

فناوری‌های نوین پیش‌بینی، پایش و هشدار سرمازدگی

نیکروز باقری

عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. n.bagheri@areeo.ac.ir **رایانامه:**

صص: ۳۵-۴۷

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۱۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۴/۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۹

چکیده

سرمازدگی خطری جدی برای امنیت غذایی در سراسر جهان و ایران است. هر ساله در اثر سرمازدگی، به ویژه سرمازدگی تابشی، به محصولات کشاورزی خسارت‌های زیادی وارد می‌شود. پایش محصول و پیش‌بینی به موقع این عارضه می‌تواند خسارت‌های ناشی از سرمازدگی را کاهش دهد. به دلیل ویژگی‌های سرمازدگی تابشی و وابستگی رخداد و شدت خسارت آن به شرایط زمین (توپوگرافی)، اقلیم و وضعیت گیاه، الگوهای سنتی توانایی قابل توجهی در پیش‌بینی آن ندارند. در سال‌های اخیر، پیشرفت هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، و سامانه‌های فیزیکی-سایبری زمینه مناسبی را برای پیش‌بینی سرمازدگی فراهم کرده‌اند. همچنین، کاربرد فناوری سنجش از دور، پایش و برآورد مقدار و شدت خسارت را بهبود بخشیده است. در این مقاله، فناوری‌های نوین پیش‌بینی سرمازدگی و پایش محصول معرفی شده است. برای استقرار هوشمند تجهیزات حفاظتی، استفاده از سامانه‌های هوشمند پیش‌بینی سرمازدگی تابشی محلی و نیز پهپادها برای تشخیص کانون‌های سرما توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: اینترنت اشیا، پیش‌بینی سرمازدگی، سایبر-فیزیکی، سنجش از دور، هوش مصنوعی، یادگیری ماشینی.

مقدمه

در کشاورزی، به رویدادی که دما به کمتر از صفر درجه سلسیوس برسد - حتی اگر بلورهای یخ قابل مشاهده تشکیل نشود - سرمازدگی^۱ گفته می شود (رودریگو^۲، ۲۰۰۰). در تعریفی دیگر، به کاهش دمای هوا به کمتر از دمای آستانه تحمل گیاه سرمازدگی می گویند (رحیمی، ۱۳۹۱). سرمازدگی هر ساله به محصولات کشاورزی خسارات گسترده ای وارد می کند. برای مثال، خسارات ناشی از سرمازدگی در اروپا در اواخر بهار ۲۰۱۷ برابر با ۳/۳ میلیارد یورو (زرنر^۳ و همکاران، ۲۰۲۰) و در ایالات متحده آمریکا یک میلیارد دلار (اسمیت^۴، ۲۰۱۸) گزارش شده است. همچنین، خسارت سرمازدگی به باغ های چای کشور چین در طول سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶، برابر با ۴/۳ میلیارد ین بوده است (لوو^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). در استرالیا نیز خسارت سالانه سرمازدگی ۱۲۰ تا ۷۰۰ میلیون دلار برآورد شده است (کریمپ^۶ و همکاران، ۲۰۱۶). آمار خسارت سرمازدگی در استان های مختلف کشور ما متفاوت است. به طور کلی، می توان گفت در اغلب مناطق، خسارت وارده به محصولات باغی ۵۰ تا ۱۰۰ درصد گزارش شده است (امیدمهر، ۱۳۹۷). براساس نتایج پژوهش هوا^۷ و همکاران (۲۰۲۵)، درختان باغی از سرمازدگی بیشترین خسارت را می بینند.

سرمازدگی از نظر زمان وقوع، به دو نوع زمستانه و بهاره و از نظر چگونگی وقوع، به دو نوع جبهه ای^۸ (انتقالی) و تابشی^۹ (تشعشی) تقسیم می شود (باقری، ۱۴۰۰). سرمازدگی جبهه ای ورود یک جبهه هوای سرد در مقیاسی بزرگ همراه با باد است. دمای هوا حتی در طول روز کمتر از صفر درجه سلسیوس است. سرمازدگی تابشی وقتی رخ می دهد که در طول روز گیاهان و زمین با تابش خورشید گرم می شوند و در طول شب این انرژی را به صورت تابش امواجی با طول موج بلند از دست می دهند؛ در نتیجه هوا به شدت سرد می شود. در چنین شرایطی، لایه های پایین تر هوا که با گیاه در تماس هستند، به دمای بحرانی می رسند. این سرمای انباشته می تواند دمای گیاهان را به کمتر از صفر

درجه سلسیوس برساند حتی اگر دمای ثبت شده در ایستگاه های هواشناسی بالاتر باشد. سرمازدگی تابشی بیشتر در شب های آرام، بدون باد و آسمان صاف رخ می دهد (رحیمی، ۱۳۹۱). به دو روش زیر می توان از گیاهان در برابر سرمازدگی حفاظت کرد:

- روش های حفاظت غیرفعال^{۱۰} (بلندمدت). هدف از روش های پیشگیرانه غیرفعال یا بلندمدت، پیش گیری از خسارت است و معمولاً پیش از ورود سرما انجام می شود. تعیین محل مناسب برای کاشت، انتخاب شیب مناسب، انتخاب رقم های محصول مناسب با منطقه و مدیریت تغذیه از روش های حفاظت غیرفعال هستند؛

- روش های حفاظت فعال^{۱۱} (کوتاه مدت): روش های کوتاه مدتی هستند که هم زمان یا کمی پیش از بروز سرمازدگی استفاده می شوند. در حال حاضر، تجهیزات متعددی شامل انواع سوخت های جامد، بخاری، ماشین مولد باد، چاهک معکوس و سامانه های آبیاری، پخش کننده کف یا فوم و مه پاشی از روش های فعال رایج هستند (رحیمی، ۱۳۹۱).

روشن شدن تجهیزات حفاظتی در زمان مناسب بسیار مهم است چرا که روشن کردن دیر هنگام این تجهیزات مبارزه با سرمازدگی را بی اثر می کند و روشن کردن زود هنگام آن ها نیز هزینه و استهلاک تجهیزات را افزایش می دهد. همچنین، پیش بینی زمان پایان سرمازدگی برای تعیین مدت زمان لازم برای روشن بودن دستگاه بسیار اهمیت دارد. بنابراین، مهمترین عامل در اثربخش بودن روش حفاظتی استفاده شده، پیش بینی دقیق زمان شروع و پایان سرمازدگی است (باقری و همکاران، ۲۰۲۳).

1. Frost
2. Rodrigo
3. Zohner
4. Smith
5. Lou
6. Crimp
7. Hua
8. Advective Frost
9. Radiational Frost
10. Passive
11. Active

الگوهای عددی

الگوهای عددی^۲ کلاسیک، فرآیندهای فیزیکی جو مانند حرکت سیال، انتقال حرارت و تابش را با حل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی شبیه‌سازی می‌کنند (هوآ و همکاران، ۲۰۲۵). تاسما^۳ و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که در زمین‌های وسیع در مناطق مختلف، الگوهای عددی کلاسیک پیش‌بینی سرمازدگی زیاد دقیق نیستند. این الگوها، معمولاً برای سرمازدگی جبهه‌ای کاربرد دارند.

الگوهای آماری

الگوهای رگرسیون، سری‌های زمانی و الگوهای آماری ریزمقیاس^۴، از جمله الگوهای آماری^۵ متداول در پیش‌بینی آب‌وهوا هستند. پژوهشگران با استفاده از الگوی رگرسیون، بروز سرمازدگی را با دقت ۷۹ درصد پیش‌بینی کردند. آن‌ها نشان دادند که با بهره‌گیری از الگوهای فصلی، این الگو می‌تواند عملکرد پیش‌بینی را بهبود بخشد (تومکوویچ و اشمیت^۶، ۲۰۱۹). براساس نتایج پژوهش‌ها، دقت الگوهای آماری پیش‌بینی به فرض‌های احتمالاتی انتخاب‌شده وابسته است. این مسئله ممکن است در درک فرآیندهای پیچیده فیزیکی پیش‌بینی آب‌وهوا، به‌ویژه در زمینه تغییرات اقلیمی اخیر، چالش‌برانگیز باشد. با توجه به ماهیت غیرمنظم و تعامل پیچیده بین عوامل مختلف، پیش‌بینی سرمازدگی معمولاً پدیده‌ای دشوار است. اخیراً استفاده از الگوهای پیش‌بینی سرمازدگی مبتنی بر یادگیری ماشین

پیشتر براساس تجزیه و تحلیل آماری داده‌های هواشناسی، وضعیت آب‌وهوا پیش‌بینی می‌شد. اما در طول دو دهه گذشته روش‌های پیش‌بینی تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشته و بر مبنای هوش مصنوعی و با استفاده از سامانه‌های خبره و تصمیم‌یار انجام می‌شود (فریز^۱ و همکاران، ۲۰۰۶). در ایران معمولاً سازمان هواشناسی کشور پیش‌بینی‌های سرمازدگی را انجام می‌دهد. تجربه و مطالعات میدانی نشان داده است که در بسیاری از موارد، این پیش‌بینی‌ها اشتباه بوده و خسارت زیادی به محصولات کشاورزی وارد کرده است. دور بودن ایستگاه‌های هواشناسی از عرصه کشت، کند بودن به‌روزرسانی داده‌های هواشناسی، در دسترس نبودن داده‌ها برای کشاورزان و ضرورت پرداخت هزینه، در نظر گرفته نشدن شاخص‌های محلی تأثیرگذار بر سرمازدگی مانند رطوبت نسبی هوا، نوع درخت، شرایط زمین، وضعیت آبیاری و تغذیه، وضعیت علف‌های هرز و غیره در پیش‌بینی، از علت‌های اصلی کاهش دقت این پیش‌بینی‌ها است. برای پیش‌بینی درست سرمازدگی، داده‌های مرتبط باید به‌صورت محلی و مرتب پایش و ثبت شوند. برای دستیابی به این هدف باید از فناوری‌های نوین و سامانه‌های هوشمند استفاده کرد. بنابراین، هدف از این مقاله معرفی فناوری‌های نوین برای پیش‌بینی، هشدار و پایش سرمازدگی است.

دستاوردها

روش‌های پیش‌بینی سرمازدگی

پیشرفت در الگوهای پیش‌بینی، فرصت‌های نویدبخشی را برای بهبود دقت پیش‌بینی سرمازدگی فراهم کرده است. در سال ۱۹۸۳، مارتسولف نخستین سامانه پیش‌بینی سرمازدگی به نام «سامانه پیش‌بینی سرمازدگی ماهواره‌ای» را توسعه داد. این سامانه براساس داده‌های حرارتی ماهواره‌ای طراحی شده بود و با استفاده از خطوط تلفن و مودم، اطلاعات مربوط به سرمازدگی را منتشر می‌کرد. در سطح جهان، روش‌های مرسوم و معتبر برای پیش‌بینی سرمازدگی عبارت‌اند از:

1. Fraisse
2. Numerical Modeling
3. Talsma
4. Downscaling
5. Statistical Modeling
6. Tomkowicz and Schmitt

مورد توجه قرار گرفته است (هوآ و همکاران، ۲۰۲۵).

الگوهای یادگیری عمیق

در سال‌های اخیر، الگوسازی با استفاده از روش یادگیری ماشین^۱ رو به افزایش است. روش یادگیری ماشین شامل دو نوع اصلی روش یادگیری ماشین کلاسیک و نوین به شرح زیر است:

الف. الگوهای یادگیری ماشین کلاسیک

روش جنگل تصادفی^۲، ماشین بردار پشتیبان^۳، شبکه‌های بیزی^۴، نزدیک‌ترین همسایه^۵ و رگرسیون لجستیک^۶، از جمله الگوهای یادگیری ماشین کلاسیک هستند. این الگوها به نسبت الگوهای یادگیری ماشین نوین، معمولاً ساختار ساده‌تری دارند. الگوهای جنگل‌های تصادفی و ماشین‌های بردار پشتیبان، توان بالقوه خود برای پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا در کشاورزی را نشان داده‌اند (عاقل‌پور و همکاران، ۲۰۱۹). عملکرد قابل قبول پیش‌بینی الگوها براساس روش جنگل تصادفی به ساختار درخت‌های تصمیم‌گیری چندگانه نسبت داده می‌شود، که با کاهش واریانس پیش‌بینی‌ها، خطاها را کاهش می‌دهد (لیاو و وینر، ۲۰۰۲). با استفاده از الگوی ماشین بردار پشتیبان، دینگ^۷ و همکاران (۲۰۲۱) بروز سرمزدگی را با حساسیت^۸ و دقت^۹ به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۶۰ پیش‌بینی کردند. براساس پژوهش دینیز^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۱)، دقت الگوهای جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی سرمزدگی طی چهار سال به ترتیب برابر با ۹۰ درصد و ۷۶ درصد بوده است.

ب. الگوهای یادگیری ماشین نوین

الگوهای یادگیری ماشین نوین، نسبت به الگوهای یادگیری ماشین کلاسیک، نسبتاً پیچیده‌تر بوده و به استفاده از شبکه‌های عصبی وابسته‌اند (کریم و همکاران، ۲۰۲۱؛ مینال^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۲؛ روشن و همکاران، ۲۰۲۲). الگوهای شبکه عصبی برای الگوسازی روابط پیچیده میان متغیرهای ورودی توسعه یافته‌اند.

با این وجود، ویژگی‌های این الگوها به عنوان الگوهای جعبه سیاه نیز شناخته می‌شوند (لندی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۰). الگوهای شبکه عصبی پیچشی^{۱۳} و بازگشتی کاربرد بیشتری در این زمینه دارند. پژوهش‌ها نشان داده است که دقت پیش‌بینی سرمزدگی الگوهای یادگیری ماشینی مبتنی بر شبکه عصبی، مانند شبکه‌های عصبی پیچشی، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین کلاسیک پیشی گرفته‌اند (تالسما و همکاران، ۲۰۲۳). در جدول ۱ نتایج پژوهش‌های اجرا شده در این زمینه ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱ ارائه شده است، هریک از روش‌های شبکه عصبی قابلیت پیش‌بینی مناسبی دارند.

فناوری‌های پیش‌بینی سرمزدگی و کنترل تجهیزات حفاظتی

امروزه از فناوری‌های جدیدی مانند اینترنت اشیا و سامانه‌های سایر-فیزیکی برای پیش‌بینی سرمزدگی، کنترل وضعیت تجهیزات حفاظتی و از فناوری سنجش‌ازدور برای پایش گیاهان و تعیین مقدار خسارت استفاده می‌شود. در ادامه هر یک از این فناوری‌ها توضیح داده می‌شوند:

سامانه‌های سایر-فیزیکی و اینترنت اشیا

سامانه‌های سایر-فیزیکی^{۱۴}، از اجزای فیزیکی (مانند حسگرها، عملگرها، دستگاه‌ها و ماشین‌ها) به همراه اجزای محاسباتی (مثل الگوریتم‌ها، رایانه‌ها، یا شبکه‌های دیجیتال) به طور هوشمند و یکپارچه استفاده می‌کنند. از این سامانه‌ها برای

1. Machine Learning Modeling
2. Random Forest
3. Support Vector Machine
4. Bayesian Networks – BY
5. K-Nearest Neighbors
6. Logistic Regression
7. Ding
8. Sensitivity (Recall)
9. Precision
10. Diniz
11. Meenal
12. Landi
13. Convolutional Neural Networks
14. Cyber-Physical Systems (CPS)

جدول ۱. نتایج پژوهش‌های مبتنی بر الگوهای یادگیری ماشین برای پیش‌بینی دما و سرمازدگی

روش پیش‌بینی	داده‌ها ورودی	داده‌های خروجی	نتیجه
شبکه عصبی مصنوعی (رایسون و مورت ^۱ ، ۱۹۹۷)	H، Ta، Vs، Vd، Cc	کمترین Ta	فقط دو هشدار اشتباه و یک خطا در ۵۰ روز
شبکه عصبی مصنوعی (شانک ^۲ و همکاران، ۲۰۰۸)	Ta، H، Pd، Vs، Vd، R	Dp	MAE به ترتیب ۰/۵، ۰/۸ و ۲/۱ درجه سلسیوس برای پیش‌بینی ۲، ۶ و ۱۲ ساعت
رگرسیون ^۳ (ریزندورف و کخ، ۲۰۱۳)	Ta، Ts، Ds	دمای بافت تاج گیاه	RMSE برابر ۰/۴ درجه سلسیوس و MAE برابر ۰/۳ درجه سلسیوس
شبکه عصبی مصنوعی (کاستاندا و کاستانو ^۴ ، ۲۰۱۷)	Ta، H، Vs، R	Ta	MAPE برابر ۲۲/۵ درصد
شبکه عصبی مصنوعی (فوئنتس ^۵ و همکاران، ۲۰۱۸)	Ta، H، R، P، Vs، Vd	کمترین Ta	MSE برابر ۱/۷۴ درجه سلسیوس
بیزی و جنگل تصادفی (دیدریش ^۶ و همکاران، ۲۰۱۸)	H و Ta	کمترین Ta	MAE بین ۲/۳-۱/۵۸ درجه سلسیوس شبکه بیزی و ۲/۳۳-۱/۶ درجه سلسیوس برای جنگل تصادفی
شبکه عصبی مبتنی بر فازی (کاستاندا و کاستانو، ۲۰۲۰a)	Ta	Ta	دقت پیش‌بینی بیش از ۹۰ درصد
شبکه عصبی مصنوعی (کاستاندا و کاستانو، ۲۰۲۰b)	H، Ta، R، Vs	پیش‌بینی سرمازدگی، شدت سرمازدگی	MAE برابر ۰/۵۳-۰/۷۶ درجه سلسیوس
نزدیک‌ترین همسایه (کادناس ^۷ و همکاران، ۲۰۲۰)	Ta، H، R، Vs، P، Dp، Pd	وقوع سرمازدگی و کمترین Ta	دقت میانگین ۹۷/۱ درصد
شبکه عصبی بازگشتی (گیلن ^۸ و همکاران، ۲۰۲۰a)	H، Ta، Vs	کمترین Ta	MSE کمتر از ۰/۶۵ درجه سلسیوس
شبکه عصبی پیچشی (لطیف و همکاران، ۲۰۲۰)	Ts	Ts	دقت پیش‌بینی ۹۸/۹ درصد
ماشین بردار پشتیبان (شوالیه ^۹ و همکاران، ۲۰۲۰)	Ta، H، Pd، P، Vs، Vd، R، Ts	Ta	MAE برابر ۰/۵۱ و ۲/۳۰ درجه سلسیوس برای پیش‌بینی ۱ و ۱۲ ساعت قبل
شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی (Diniz et al., ۲۰۲۱)	A، Ed، Lo، La	وقوع سرمازدگی	دقت ۹۰ درصد برای جنگل تصادفی، ۷۶ درصد برای ماشین بردار پشتیبان و ۶۲ درصد برای شبکه عصبی
ماشین بردار پشتیبان (Ding et al., ۲۰۲۱)	Ta، H، R، Vs	وقوع سرمازدگی	حساسیت ۰/۸۹ و دقت ۰/۶۰
نزدیک‌ترین همسایه (کادناس ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱)	H، R، Vs، Vd، P، Pd، Dp، Ta	وقوع سرمازدگی	دقت طبقه‌بندی ۹۵ درصد
رگرسیون خطی (بال ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۱)	Ta، Vs، P، Ec، H	وقوع سرمازدگی	دقت بین ۷۵ تا ۸۱ درصد

1. Robinson and Mort

2. Shank

3. Reinsdorf and Koch

4. Cañañeda and Cañaño

5. Fuentes

6. Diedrichs

7. Cadenas

8. Guillen

9. Chevalier

10. Cadenas

11. Bal

الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی (روشن و همکاران، ۲۰۲۲)	Ta, H, W	Ts	به ترتیب ۰/۰۸۵ و ۰/۲ سلسیوس برای شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک
شبکه عصبی برگشتی (ژو ^۱ و همکاران، ۲۰۲۲)	Ta, H, Dp, Vs, Vd	کمترین Ta	MSE برابر با ۱/۳-۰/۳
شبکه عصبی پیچشی، جنگل تصادفی (تالسما و همکاران، ۲۰۲۳)	Ta, R, H, Ts, P, Vs, Vd	کمترین Ta	به ترتیب ۱/۷۲ و ۱/۵۷ درجه سلسیوس برای جنگل تصادفی و شبکه عصبی پیچشی
شبکه عصبی مصنوعی (ژو و همکاران، ۲۰۲۳)	Ta, Dp, H, Vs, Vd, E, Iv	کمترین Ta	دقت پیش بینی ۹۲/۵ درصد
یادگیری عمیق (باقری و همکاران، ۲۰۲۳)	Ta, H, Dp	وقوع سرمازدگی و Dp	شاخص F برابر با ۹۶ درصد

A: ارتفاع، Ta: دمای هوا، Cc: پوشش ابری، Dp: دمای نقطه شبنم، Du: مدت روز، H: رطوبت، Vs: سرعت باد، Vd: جهت باد، Ts: دمای خاک، W: محتوای آب خاک، P: بارندگی، Du: مدت تابش آفتاب، Ec: تبخیر جمعی، Pd: کمبود فشار بخار، R: تابش خورشید، E: ارتفاع از سطح دریا، Ed: اختلاف ارتفاع، Iv: بلندی (ارتفاع)، Ed: فاصله اقلیدسی از منابع آبی، Lo: طول جغرافیایی، La: عرض جغرافیایی، Ds: عمق برف، MAE: میانگین قدر مطلق خطا، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، MAPE: میانگین درصد خطای مطلق، MSE: میانگین مربعات خطا.

همچنین، این سامانه‌ها می‌توانند تجهیزات حفاظتی را به موقع و از راه دور روشن کرده و با ارسال پیامک به کشاورزان هشدار دهند (اوتونیوک^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، این سامانه‌ها می‌توانند در پایان سرمازدگی، تجهیزات را خاموش کنند. برخی از کاربردهای این فناوری‌ها در پایش سرمازدگی در جدول ۲ ارائه شده است.

ثبت اطلاعات و پیش‌بینی و همچنین کنترل سامانه‌های حفاظتی (روشن و خاموش کردن تجهیزات از راه دور و تغییر شرایط دستگاه‌های حفاظتی) استفاده می‌شود. اجزای اصلی این نوع از سامانه‌ها عبارت‌اند از (هوآ و همکاران، ۲۰۲۳):

- حسگرها: اطلاعاتی مانند دما، فشار، رطوبت، موقعیت، و غیره را از محیط فیزیکی می‌گیرند؛
- پردازشگرها: داده‌ها را تحلیل کرده و تصمیم‌گیری می‌کنند؛
- عملگرها: براساس تصمیمات، تغییراتی در محیط فیزیکی ایجاد می‌کنند؛

• شبکه‌های ارتباطی: ارتباط بین اجزا را فراهم می‌کنند. اینترنت اشیا^۲، اصطلاحی است که نخستین بار کوین اشتون^۳ در سال ۱۹۹۹ مطرح کرد. اینترنت اشیا، یک جهان فناورانه را ترسیم می‌کند که در آن بسیاری از اشیاء مانند حسگرها، ابزارها و تجهیزات روزمره با استفاده از اینترنت و قابلیت‌های شبکه، به هم مرتبط می‌شوند. یک شیء دارای فناوری اینترنت اشیا، از ۳ لایه (بخش) اصلی تشکیل شده است: لایه ادراک^۴ (سنجش)، لایه شبکه^۵ (انتقال داده)، و لایه کاربردی^۶ (ذخیره‌سازی و کاربری داده‌ها) (باقری، ۱۳۹۹).

در سال‌های اخیر، برای مدیریت سرمازدگی از فناوری‌های اینترنت اشیا و سامانه‌های سایر-فیزیکی استفاده می‌شود. این سامانه‌ها ضمن جمع‌آوری داده‌های محیطی با استفاده از حسگرهای گوناگون، می‌توانند سرمازدگی را نیز پیش‌بینی کنند.

1. Zhou
2. Internet of Things (IoT)
3. Kevin Ashton
4. The Perception layer
5. The Network Layer
6. The application layer
7. Awtoniuk

جدول ۲. کاربردهای اینترنت اشیا و سامانه‌های سایبر - فیزیکی برای پایش و کنترل سرمازدگی

نوع سامانه	محصول	تجهیزات حفاظتی	هدف	نوع سامانه	محصول	تجهیزات حفاظتی	هدف
IOT	هلو	-	سامانه حسگر بی‌سیم با مصرف انرژی کم (برون ^۱ و همکاران، ۲۰۱۶)	IOT	-	آبیاری	سامانه پیش‌بینی زودهنگام سرمازدگی محصول و کنترل سرما (گیلان و همکاران، ۲۰۲۰b)
IOT	//	-	سامانه هشدار سرمازدگی (گیلان و همکاران، ۲۰۱۷)	IOT	سیب	بخاری	سامانه پایش سرمازدگی برای اطلاع‌رسانی به کشاورزان (اوتونیوک و همکاران، ۲۰۲۱)
IOT	-	-	پیش‌بینی سرمازدگی (دیدریش و همکاران، ۲۰۱۸)	IOT	-	-	سامانه پایش سرمازدگی (هرآباد ^۲ و افشار، ۲۰۲۲)
IOT	سبزیجات	آبیاری	سامانه هشدار با پیامک (مندز و داسیگ ^۳ ، ۲۰۲۰)	CPS	سیب	بخاری	سامانه هوشمند گرمایشی براساس داده‌های دما و جهت باد (هوآ و همکاران، ۲۰۲۴b)
IOT	گوجه فرنگی	آبیاری	سامانه دریافت داده‌های لحظه‌ای از ایستگاه هواشناسی (کاستاندا و کاستانو، ۲۰۲۰b)				

سنجش‌ازدور

در سال‌های اخیر، برای پایش وضعیت محصول و نیز پایش خسارت‌های سرمازدگی، استفاده از فناوری سنجش‌ازدور در حال افزایش است. بنیان سنجش‌ازدور در پایش سرمازدگی، تهیه تصاویر طیفی با استفاده از سکوها‌های هوایی یا فضایی است. پژوهشگران از طیف‌سنج مادون‌قرمز حرارتی برای شناسایی طیف بازتاب پرتوهای بلورهای یخ‌مانند و بلورهای یخ پوشیده‌شده استفاده کردند تا بازتاب واقعی یخ را به‌دست آورند. نتایج نشان داد که بازتاب بلورهای یخ با اندازه ذرات کوچک‌تر، بیشتر از بلورهای یخ با اندازه ذرات بزرگ‌تر بود. پژوهشگران دیگر اطلاعات طیف بازتاب پخش‌شده برگ‌های جای آسیب‌دیده را در دماهای پایین به‌دست آوردند. آن‌ها با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، الگویی را برای پیش‌بینی سرمازدگی در برگ‌ها در محدوده طیفی مرئی تا مادون‌قرمز نزدیک توسعه دادند. این الگو می‌تواند برگ‌های سالم را از برگ‌های با آسیب خفیف ناشی از سرمازدگی، سریع و دقیق تشخیص دهد. همچنین، این روش برای شناسایی دمای بحرانی آسیب سرمازدگی گیاهان کاربرد دارد (سونگ^۴ و

همکاران، ۲۰۲۱). در پژوهش گوسوامی^۵ و همکاران (۲۰۱۹)، مجموعه‌ای از تصاویر طیفی در چهار باند آبی، سبز، قرمز، و مادون‌قرمز نزدیک، پیش و پس از وقوع سرمازدگی در مزرعه ذرت با استفاده از یک پهپاد شش روتوری جمع‌آوری شد. این روش، شناسایی سریع وضعیت سرمازدگی ذرت را با استفاده از چند الگوی یادگیری ماشین ممکن می‌سازد (شکل ۱).



شکل ۱. تجهیزات پایش سرمازدگی (سمت راست: دوربین چندطیفی، سمت چپ: پهپاد)

1. Brun
2. Herabad
3. Mendez and Dasig
4. Song
5. Goswami

وسیع و فاصله‌های طولانی مناسب هستند اما مصرف انرژی و هزینه نگهداری زیادی دارند (ثاقب^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). سیگفاکس پوشش نسبتاً گسترده و مصرف انرژی و هزینه کمی دارد اما نرخ انتقال داده در آن محدود است. عملکرد شبکه لورا، بسته به نوع زمین و باند فرکانسی، متغیر است. این شبکه دارای زیرساخت شبکه پوشش نسبتاً گسترده، مصرف انرژی و پیچیدگی کم و عمر طولانی باتری دارد (هوآ و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، باتوجه به مزایا و محدودیت‌های هریک از پروتکل‌ها، انتخاب پروتکل برای هر پروژه باید براساس نوع پروژه، بودجه، فاصله مکانی و دقت مورد نیاز انتخاب شود.

روش‌های مختلفی برای اعلام هشدار وجود دارد، مانند: فعال کردن آژیر، ارسال پیامک، ثبت پیغام در برنامه کاربردی اختصاصی دستگاه، ارسال ایمیل و غیره. باتوجه به اینکه بیشتر مناطق کشاورزی دورازدسترس هستند و اغلب در زمان سرمازدگی، کشاورزان در محل حضور ندارند، بنابراین، برای اعلام هشدار باید روشی انتخاب شود که به حضور کشاورز نیاز نباشد. ازسوی دیگر، باتوجه به ضعف اینترنت در مناطق غیرشهری، روش انتخابی نباید به اینترنت وابسته باشد. از این رو، معمولاً روش اعلام هشدار با پیامک روش قابل اعتمادی برای اعلام هشدار سرمازدگی به کشاورز است (باقری و همکاران، ۲۰۲۳).

توصیه‌ها

این مقاله الگوهای پیش‌بینی سرمازدگی (شامل روش‌های عددی، آماری و مبتنی بر هوش مصنوعی) و فناوری‌های مرتبط

در کشور ما کشاورزان پایش سرمازدگی و پایش خسارت را با مشاهده چشمی برآورد می‌کنند که روشی پرزحمت و نادقیق است. باتوجه به قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب، استفاده از پهپادها برای پایش حرارت سطح در حال افزایش است. پلویکی^۱ و همکاران (۲۰۲۰) برای شناسایی مناطق آسیب‌دیده در مزرعه کلزا از پهپاد استفاده کردند. ماوو^۲ و همکاران (۲۰۲۳) کارایی سنجش‌ازدور چندمنبعه پهپادی شامل دوربین‌های چندطیفی، مادون قرمز حرارتی، و مرئی برای پایش سرمازدگی در بوته چای را بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها، الگوهای پایش سرمازدگی با افزایش تعداد داده‌ها، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهند. لیو^۳ و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان دادند که سنجش‌ازدور هوایی با پهپاد می‌تواند برای برآورد شاخص آسیب سرمازدگی در یک محصول با ارقام مختلف به کار رود. باتوجه به قابلیت‌های تصاویر هوایی، پیش‌بینی می‌شود که در آینده از این فناوری برای پایش هم‌زمان با پیش‌بینی هوشمند سرمازدگی استفاده شود.

پروتکل‌های ارتباطی

سامانه‌های پیش‌بینی از انواع پروتکل‌های ارتباطی به شرح زیر استفاده می‌کنند:

-/ارتباطات سیمی^۴ مانند فیبر نوری و ارتباط از طریق خطوط برق، ارتباطی سریع و قابل اعتماد ارائه می‌دهند اما به دلیل پوشش محدود و هزینه‌های نصب زیاد، به ندرت در کشاورزی استفاده می‌شوند.

-/ارتباطات بی‌سیم^۵ به دلیل برد طولانی، مصرف انرژی پایین و صرفه‌جویی در هزینه، کاربرد بیشتری دارند. فناوری‌های رایج در ارتباطات بی‌سیم شامل موارد زیر هستند:

وای فای^۶، بلوتوث^۷، زیگبی^۸: برای کاربردهای نزدیک در گلخانه‌ها یا مزارع کوچک مناسب هستند. این روش‌ها دسترسی آسان دارند اما برد انتقال آن‌ها کوتاه است (گیلن و همکاران، ۲۰۲۱b). بنابراین، برای محیط‌های کوچک کاربرد دارند.

لورا^۹، سیگفاکس^{۱۰} و غیره: این پروتکل‌ها برای محیط‌های

1. Jelowicki
2. Mao
3. Liu
4. Wired Communication
5. Wireless Communication
6. Wi-Fi
7. Bluetooth
8. Zigbee
9. LoRa
10. Sigfox
11. Saqib

در مزرعه یا باغ عبارت‌اند از: ارتفاع از سطح زمین، جهت شیب، بادخیزبودن/نبودن منطقه، رطوبت، رنگ و بافت خاک، رقم گیاه، تاریخ کاشت، موانع فیزیکی در اطراف مزرعه/باغ، وضعیت تغذیه و آبیاری، وجود آفات و بیماری‌ها، شخم زدن/نزدن زیر درخت، وجود گیاهان پوششی، وجود بادشکن در اطراف مزرعه/باغ. بنابراین، احتمال بروز سرمازدگی و شدت خسارت از منطقه‌ای به منطقه دیگر کاملاً متفاوت است. از این رو، سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سرمازدگی، به‌ویژه سرمازدگی تابشی بهاره، باید محلی باشد و استفاده از پیش‌بینی‌های کلی به‌هیچ وجه دقیق نبوده و توصیه نمی‌شود؛

- پیش‌بینی زمان پایان سرمازدگی نیز بسیار مهم است. بیشتر پژوهش‌ها، شروع زمان سرمازدگی را پیش‌بینی می‌کنند؛ درحالی‌که اطلاع از پایان زمان سرمازدگی، برای خاموش کردن به‌موقع تجهیزات حفاظتی به دلایل اقتصادی و فنی، نیز اهمیت زیادی دارد. اگر تجهیزات زودتر از موعد خاموش شوند، سرما می‌تواند به محصول خسارت بزند؛

- تهیه تصاویر طیفی از سطح مزرعه/باغ با استفاده از پهپاد و برای تعیین نقشه حرارتی مزرعه/باغ و مکان‌یابی برای استقرار هدفمند تجهیزات حفاظتی (از نظر تعیین تعداد تجهیزات موردنیاز و چیدمان استقرار آنها) می‌تواند بسیار مفید باشد.

منابع

امیدمهر، ز. ۱۳۹۷. بررسی اثر دستگاه‌های مبارزه با سرمازدگی بر خسارت سرمای بهاره باغ‌های زردآلو. گزارش علمی-فنی. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۴۸ صفحه.

باقری، ن. ۱۳۹۹. اینترنت اشیا و کاربردهای آن در کشاورزی. علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی. دوره سوم. بهار ۱۳۹۹.

باقری، ن. ۱۴۰۰. روش‌ها و سامانه‌های حفاظت از محصولات کشاورزی در برابر سرمازدگی. دستنامه. معاونت ترویج، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

با پیش‌بینی سرمازدگی (مانند اینترنت اشیا و سامانه‌های سایر-فیزیکی) را بررسی کرده است. همچنین، روش‌های غیرمخرب نوین سنجش‌ازدور برای پایش محصول و برآورد مقدار خسارت معرفی شده است. مزایا و محدودیت‌های هر فناوری نیز بررسی شده است. نتایج کلی و توصیه‌های این مطالعه به شرح زیر است:

- یافته‌های پژوهش‌های اجراشده نشان می‌دهند که در سال‌های اخیر تحقیقات در زمینه پیش‌بینی و پایش سرمازدگی رشد قابل توجهی داشته و روش‌ها و فناوری‌های کاربردی نیز در این موضوع معرفی شده است. همچنین، کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی در حال رشد بوده و زمینه مناسبی را برای افزایش دانش و ظهور فناوری‌های کاربردی فراهم کرده است. بدیهی است، پایه پیش‌بینی‌ها، دسترسی به داده‌های به‌روز و قابل اعتماد است و فناوری‌های محلی مجهز به اینترنت اشیا و سایر-فیزیکی می‌توانند داده‌های زیادی را تولید کنند تا دقت برآوردهای هوش مصنوعی بیشتر شود. داده‌های بیشتر، باعث آموزش بهتر شبکه شده و موجب می‌شود الگوهای حاصل توانایی تعمیم به شرایط دیگر را داشته باشند؛

- کنترل فعال سرمازدگی یک زنجیره است و به مدیریت جامع سرمازدگی نیاز دارد. باید سامانه یکپارچه‌ای طراحی شود تا پیش‌بینی، پایش، حفاظت و ارزیابی مقدار خسارت در قالب این سامانه یکپارچه انجام شود. همچنین، این سامانه باید بتواند پس از صحت سنجی مقدار خسارت، نواقص پیش‌بینی و برآورد را تشخیص داده و برای دوره بعد رفع کند. چنین سامانه‌ای با تکمیل پایگاه داده‌ها پس از چند سال داده‌برداری، به ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی و مهار سرمازدگی تبدیل می‌شود؛

- پیش‌بینی دقیق سرمازدگی می‌تواند زمان آغاز و پایان فعالیت خودکار تجهیزات حفاظتی را مشخص کند. این فرآیند میزان خسارت را کاهش داده و از مصرف انرژی و استهلاک دستگاه‌ها می‌کاهد؛

- ازجمله عوامل تأثیرگذار بر سرمازدگی و شدت خسارت

- Chevalier, R.F., Hoogenboom, G., McClendon, R.W., Paz, J.A., 2020. Support vector regression with reduced training sets for air temperature prediction: a comparison with artificial neural networks. *Neural Comput. & Applic.* 20, 151–159.
- Crimp, S.J., Zheng, B., Khimashia, N., Gobbett, D.L., Chapman, S., Howden, M., Nicholls, N., 2016. Recent changes in southern Australian frost occurrence: implications for wheat production risk. *Crop Pasture Sci.* 67 (8), 801–811.
- Diedrichs, A.L., Bromberg, F., Dujovne, D., Brun-Laguna, K., Watteyne, T., 2018. Prediction of frost events using machine learning and IoT sensing devices. *IEEE Internet Things J.* 5 (6), 4589–4597.
- Ding, L., Tamura, Y., Noborio, K., Shibuya, K., 2021. Frost forecast-a practice of machine learning from data. *Int. J. Reason. Based Intell. Syst.* 13 (4), 191–203.
- Diniz, E.S., Lorenzon, A.S., de Castro, N.L.M., Marcatti, G.E., dos Santos, O.P., de Deus Junior, J.C., Amaral, C.H., 2021. Forecasting frost risk in forest plantations by the combination of spatial data and machine learning algorithms. *Agric. for. Meteorol.* 306, 108450.
- Fraisse, C. W., Breuer, N. E., Zierden, D., Bellow, J. D., Paz, J., Cabrera, V. E., Garcia, A., Garcia, Y., Ingram, K. T., Hatch, U., Hoogenboom, G., Jones, J. W., O'Brien, J.J. 2006. AgClimate: A climate forecast information system for agricultural risk management in the southeastern USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 53: 13–27.
- Guillen, N.M.A., Pereniguez-Garcia, F., Martinez-Espana, R., 2017. In: IoT-Based System to Forecast Crop Frost. *IEEE*, pp. 28–35.
- Guillen, N., Martinez-Espana, M.A., Llanes, R., Bueno-Crespo, A., Cecilia, A., 2020a. A deep learning model to predict lower temperatures in agriculture. *J. Ambient Intell. Smart Environ.* 12 (1), 21–34.
- Guillen, N.M.A., Martinez-Espana, R., Bueno-Crespo, A., Morales-García, J., Ayuso, B., Cecilia, J.M., 2020b. A decision support system for water optimization in anti-frost techniques by sprinklers. *Sensors* 20 (24), 7129.
- Guillen, N.M.A., Martinez-Espana, R., Lopez, B., Cecilia, J.M., 2021. A high performance IoT solution to reduce frost damages in stone fruits. *Concurr. Comput. Pract. Exp.* 33 (2), e5299.
- Goswami, J; Sharma, V; Choudhury, B; Raju, P. 2019. Rapid identification of abiotic stress (frost) in in-field maize crop using UAV. *Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens.*
- رحیمی، م. ۱۳۹۱. *محافظت از یخبندان در کشاورزی*. جلد اول. چاپ اول. نشر دانشگاه سمنان.
- Aghelpour, P., Mohammadi, B., Biazar, S.M., 2019. Long-term monthly average temperature forecasting in some climate types of Iran, using the models SARIMA, SVR, and SVR-FA. *Theor. Appl. Climatol.* 138 (3–4), 1471–1480.
- Awtoniuk, M., Nowakowski, T., Chlebowski, J., Swietochowski, A., Dabrowska, M., Klonowski, J., Bak, K. 2021. Internet of Things as an element of the frost protection system in orchards. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2130, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- Bagheri, N., Bagheri, M., Sepahvand, M. 2023. Design, Construction, and Evaluation of an Intelligent Frost Forecasting and Warning System. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 2(2), 47–55.
- Bal, S.K., Dhakar, R., Kumar, P.V., Mishra, A., Pramod, V.P., Chandran, M.S., Prasad, R., 2021. Temporal trends in frost occurrence and their prediction models using multivariate statistical techniques for two diverse locations of Northern India. *Theor. Appl. Climatol.* 146, 1097–1110.
- Brun, L.K., Diedrichs, A.L., Chaar, J.E., Dujovne, D., Taffernaberry, J.C., Mercado, G., Watteyne, T., 2016. In: A Demo of the PEACH IoT-Based Frost Event Prediction System for Precision Agriculture. *IEEE*, pp. 1–3.
- Cadenas, J.M., Garrido, M.C., Martinez-Espana, R., Guillen-Navarro, M.A., 2020. Making decisions for frost prediction in agricultural crops in a soft computing framework. *Comput. Electron. Agric.* 175, 105587.
- Cadenas, J.M., Garrido, M.C., Martinez-Espana, R., 2021. In: A Methodology for More Sustainable Agriculture through Early Crop Frost Forecasting. Atlantis Press, pp. 195–202.
- Cambra, C., Sendra, S., Lloret, J., Lacuesta, R., 2018. Smart system for bicarbonate control in irrigation for hydroponic precision farming. *Sensors* 18 (5), 1333.
- Castaneda, M.A., Castano, V.M., 2017. Smart frost control in greenhouses by neural networks models. *Comput. Electron. Agric.* 137, 102–114.
- Castaneda-Miranda, A., Castano-Meneses, V.M., 2020a. Smart frost measurement for antidisaster intelligent control in greenhouses via embedding IoT and hybrid AI methods. *Measurement* 164, 108043.
- Castaneda, M.A., Castano, M.V.M., 2020b. Internet of things for smart farming and frost intelligent control in greenhouses. *Comput. Electron. Agric.* 176, 105614.

- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F., 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express* 5 (1), 1–7.
- Mendez, J.M., Dasig, D.D., 2020. Frost Prediction in Highland Crops Management Using IoT-Enabled System and Multiple Regression. *Internet of Things and Analytics for Agriculture*, Volume 2, 261–288. Springer.
- Reinsdorf, E., Koch, H.J., 2013. Modeling crown temperature of winter sugar beet and its application in risk assessment for frost killing in Central Europe. *Agric. For. Meteorol.* 182, 21–30.
- Robinson, C., Mort, N., 1997. A neural network system for the protection of citrus crops from frost damage. *Comput. Electron. Agric.* 16 (3), 177–187.
- Rodrigo, J., 2000. Spring frosts in deciduous fruit trees—morphological damage and flower hardiness. *Sci. Hortic.* 85 (3), 155–173.
- Roshan, S.H., Kazemitabar, J., Kheradmandian, G., 2022. Artificial intelligence aided agricultural sensors for plant frostbite protection. *Appl. Artif. Intell.* 36 (1), 2031814.
- Saqib, M., Almohamad, T.A., Mehmood, R.M., 2020. A low-cost information monitoring system for smart farming applications. *Sensors* 20 (8), 2367.
- Shank, D.B., McClendon, R.W., Paz, J., Hoogenboom, G., 2008. Ensemble artificial neural networks for prediction of dew point temperature. *Appl. Artif. Intell.* 22 (6), 523–542.
- Smith, A.B., 2018. US billion-dollar weather and climate disasters: a historic year in context. NOAA, Jan, 8, 2018.
- Song, H., Hu, Y., Lu, Y., Wang, J., Pan, Q., Li, P., 2021. A review of methods and techniques for detecting frost on plant surfaces. *Agriculture*, 11, 1142. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111142>.
- Talsma, C.J., Solander, K.C., Mudunuru, M.K., Crawford, B., Powell, M.R., 2023. Frost prediction using machine learning and deep neural network models. *Front. Artif.*
- Mao, Y., Li, H., Wang, Y., Wang, H., Shen, J., Xu, Y., Ding, S., Wang, H., Ding, Z., Fan, K., 2023. Rapid monitoring of tea plants under cold stress based on UAV multi-sensor data. *Comput. Electron. Agric.* 213, 108176.
- Meenal, R., Binu, D., Ramya, K.C., Michael, P.A., Vinoth Kumar, K., Rajasekaran, E., Sangeetha, B., 2022. Weather forecasting for renewable energy system: a review. *Arch. Comput. Meth. Eng.* 29 (5), 2875–2891.
- Spat. Inf. Sci.* XLII-3/W6, 467–471.
- Herabad, M.G., Afshar, N.P., 2022. In: Fuzzy-Based Deep Reinforcement Learning for Frost Forecasting in IoT Edge-Enabled Agriculture. *IEEE*, pp. 1–5.
- Hua, W., Heinemann, P., Long, H., 2024. Heat transfer modeling with fixed and mobile heaters for frost protection in apple orchards. *Comput. Electron. Agric.* 227, 109525.
- Hua, W., Heinemann, P., He, L., 2025. Frost management in agriculture with advanced sensing, modeling, and artificial intelligent technologies: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 231, 110027.
- Jelowicki, L., Sosnowicz, K., Ostrowski, W., Osinska-Skotak, K., Bakula, K., 2020. Evaluation of rapeseed winter crop damage using UAV-based multispectral imagery. *Remote Sens.* 12 (16), 2618.
- Kareem, S., Hamad, Z.J., Askar, S., 2021. An evaluation of CNN and ANN in prediction weather forecasting: a review. *Environ. Technol. Innov.* 3 (2), 148–159.
- Landi, A., Piaggi, P., Laurino, M., Menicucci, D., 2010. In: Artificial Neural Networks for Nonlinear Regression and Classification. *IEEE*, pp. 115–120.
- Latif, R.M.A., Belhaouari, S.B., Saeed, S., Imran, L.B., Sadiq, M., Farhan, M., 2020. Integration of google play content and frost prediction using CNN: scalable IoT framework for big data. *IEEE Access* 8, 6890–6900.
- Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and regression by random Forest. *R News* 2 (3), 18–22.
- Liu, Y., Ban, S., Wei, S., Li, L., Tian, M., Hu, D., Liu, W., Yuan, T., 2024. Estimating the frost damage index in lettuce using UAV-based RGB and multispectral images. *Front. Plant Sci.* 14, 1242948.
- Lou, W., Zhao, Y., Huang, X., Zhu, T., Yang, M., Deng, S., Chen, S., 2023. Frost risk assessment based on the frost-induced injury rate of tea buds: a case study of the Yuezhou Longjing tea production area. *China. Eur. J. Agron.* 147, 126839.
- Mao, Y., Li, H., Wang, Y., Wang, H., Shen, J., Xu, Y., Ding, S., Wang, H., Ding, Z., Fan, K., 2023. Rapid monitoring of tea plants under cold stress based on UAV multi-sensor data. *Comput. Electron. Agric.* 213, 108176.
- Meenal, R., Binu, D., Ramya, K.C., Michael, P.A., Vinoth Kumar, K., Rajasekaran, E., Sangeetha, B., 2022. Weather forecasting for renewable energy system: a review. *Arch. Comput. Meth. Eng.* 29 (5), 2875–2891.

- domain generalization. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 35 (8), 8052–8072.
- Yue, J., Lei, T., Li, C., Zhu, J., 2012. The application of unmanned aerial vehicle remote sensing in quickly monitoring crop pests. *Intell. Autom. Soft Comput.* 18 (8), 1043–1052.
- Zhou, I., Lipman, J., Abolhasan, M., Shariati, N., 2022. Minute-wise frost prediction: an approach of recurrent neural networks. *Array* 14, 100158.
- Zhou, I., Lipman, J., Abolhasan, M., Shariati, N., 2023. Intelligent spatial interpolation-based frost prediction methodology using artificial neural networks with limited local data. *Environ. Model. Soft.* 165, 105724.
- Zohner, C.M., Mo, L., Renner, S.S., Svenning, J.C., Vitasse, Y., Benito, B.M., Crowther, T. W., 2020. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117 (22), 12192–12200.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F., 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express* 5 (1), 1–7.
- Mendez, J.M., Dasig, D.D., 2020. Frost Prediction in Highland Crops Management Using IoT-Enabled System and Multiple Regression. *Internet of Things and Analytics for Agriculture*, Volume 2, 261–288. Springer.
- Reinsdorf, E., Koch, H.J., 2013. Modeling crown temperature of winter sugar beet and its application in risk assessment for frost killing in Central Europe. *Agric. For. Meteorol.* 182, 21–30.
- Robinson, C., Mort, N., 1997. A neural network system for the protection of citrus crops from frost damage. *Comput. Electron. Agric.* 16 (3), 177–187.
- Rodrigo, J., 2000. Spring frosts in deciduous fruit trees—morphological damage and flower hardiness. *Sci. Hortic.* 85 (3), 155–173.
- Roshan, S.H., Kazemitabar, J., Kheradmandian, G., 2022. Artificial intelligence aided agricultural sensors for plant frostbite protection. *Appl. Artif. Intell.* 36 (1), 2031814.
- Saqib, M., Almohamad, T.A., Mehmood, R.M., 2020. A low-cost information monitoring system for smart farming applications. *Sensors* 20 (8), 2367.
- Shank, D.B., McClendon, R.W., Paz, J., Hoogenboom, G., 2008. Ensemble artificial neural networks for prediction of dew point temperature. *Appl. Artif. Intell.* 22 (6), 523–542.
- Smith, A.B., 2018. US billion-dollar weather and climate disasters: a historic year in context. *NOAA*, Jan, 8, 2018.
- Song, H., Hu, Y., Lu, Y., Wang, J., Pan, Q., Li, P. 2021. A review of methods and techniques for detecting frost on plant surfaces. *Agriculture*, 11, 1142. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111142>.
- Talsma, C.J., Solander, K.C., Mudunuru, M.K., Crawford, B., Powell, M.R., 2023. Frost prediction using machine learning and deep neural network models. *Front. Artif. Intell.* 5, 963781.
- Tomkowicz, M.A., Schmitt, A.O., 2019. Frost prediction in apple orchards based upon time series models. *Data Analysis and Applications 1: Clustering and Regression. Modeling-estimating, Forecasting and Data Mining* 2, 181–194.
- Wang, J., Lan, C., Liu, C., Ouyang, Y., Qin, T., Lu, W., Yu, P., 2022. Generalizing to unseen domains: a survey on

New technologies for frost forecasting, monitoring and warning

Nikrooz Bagheri

Scientific Board, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: n.bagheri@areeo.ac.ir

Abstract

Frost is a serious threat to food security worldwide, including in Iran. Every year, significant damage is caused by frost, especially radiation frost, to agricultural products. Monitoring crops and timely forecasting of frost events can be highly beneficial for farmers in reducing frost-related damage. Due to the specific characteristics of radiation frost and its dependence on topographical, climatic, and crop conditions, traditional models have limited predictive capabilities. In recent years, the development of artificial intelligence, the Internet of Things, and cyber-physical systems has provided a promising basis for frost forecasting. Additionally, the use of remote sensing technology has improved monitoring and estimating the extent and severity of frost damage. This paper introduces new technologies for frost forecasting and crop monitoring. The application of intelligent local systems for radiation frost prediction, as well as the use of unmanned aerial vehicle for identification of frost regions for the systematic deployment of protective equipment, is recommended.

Keywords: *Artificial Intelligence, Cyber-physical Systems, Frost Forecasting, Internet of Things, Machine Learning, Remote Sensing.*