قابل روئیت نیستند و ماه رنگ پریده به‌نظرمی رسد و امکان دارد هاله ای اطراف آن را گرفته باشد. بعد ازسرمازدگی جبهه ای می توان مشاهده نمود که خسارت آن منحصراً به برگ‌هایی که درمعرض آسمان هستند محدود نمی شود، بلکه حتی علف‌های هرز زیرسایه گیاهان نیز آسیب می بینند. در چنین شرایطی نباتات حرارت خود را به هوای سرد داده و به سرعت افت درجه‌ی حرارت پیدا می‌کند، به‌طوریکه حتی ممکن است حرارت های تشعشعی نیز در چنین حالتی کار ساز و مفید واقع نشود. معمولاً هوای سرد در محل‌های گودی و داخل دره‌ها بیشتر توسعه یافته و شدیداً خسارت می زند.

باکتری‌های هسته‌ی یخ

از آنجا که آب خالص در دمای ۳۸- تا ۴۰- درجه سانتی‌گراد یخ می‌زند، لذا دلیل یخ زدن آب در دماهای بالاتر از این دما، بستگی به حضور ذرات زنده یا غیرزنده‌ای دارد که تشکیل کریستال‌های یخ را در دماهای بالاتر آسان می‌کنند (Santl- et al., 2016 Temkiv. ذرات گرد و غبار و املاح معدنی موجود در هوا عمده‌ترین هسته‌های یخ موجود در جو هستند که در ابرها باعث بارش و تشکیل کریستال‌های یخ به صورت برف و تگرگ می‌شوند. علاوه بر این معمولا هوا و ابرها پر از باکتری‌هایی هستند که هسته‌های یخ بیولوژیک را ایجاد می‌کنند. باکتری‌های هسته یخ، با توانایی خود در القای تشکیل یخ در دماهای نزدیک به صفر درجه سلسیوس، با استفاده از پروتئین‌های هسته‌ساز یخ موجب سرمازدگی گیاهان می‌شوند. چنانچه هر گرم از بافت گیاهی توسط ۱۰۰۰ سلول باکتری هسته یخ کلونیزه شود، بافت گیاهی در دمای بالاتر از ۵- درجه سلسیوس در معرض یخ زدگی قرار خواهد گرفت. باکتری‌های هسته یخ در طبیعت به‌صورت اپی‌فیت وگروهی بیمارگر در سطح گیاهان مستقر هستند به همین دلیل گیاهان حساس به سرما در اثر کاهش مختصر دما به زیر صفر، دچار خسارت سرمازدگی می‌شوند (Gurian et al., 1993). در ایران نیز گونه‌های مختلف باکتری‌های فعال هسته‌یخ از میزبان‌های مختلف جداسازی شده است. گونه هایی از باکتری‌های هسته‌یخ از سطح درختان پسته در بیش از ۸۰ منطقه پسته‌کاری استان کرمان جداسازی و تعدادی از آنها بر اساس تعیین توالی بخشی از ناحیه ژن‌های16SRDNA،

کم دوام وجود داشته باشد. این سرمازدگی در یک محدوده معین و محیط محدود بدون اینکه هوای سرد از سایر مناطق نفوذ نماید به وجود می‌آید معمولا در اواخر پاییز و اوایل بهار زمانی که گیاه فعال می‌باشد اتفاق می افتد. در حالتی که رطوبت هوا کم باشد میزان خسارت افزایش خواهد یافت. قابل ذکر است که در این نوع سرمازدگی چون انتقال دما از قسمت های مختلف بدن انسان به کندی صورت می‌گیرد لذا انسان سرما را کمتر احساس می‌نماید و موجب اشتباه کشاورزان در تشخیص احتمال این نوع سرمازدگی می‌شود. این نوع سرما زدگی همان سرمای بهاره ایست که همه ساله خسارت بالایی به باغداران مناطق مختلف وارد می‌نماید و البته در بسیاری کشورهای دارای کشاورزی پیشرفته کاملا کنترل شده است.

سرمازدگی انتقالی: در برخی مواقع عامل سرمازدگی تابع تابش برگشتی از زمین نبوده بلکه حرکت توده های سرد هوا از روی نقاط سطحی زمین نقش اصلی را در سرمازدگی ایفا می نماید. در این حالت گذر توده‌های سرد می‌تواند دمای هوا را در مناطق کشاورزی برای مدتی کاهش داده و بسته به شدت آن موجب سرمازدگی یا یخ زدگی گیاهان گردد. به این نوع کاهش دما اصطلاحاً سرمای انتقالی گفته می شود. درنوع سرمازدگی انتقالی در اثرعبور یک جبهه هوای سرد از روی یک منطقه بروزمی‌کند به طوریکه دمای آن کمتر یا درحد دمای بحرانی برای محصولات خاص منطقه می باشد. یکی از علائم مشخص سرما زدگی انتقالی وجود باد شدید سرد در منطقه است. شرایط وقوع یخبندان جبهه ای را می توان به وسیله باد شدید و آسمان ابری تشخیص داد آسمان ممکن است ابری یا نیمه ابری باشد. در واقع ابرها ممکن است چند ساعت بعد از رسیدن جبهه سرد به منطقه ظاهر شوند اگر آسمان ابری باشد ستاره ها خیلی قابل روئیت نیستند و ماه رنگ پریده به‌نظرمی رسد و امکان دارد هاله ای اطراف آن را گرفته باشد. بعد ازسرمازدگی جبهه ای می توان مشاهده نمود که خسارت آن منحصراً به برگ‌هایی که درمعرض آسمان هستند محدود نمی شود، بلکه حتی علف‌های هرز زیرسایه گیاهان نیز آسیب می بینند. در چنین شرایطی نباتات حرارت خود را به هوای سرد داده و به سرعت افت درجه‌ی حرارت پیدا می‌کند، به‌طوریکه حتی ممکن است حرارت های تشعشعی نیز در چنین حالتی کار ساز و مفید واقع نشود. معمولاً هوای سرد در محل‌های گودی و داخل دره‌ها بیشتر توسعه یافته و شدیداً خسارت می زند.

باکتری‌های هسته‌ی یخ

از آنجا که آب خالص در دمای ۳۸- تا ۴۰- درجه سانتی‌گراد یخ می‌زند، لذا دلیل یخ زدن آب در دماهای بالاتر از این دما، بستگی به حضور ذرات زنده یا غیرزنده‌ای دارد که تشکیل کریستال‌های یخ را در دماهای بالاتر آسان می‌کنند (Santl- et al., 2016 Temkiv. ذرات گرد و غبار و املاح معدنی موجود در هوا عمده‌ترین هسته‌های یخ موجود در جو هستند که در ابرها باعث بارش و تشکیل کریستال‌های یخ به صورت برف و تگرگ می‌شوند. علاوه بر این معمولا هوا و ابرها پر از باکتری‌هایی هستند که هسته‌های یخ بیولوژیک را ایجاد می‌کنند. باکتری‌های هسته یخ، با توانایی خود در القای تشکیل یخ در دماهای نزدیک به صفر درجه سلسیوس، با استفاده از پروتئین‌های هسته‌ساز یخ موجب سرمازدگی گیاهان می‌شوند. چنانچه هر گرم از بافت گیاهی توسط ۱۰۰۰ سلول باکتری هسته یخ کلونیزه شود، بافت گیاهی در دمای بالاتر از ۵- درجه سلسیوس در معرض یخ زدگی قرار خواهد گرفت. باکتری‌های هسته یخ در طبیعت به‌صورت اپی‌فیت وگروهی بیمارگر در سطح گیاهان مستقر هستند به همین دلیل گیاهان حساس به سرما در اثر کاهش مختصر دما به زیر صفر، دچار خسارت سرمازدگی می‌شوند (Gurian et al., 1993). در ایران نیز گونه‌های مختلف باکتری‌های فعال هسته‌یخ از میزبان‌های مختلف جداسازی شده است. گونه هایی از باکتری‌های هسته‌یخ از سطح درختان پسته در بیش از ۸۰ منطقه پسته‌کاری استان کرمان جداسازی و تعدادی از آنها بر اساس تعیین توالی بخشی از ناحیه ژن‌های16SRDNA،

rpoD و recA شناسایی شدند. جدایه‌های *Pseudomonas moraviensis, Pseudomonas putida, Pseudomonas fragi, Pseudomonas viridiflava, Pantoea agglomerans, Entrobacter cloacae* به‌عنوان باکتری‌های مولد هسته یخ پسته شناسایی شدند. فعالیت هسته یخ درباکتری‌های *P. moraviensis, P. fragi,* و *E. cloacae* برای نخستین بار گزارش شد که بیشترین فرکانس هسته یخ مربوط به *P. fragi* و کمترین مربوط به *E. cloacae* بود. همچنین توان ایجاد سرمازدگی این جدایه‌ها روی گیاهچه‌های گندم به اثبات رسید. جدایه های فعال هسته یخ مربوط به مناطقی از استان کرمان بود که میانگین سالانه 60 % خسارت سرمازدگی دارند (Rostami et al., 2018a). در ادامه‌ی تحقیقات، ژن هسته یخ در این باکتری‌ها ردیابی و گزارش شد (Rostami et al., 2018b).

فعالیت هسته ی یخ در باکتری های مختلف و حتی در یک گونه باکتری، در شرایط محیطی مختلف متفاوت است. باکتری های مولد هسته یخ فرکانس های متفاوتی در ایجاد هسته زایی کریستال های یخ از خود نشان می دهند. بررسی منابع نشان می دهد که بیان ژن‌های هسته یخ و تولید پروتئین‌های مزبور تحت تاثیر عوامل مختلف محیطی، از قبیل دما، نور، رطوبت و ماده غذایی در دسترس قرار دارد (Attard et al., 2012). منبع کربنی مورد استفاده باکتری و شرایط آزمایشگاهی در تولید ترکیبات متابولیکی باکتری تاثیر به‌سزائی دارد (Metsoviti et al., 2012). مطالعه رستمی و همکاران نشان داد، گلیسرول وگلوکز به‌عنوان منبع کربنی در محیط کشت تاثیر بسیار معنی داری در فرکانس هسته یخ دارد. به‌طوریکه با دو برابر شدن غلظت گلیسرول، زمان یخ‌زدگی سوسپانسیون باکتری استرین *P. virdiflava* raf$_2$ به نصف کاهش یافت (Rostami et al., 2018). بررسی و مقایسه فرکانس هسته یخ در برخی جدایه‌های باکتریایی همراه با عارضه سرمازدگی در درختان پسته منطقه رفسنجان نشان دادکه در بین استرین های شناسایی شده، استرین *Pseudomonas* sp. Strain 82-1 بیشترین فرکانس هسته‌یخ (3.6×10^4) و استرین *Curtobacterium flaccumfaciens* strain 1-4 کمترین فرکانس (1.1×10^4) را در شرایط آزمایشگاه داشت.

استرین *C. flaccumfaciens* strain 1-4 و *E. cloacae* strain 69-1 در این تحقیق برای اولین بار به‌عنوان باکتری مولد هسته یخ در رفسنجان گزارش شدند (Beirami and Rostami, 2019).

کنترل باکتری های هسته یخ

یکی از عوامل تشدید کننده در میزان سرمازدگی، وجود باکتری‌های هسته یخ در سطح گیاهان است. آزمایش‌های صحرایی نشان داده‌اند که با کاهش جمعیت باکتری‌های هسته یخ در گیاهانی که دماهای انجماد را تجربه می‌کنند، خسارت سرمازدگی به‌طور قابل توجهی کاهش می یابد. در واقع کنترل جمعیت این باکتری‌ها در سطح گیاهان، آنها را از سرمازدگی در دماهای بالاتر از انجماد (حداقل ۲درجه سانتیگراد سردتر از حد انتظار) نجات می‌دهد. درجه افزایش ابرسرد شدن گیاهان که در شرایط مزرعه مشاهده می‌شود، متناسب با لگاریتم کاهش اندازه جمعیت باکتری INA است که به دست می‌آید. افزایش ۱ درجه سانتیگراد در توانایی فوق خنک کننده نیازمند حداقل ۱۰۰ برابر کاهش اندازه جمعیت باکتری INA است (Lindow, 2023).

معمولا برای کنترل باکتری‌های هسته یخ از باکتری‌کش‌ها (سموم مسی) یا باکتری‌های رقیب استفاده می شود. متأسفانه، باکتری‌کش‌های نسبتاً کمی برای کنترل باکتری‌های INA ثبت شده‌اند، همانطور که برای کنترل باکتری‌های بیماری‌زای گیاهی نیز وجود دارد. ترکیبات حاوی مس رایج‌ترین باکتری‌کش ها در مدیریت باکتری های مرتبط با گیاه هستند. با وجود محدودیت‌های این

کلرید سدیم، بررسی تولید آنزیم‌های خارج سلولی وحساسیت به آنتی بیوتیک مورد شناسایی قرار گرفتند. بر اساس نتایج این آزمون‌ها مشخص شد که یکی از جدایه‌ها متعلق به جنس *Pantoea* و دیگری متعلق به جنس *Streptomyces* بودند. هر دوجدایه قدرت بازدارندگی مناسبی علیه باکتری عامل هسته یخ در شرایط آزمایشگاهی داشتند. این یافته می‌تواند نوید بخش کنترل زیستی تنش سرمازدگی در باغات پسته باشد (Dehghan Moghadam and Rostami, 2021).

مطالعات متعدد نشان داده است که ترکیب باکتری های سطح برگ، به شدت تحت تأثیر بافت گیاه، عملیات زراعی و حتی گیاهان موجود در محیط اطراف است. مدیریت پوشش گیاهی و تغییر سایر پارامترهای آگرواکولوژیکی فرصت هایی را برای تعدیل کلونیزاسیون محصولات توسط باکتری های مهاجر INA برای جلوگیری از آسیب سرمازدگی بسیار موثر است. نقش مهم این عوامل در تأمین میکروارگانیسم های مهاجر در هوا، و ترکیب جامعه باکتریایی اپی فیتیک روی گیاهان می باشد. لذا مطالعه‌ی میکروبیوم های فیلوسفر گیاهان، روش های جدید را برای جلوگیری از آسیب سرمازدگی به گیاهان شناسایی کرده است (Meyer et al., 2022).

نقش فنوتیپ هسته یخ در باکتری های INA

با توجه به اینکه ژن اعطا کننده فعالیت هسته‌زایی یخ ظاهراً فقط یک بار تکامل یافته است، اما به صورت افقی به انواع مختلف گونه‌های باکتریایی منتقل شده است، دانستن مزیت انتخابی اصلی برای این ویژگی دشوار است. با این حال، چندین مزیت فرضی فنوتیپ Ice+ در گونه‌های مختلف باکتری وجود دارد. قابل توجه است که بخش زیادی از باکتری های INA شناخته شده با گیاهان مرتبط هستند، و بنابراین بسیاری از مشارکت های فرضی هسته یخ در تناسب باکتری ها به تعامل آنها با گیاهان مرتبط است. اندازه جمعیت *P. syringae* دارای فنوتیپ هسته یخ (Ice^+)در گیاهانی که آسیب یخ زدگی را متحمل شده اند، به طور قابل توجهی، حتی به صورت موقت، افزایش می یابد (Buttner and Amy 1989; Gross et al., 1983: Rostami et al., 2018a).

در تعامل باکتری های هسته ی یخ با گیاهان این سوال مطرح می شود که تشکیل کریستال های مخرب یخ در سلولهای گیاهی چه سودی برای باکتری هسته یخ خواهد داشت. در پاسخ باید گفت که، نمونه های متعددی از بیماری های تحریک شده توسط سویه های INA در دو گونه *P. syringae* و *Xanthomonas* وجود دارد که با تشکیل یخ تسهیل می شود (Azad and Schaad 1988; Fones, 2020).

نه تنها بیماری به دنبال آسیب یخ زدگی محتمل‌تر یا شدیدتر است، بلکه فرآیند انجماد،ذوب نفوذ غیر فعال باکتری هسته یخ را به گیاه آسانتر می کند. بنابراین، هسته‌زایی یخ یک عامل بیماریزایی وابسته به دما برای چندین گونه بیماری‌زای گیاهی INA است. با این حال، از آنجایی که بسیاری از باکتری های INA پاتوژن های گیاهی نیستند وسایر مزایای فنوتیپ Ice+ باید در نظر گرفته شود (Rajashekar et al., 1983). از مزایای دیگر هسته یخ بودن برای باکتری های هسته یخ انتشار راحت آنها در جو و ذرات هوا می باشد. پس از خروج از سطوح برگ، باکتری‌ها می‌توانند به سرعت از طریق وارد اتمسفرشده و در نهایت با قطرات آب فوق‌سرد شده در صورت برخورد با ابرها برهم‌کنش می‌کنند و باعث یخ زدن قطرات می‌شوند (Failor et al., 2017). همانطور که قبلاً گفته شد، رویدادهای هسته‌زایی یخ در فرآیند بارش از طریق افزایش اندازه بلورهای یخ مهم هستند. همراه با بارش پراکندگی این باکتری ها توسط باران و برف مجدد به سطوح گیاهان و زمین برگشته وبدین شکل در چرخه هیدرولوژیکی جابجا می شوند. غلظت و فعالیت هسته های یخ در ابرها می تواند بر اقلیم تأثیر بگذارد (Murray et al., 2021).

ترکیبات ضد سرما

یکی از مکانیسم‌های سازگاری که موجودات زنده برای رشد در محیط‌های سرد تکامل یافته‌اند، تولید پروتئین‌های ضد یخ[2] با قابلیت‌های عملکردی برای مقاومت در برابر دماهای سرد است. پروتئین‌های ضد یخ به‌طور گسترده در گونه‌های مختلف مقاوم به سرما شناسایی شده‌اند و با کاهش نقطه انجماد مایعات بدن، ماندگاری موجودات سازگار با سرما را تسهیل می‌کنند. این پروتئین‌ها می‌توانند با اتصال به کریستال‌های یخ، شکل آن را تغییر داده و نقطه انجماد محلول را کاهش دهند و از تبلور مجدد کریستال‌های یخ جلوگیری کنند، بنابراین به آنها پروتئین‌های اتصال یخ نیز می‌گویند(Baskaran et al., 2021) . علاوه بر این، لازم به ذکر است که AFPها دارای خواص غیر سمی هستند و هیچ عواقب نامطلوبی را ادر محصولات غذایی ایجاد نمی‌کنند. از زمان کشف گلیکوپروتئین‌های ضد یخ در خون ماهی‌های قطب جنوب در اواخر دهه ۱۹۶۰، انواع مختلفی از AFPs در بسیاری از موجودات کشف شده است که در میان آن‌ها، AFP های مشتق شده از گیاهان در مقایسه با سایر AFP ها، فعالیت بازدارندگی بهتری در برابر تبلور مجدد کریستال یخ دارند. این امر ممکن است به دلیل این واقعیت باشد که AFP های مشتق شده از گیاه معمولاً حاوی چندین حوزه اتصال کریستال یخ آبدوست هستند که به نظر می رسد به ویژه در جذب کریستال های یخ موثر باشند تا از مهاجرت مولکول های آب جلوگیری کرده و رشد کریستال های یخ را در دمای انجماد کنترل کنند(Obadi and Xu, 2023). گیاهان در دوره ی زمستان گذرانی خود پروتئین های ضد یخ را (AFPs) ترشح می‌کنند تا تحمل انجماد را فراهم کنند. این پروتئین ها به بلورهای یخی که در آپوپلاست در دمای زیر صفر تشکیل می شوند متصل می شوند و از رشد آن ها جلوگیری می کنند. فعالیت ضد یخ در بیش از ۶۰ گیاه، شناسایی شده است و AFP ها از ۱۵ مورد از این گیاهان، از جمله: یونجه (*Medicago sativa*) ، چاودار(*Secale cereale* ، برگ نو *(Ligustrum lucidum)* خالص شده اند. توصیف بیوشیمیایی فعالیت ضد یخهای گیاهی، نشان داده است که عملکرد اصلی آن‌ها مهار رشد کریستال یخ به جای کاهش دمای انجماد است. ثابت شده است که کلسیم و هورمون هایی مانند اتیلن و اسید جاسمونیک فعالیت ضد یخ گیاهان را تنظیم می کنند(Gupta and Deswal, 2014) .

از طرفی یکی از راهکارهایی که برای کاهش آسیب های سرمازدگی در گیاهان توصیه شده است، استفاده از ترکیبات کاهش دهنده اثرات مخرب تنش سرماست است که قبل از بروز سرما به صورت محلولپاشی احتمالا می تواند خسارات ناشی از سرمازدگی را در این گیاهان کاهش داده و از تحمیل هزینه های واکاری این گیاهان جلوگیری کند. مطالعات میدانی و علمی نشان می‌دهد که ترکیبات حاوی اسید آمینه ال - پرولین، پلیمرهای زیست سازگار و طبیعی و برخی الکل های چندعاملی تاثیر بسیار زیادی در کنترل همزمان تنش های موقت سرمایی و بهبود آسیب های بعد از آن دارند به شکلی که ضمن جلوگیری از توقف رشد گیاه، عملیات ترمیم سلولی در جهت افزایش طول عمر گیاه میسر گردد. مطالعات میدانی موید کاهش خسارات ناشی از سرمازدگی بعد از تیمار با ترکیبات حاوی ال پرولین و پلیمرهای زیست سازگار طبیعی به میزان بیش از ٪۳۷ می‌باشد. کاربرد ال – پرولین با افزایش محتوای کلروفیل، پرولین و فعالیت آنتی اکسیدانی کل و کاهش نشت یونی، مالون دی آلدئید و پراکسید هیدروژن سبب کاهش صدمه سرمازدگی گیاهچه ها شد (Taherzai et al., 2023).

[2] Anti-freeze Proteins (AFPS)

نتیجه گیری

باتوجه‌به‌این‌نتایج‌به‌نظرمی‌رسدشـــناخت‌فاکتورهـــای‌مـــؤثردرکلونیزه‌نمودن‌سطح‌گیاه‌توسط‌باکتری‌های‌مولدهسته‌یخ،می‌تواندراهکارهای‌ؤثری‌بـــرای‌کنتـــرل‌بیمـــاری‌هـــای‌گیـــاهی‌وخســـارت‌سرمازدگی‌ارائه‌دهد. واضح است که از زمان کشف این باکتری هادر اوایل دهه ۱۹۷۰ اطلاعات زیادی در مورد مکانیسم‌های هسته‌زایی یخ باکتریایی به‌دست آمده است. مطالعات در زمینه‌ی مدل‌سازی مولکولی پروتئین‌های هسته یخ و مطالعات بیوفیزیکی فرآیند هسته‌زایی یخ باکتریایی درک ما را از فرآیندی که توسط آن‌ها تشکیل یخ ر کاتالیز می‌کنند، کامل می کند. در مورد فرآیندهایی مانند هسته زایی یخ که منجر به آسیب سرمازدگی به گیاهان حساس به سرم می شود، باید مطالعات بیشتری انجام شود. مطالعات در این زمینه نیازمند تیم های بین رشته‌ای متشکل از میکروبیولوژیست‌ها زیست شناسان گیاهی، زیست هواشناسان و سایر متخصصان است تا با موفقیت، با پیچیدگی‌های فرآیند انجماد مقابله کنند در این مسیر میکروبیوم گیاهان، واکنش گیاهان به یخ و فرآیند فیزیکی تکثیر یخ و سایر عوامل باید در نظر گرفته شود. ابزارهای جدید قدرتمند برای مطالعه فیتوبیوم و همچنین تصویربرداری مادون قرمز برای تجسم تشکیل یخ در گیاهان لازم است تا با ارائه بینش بیشتر تعدیل جمعیت‌های باکتریایی هسته یخ و کنترل سرمازدگی محقق شود. مطالعه ی مولکولی هسته زایی یخ باکتریایی ممکن است به کشف عوامل ضد هسته قوی برای کنترل یخ زدگی گیاهان منجر شود.

منابع

1. Afshri, H., Hokmabadi, H., ebadi, a.g., Arab, H.A. and Ghorbanian, A.R. 2009. The study of spring frost resistance of some commercial damghan pistachio (*pistacia vera*) cultivars. Plant and ecosystem, 5(18): 60-76.
2. Allard, F. Houde, M. Krol, A. Ivanov, N. P. Huner, A. and Sarhan, F. 1998. Betaine improves freezing tolerance in wheat. Plant Cell Physiology, 39: 1194-1202.
3. Attard, E., Yang, H., Delort, A.M., Amato, P., Oschl, U.P., Glaux, C., Koop, T. and Morris, C.E. 2012. Effects of atmospheric conditions on ice nucleation activity of Pseudomonas. Atmosferic Chemistry and Phyisics, 12: 10667–10677
4. Azad, H. and Schaad, N.W. 1988. The relationship of *Xanthomonas campestris* pv. translucens to frost and the effect of frost on black chaff development in wheat. Phytopathology, *78*(1): 95-100.
5. Baskaran, A., Kaari, M., Venugopal, G., Manikkam, R., Joseph, J. and Bhaskar, P.V. 2021. Anti-freeze proteins (Afp): Properties, sources and applications–A review. International Journal of Biological Macromolecules, 189: 292-305.
6. Beirami, A.H. and Rostami, M. 2019. Investigation and comparison of ice core frequency in some bacterial isolates associated with frostbite in pistachio trees of Rafsanjan region. 7th National Conference on Applied Research in Healthy Food Sciences from Farm to Table. P. 17. (In Persian)
7. Buttner, M.P. and Amy, P.S. 1989. Survival of ice nucleation-active and genetically engineered non-ice-nucleating Pseudomonas syringae strains after freezing. Applied and environmental microbiology, 55(7): 1690-1694.
8. Dehghan Moghadam, M. and Rostami, M. 2021. Antagonistic activity of some epiphytic bacteria and actinomycetes against ice nucleation active bacteria on Rafsanjan pistachio trees. Biological control of pests and plant diseases, 10(1): 77-87.

9. Eslami, S.V., Behdani, M.A. and Jami-Alahmadi, M. 2012. Influence of Exogenous Glycinebetaine Application on Improving Chilling Tolerance in Corn Seedlings (*Zea mays* L.). Iranian Journal of Field Crops Research, 8(6): 939-945. doi: 10.22067/gsc. v8i6.8040
10. Failor, K.C., Schmale Iii, D.G., Vinatzer, B.A. and Monteil, C.L. 2017. Ice nucleation active bacteria in precipitation are genetically diverse and nucleate ice by employing different mechanisms. The ISME Journal, 11(12): 2740-2753.
11. Fones, H.N. 2020. Presence of ice-nucleating *Pseudomonas* on wheat leaves promotes *Septoria tritici* blotch disease (*Zymoseptoria tritici*) via a mutually beneficial interaction. Scientific Reports, 10(1):1-9.
12. Francis, J. and Skific, N. 2015. Evidence linking rapid Arctic warming to mid-latitude weather patterns. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 373(2045): 1-12. https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0170
13. Gholipour, Y. 2005. Applied biology of pistachio tree. Tehran seda, Tehran. Pp.104.
14. Gross, D.C., Cody, Y.S., Proebsting Jr, E.L., Radamaker, G.K. and Spotts, R.A. 1983. Distribution, population dynamics, and characteristics of ice nucleation-active bacteria in deciduous fruit tree orchards. Applied and environmental microbiology, 46(6): 1370-1379.
15. Gupta, R. and Deswal, R. 2014. Antifreeze proteins enable plants to survive in freezing conditions. Journal of Biosciences, 39: 931-944.
16. Keenan, T.F., Richardson, A.D. and Hufkens, K. 2020. On quantifying the apparent temperature sensitivity of plant phenology. New Phytologist, 225(2): 1033-1040.
17. Lindow, S. 2023. History of discovery and environmental role of ice nucleating bacteria. Phytopathology, 113(4): 605-615.
18. Metsoviti, M., Paramithiotis, S., Drosinos E.H., Galiotou-Panayotou M., Nychas G.J.E., Zeng A.P. and Papanikolaou S. 2012. Screening of bacterial strains capable of converting biodiesel-derived raw glycerol into 1, 3-propanediol, 2, 3-butanediol and ethanol. Engineering in Life Sciences, 12: 57-68.
19. Meyer, K.M., Porch, R., Muscettola, I.E., Vasconcelos, A.L.S., Sherman, J. K., Metcalf, C.J.E. ... and Koskella, B. 2022. Plant neighborhood shapes diversity and reduces interspecific variation of the phyllosphere microbiome. The ISME journal, 16(5): 1376-1387.
20. Murray, B.J., Carslaw, K.S. and Field, P.R. 2021. Opinion: Cloud-phase climate feedback and the importance of ice-nucleating particles. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(2): 665-679.
21. Nazemosadat, M.J., Sepaskhah, A.R. and Mohammady, S. 2001. Application of dew point in the prediction of chilling stress (case study in Jahrom, Fars Province), 5 (3): 9-16. (In Persian)
22. Obadi, M. and Xu, B. 2023. Characteristics and applications of plant-derived antifreeze proteins in frozen dough: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 225: 128202.
23. Rajashekar, C.B., Li, P.H. and Carter, J.V. 1983. Frost injury and heterogeneous ice nucleation in leaves of tuber-bearing Solanum species: ice nucleation activity of external source of nucleants. Plant physiology, 71(4): 749-755.
24. Repo, T., Domisch, T., Kilpeläinen, J. and Mäkinen, H. 2021. Soil frost affects stem diameter growth of Norway spruce with delay. Trees, 35: 761-767.
25. Rostami, M., Hasanzadeh, N., Khodaygan, P. and Riahi-Madvar, A. 2018a. Ice nucleation active bacteria from pistachio in Kerman Province, Iran. Journal of Plant Pathology, 100: 51-58.

26. Rostami, M., Hasanzadeh, N., Khodaygan, P. and Riahi Madvar, A. 2018b. Evaluation of Ice Nucleation Activity (INA) and INA Gene Detection in the Bacteria Isolated from Pistachio Trees in Kerman Province, Iran. Journal of Nuts. 2(9):147-157.
27. Santl-Temkiv, T., Ling, M., Holm, S., Finster, K. and Boesen, T. 2016. The presence of INA proteins on the surface of single cells of *Pseudomonas syringae* R10. 79 isolated from rain. In European Geosciences Union General Assembly, 18: 15510.
28. Serraj, R. and Sinclair, T.R. 2002. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions. Plant Cell Environment, 25: 333-341.
29. Shahrokhi Kahnooj, Kh. and Rostami, M. 2021. Study of the possibility of biological control of frostbite of pistachio plants using epiphytic antifreeze bacteria. Biological control of pests and plant diseases, 9(2): 173-183.
30. Somersalo, S., Kyei-Boahen, S. and Pehu, E. 1996. Exogenous glycine betaine application as a possibility to increase low temperature tolerance of crop plants. Nordisk Jordbruksforskning, 78(2): 102.
31. Sorkhan, R.S., Enteshari, S., Hokmabadi, H. and Tajabadipour, A. 2011. Physiological evaluation of pistachio frost damage resistant rootstocks. International Journal of Nuts and Related Sciences. 2(4): 55-66.
32. Taherzai, A.R., Ansaripour, M.M. and Bashirinia, E. 2023. Investigating the use of biocompatible polymer compounds along with the amino acid L-proline to reduce the effect of cold stress in plants and prevent the freezing of interstitial water and cell sap. The first national frost event in the agricultural sector (challenges and solutions). https://civilica.com/doc/1810481. (In Persian)