



Original Article

Development and evaluation of an Internet of Things-based smart system for apple codling moth forecasting in the orchard using a Wireless Sensor Network

Bahareh Jamshidi^{1*}, Kazem Mohammadpour², Hossein Farazmand²

1- Smart Agricultural Research department, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2- Agricultural Entomology Research Department, Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Keywords:

Apple codling moth,
Hour-degree Celsius
forecasting model,
IoT,
LoRa protocol,
Smart agriculture,
WSN

ABSTRACT

Introduction

The apple codling moth, *Cydia pomonella* (Lep.: Tortricidae), is one of the key pests of the apple trees. This pest attacks apple trees in significant numbers every year, causing damage that always exceeds the level of economic loss. Therefore, apple codling moth forecasting is very important to determine the most appropriate time for spraying to control the pest, which plays a major role in apple orchard management. Using modern and smart methods for pest forecasting is very important to succeed in chemical control and reducing the number of spraying times in the orchard. Internet of Things (IoT) technology and its smart solutions, based on the basic principles of sensor networks, can enable smart environments and data-based decision-making. In this research, a smart system based on the Internet of Things and a Wireless Sensor Network (WSN) technologies was developed for forecasting of the apple codling moth in the orchard. The effectiveness of using the designed system was also investigated in an apple orchard located in Tehran province (Damavand County).

Materials and Methods

A wireless sensor node was used to collect on-line data of the ambient temperature in the orchard. The data was transported to the gateway through LoRa radio protocol, a long-range and low-power protocol for the Internet of Things. They were sent from the gateway to the network server and then made available to the software designed for the system. The main heart of the software for decision-making was the apple codling moth forecasting model, which was determined based on the hour-degree Celsius. For this purpose, the biofix of apple codling moth pest was determined using pheromone traps and the ambient temperature was recorded hourly using the wireless sensor node installed in the orchard to calculate the total effective environmental temperature. Based on the temperature data and using a phenological forecasting model, the most appropriate spraying time for controlling the apple codling moth was determined and included in the designed software of the system. A dashboard was also designed to display the results. The efficiency of the designed smart system and its forecasting model for controlling apple codling moth pest in the orchard was evaluated over two years.

Received:

July 11, 2025

Revised:

September 8, 2025

Accepted:

September 8, 2025

* Corresponding Author:

b.jamshidi@areeo.ac.ir

How to cite:

Jamshidi, B., Mohammadpur, K. and Farazmand, H. (2025). *Development and Evaluation of an Internet of Things-Based Smart System for Apple Codling Moth Forecasting in the Orchard Using a Wireless Sensor Network*. Journal of Agricultural Mechanization, 10 (3):17-30. <https://doi.org/10.22034/jam.2025.68086.1333>.



Results and Discussion

The Internet of Things-based smart system designed for apple codling moth forecasting pest in the orchard could announce the appropriate time for spraying, along with the type and dosage of the pesticide. This smart system has excellent reliability in data transmission with zero data loss and has excellent accuracy (100%) in terms of timely warning announcements. Evaluations showed that the designed system reduces the damage caused by the apple codling moth pest by reducing the number of spraying times from four to two, which will increase the yield and improve the quality of the product. The results of the two-year investigation indicated that the damage caused by the apple codling moth pest at the harvest time in the control trees was more than 70% greater than in trees that were sprayed based on the forecasting model of the designed system. This is even though according to the orchard manager's statements, the average number of spraying times in previous years, based on predictions made with pheromone traps, has been four, and the damage caused by the codling moth has exceeded the amount estimated in this research. Spraying times for controlling the apple codling moth was reduced to twice a year in the orchard by using the smart system developed based on the hour-degree Celsius forecasting model.

Conclusion

Given the high efficiency of the smart system designed based on the determined forecasting model in controlling the apple codling moth pest and reducing the use and costs of pesticides by 50%, and consequently a 50% reduction in labor costs and pesticide spraying equipment required for each time of spraying in the orchard, the use of this Internet of Things-based system is recommended for forecasting of this pest in apple orchards. Reducing the risk of contamination for the workers who spray pesticides and reducing the amount of pesticide residue in the product are indirect positive effects of using the designed smart system. Future work in the continuation of this research is to pay attention to making the biofix determination process smarter by developing smart traps that can be connected to the system's Wireless Sensor Network.

Acknowledgment

We would like to thank Future Wave Ultratech Company for the cooperation and providing the necessary equipment and infrastructure to conduct this research. We are also grateful to the manager of the apple orchard for his cooperation.



توسعه و ارزیابی سامانه هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء برای پیش‌آگاهی آفت کرم سیب در باغ با استفاده از شبکه حسگر بی‌سیم

بهاره جمشیدی^{۱*}، کاظم محمدپور^۲، حسین فرازمند^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

۱- بخش تحقیقات هوشمندسازی کشاورزی - موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی - سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی - کرج - ایران

۲- بخش تحقیقات حشره‌شناسی کشاورزی - موسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور - سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی - تهران - ایران

E-mail: b.jamshidi@areeo.ac.ir

* نویسنده مسئول

چکیده

آفت کرم سیب یکی از آفات کلیدی درختان سیب و بسیار خسارت‌زا است. از این رو، پیش‌آگاهی این آفت با هدف تعیین و اعلام مناسب‌ترین زمان سم‌پاشی به باغداران برای کنترل آفت که نقش مهمی در مدیریت باغ سیب دارد، بسیار بااهمیت است. در این پژوهش، سامانه‌ای هوشمند برپایه اینترنت اشیاء و شبکه حسگر بی‌سیم برای پیش‌آگاهی آفت کرم سیب توسعه یافت و اثربخشی آن در یک باغ سیب واقع در استان تهران (شهرستان دماوند) بررسی شد. حسگر بی‌سیم برای جمع‌آوری داده‌های برخط دمای محیط در باغ و پروتکل رادیویی لورا برای انتقال داده‌ها به گیت‌وی استفاده شد. داده‌ها از گیت‌وی به سرور شبکه ارسال می‌شد و در اختیار نرم‌افزار طراحی‌شده سامانه قرار می‌گرفت. قلب اصلی نرم‌افزار، مدل پیش‌آگاهی آفت کرم سیب بود که براساس ساعت-درجه سلسیوس تعیین شد. یک داشبورد هم برای نمایش نتایج طراحی شد. سامانه هوشمند طراحی‌شده می‌توانست زمان مناسب سم‌پاشی را به همراه نوع و دوز سم به باغدار اعلام و توصیه کند. ارزیابی‌ها نشان داد که سامانه طراحی‌شده با کاهش تعداد نوبت‌های سم‌پاشی از چهار به دو نوبت، خسارت ناشی از آفت کرم سیب را کاهش می‌دهد که افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول را در پی خواهد داشت. نتایج بررسی‌ها طی دو سال نشان داد که خسارت آفت کرم سیب در زمان برداشت محصول در درختان شاهد بیش از ۷۰ درصد بیش از درختانی بود که بر اساس مدل پیش‌آگاهی سامانه طراحی‌شده سم‌پاشی شدند. بنابراین، کاربرد سامانه هوشمند طراحی‌شده بر پایه مدل پیش‌آگاهی تعیین‌شده با توجه به کارایی بالای آن در کنترل آفت کرم سیب و کاهش ۵۰ درصدی در کل هزینه‌های عملیات مرتبط با سم‌پاشی به‌منظور پیش‌آگاهی این آفت در باغ‌های سیب توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: اینترنت اشیاء، آفت کرم سیب، پروتکل لورا، شبکه حسگر بی‌سیم، کشاورزی هوشمند، مدل پیش‌آگاهی ساعت-درجه سلسیوس.

۱- مقدمه

به مجموعه‌ای از حسگرها، محرک‌ها و دستگاه‌هایی که به‌منظور جمع‌آوری و به‌اشتراک‌گذاری داده از طریق اینترنت به یک شبکه ارتباطی متصل می‌شوند و قابل کنترل یا برقراری ارتباط از راه دور هستند، اینترنت اشیا^۱ (IoT) گفته می‌شود. این فناوری و راه‌حل‌های هوشمند آن براساس اصول پایه شبکه حسگر^۲ می‌تواند امکان هوشمندسازی محیط و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم کند. اینترنت اشیا در کشاورزی امکان ادغام داده‌های کشاورزی مختلف را از طریق یک پلتفرم یکپارچه فراهم می‌کند. پلتفرم اینترنت اشیا کشاورزی می‌تواند داده‌ها را به‌صورت لحظه‌ای جمع‌آوری، پردازش و ادغام کند. بنابراین، اینترنت اشیا از اجزای اصلی کشاورزی هوشمند^۳ (SA) و بستر ساز توسعه آن شده است. در سال‌های اخیر، کاربرد کشاورزی هوشمند برپایه اینترنت اشیا^۴ در حوزه‌های مختلف کشاورزی از جمله باغبانی رو به گسترش است. افزایش کمی و کیفی تولیدات کشاورزی، سودآوری و کاهش هزینه‌های تولید، کاهش نیاز به نیروی انسانی برای انجام عملیات کشاورزی و کاهش زمان انجام عملیات، حفاظت از منابع پایه و استفاده بهینه از آن‌ها، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش مصرف انرژی، بهبود بهره‌وری کشاورزی، و تولید پایدار، برخی از این مزایای کاربرد اینترنت اشیا در کشاورزی هستند که دستیابی به اهداف توسعه پایدار کشاورزی را تسهیل می‌کند (Feng et al., 2012; Khanna & Kaur, 2019; Jamshidi and Dehghanisani, 2020; Mowla et al., 2023; Jamshidi and Khabbaz Jolfae, 2024; Song et al., 2024; Subhrajit et al., 2024).

به دلیل مزایای اینترنت اشیا در کشاورزی، ارائه راه‌حل‌های هوشمند این فناوری مبتنی بر شبکه حسگر بی‌سیم^۵ (WSN) با هدف مدیریت باغ‌های میوه در سال‌های اخیر گسترش یافته است (Jamshidi et al., 2025; Magsino, 2019; Wang et al., 2019; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2023; Zhang et al., 2025).

یک سامانه هوشمند مانیتورینگ شرایط محیطی با استفاده از اینترنت اشیا برپایه شبکه حسگر بی‌سیم در یک ایستگاه پژوهشی کاکائو در اندونزی و با هدف کمک به کشاورز برای بهبود تولید کاکائو و رویارویی با چالش تغییر اقلیم طراحی و پیاده‌سازی شد. در این سامانه، داده‌های محیطی جمع‌آوری شده از تجارب مزرعه‌ای و آزمایشگاهی در قالب دانش ساده به کشاورز منتقل می‌شود. به‌منظور سازگاری با تغییر اقلیم، از ترکیب اندازه‌گیری‌های بلندرنج عوامل محیطی با مشاهدات علمی و جمع‌آوری دستی داده از درختانی که به تگ‌های ارتباطات میدانی نزدیک^۶ (NFC) مجهز شده بودند، در فعالیتهای محلی تولید کاکائو بهره گرفته شد. حسگرهای مورد استفاده در این سامانه شامل

حسگرهای اندازه‌گیری دما، رطوبت نسبی، پتانسیل آبی خاک، هدایت الکتریکی (EC) خاک و غیره بودند و برای مدیریت تمامی فعالیت‌های دیجیتال یک داشبورد^۸ طراحی شد که به مدیران داخل ایستگاه اجازه انتقال مجموعه داده به کارکنان مزرعه را می‌دهد و پژوهشگران داخل و خارج ایستگاه نیز اجازه دسترسی و مشاهده داده‌های محیطی، حسگرها و تگ‌ها را دارند (Libelium, 2015).

در یک باغ موز واقع در کلمبیا، یک سامانه هوشمند مانیتورینگ شرایط محیطی و رشد قطری تنه و میوه درخت موز برپایه اینترنت اشیا مبتنی بر شبکه حسگر بی‌سیم طراحی و پیاده‌سازی شد که هدف آن بهبود بهره‌وری و پایداری کشاورزی بود. حسگرهای مورد استفاده در این سامانه شامل حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت و دمای خاک، دما و رطوبت نسبی هوا، قطر تنه و میوه، تابش خورشید، میزان بارش، و آمونیاک بودند. برای مشاهده اطلاعات نیز یک اپلیکیشن طراحی شد. توسعه این سامانه می‌تواند به مصرف بهینه آب، حفاظت از محصول برابر بیماری‌ها، کاهش مصرف کود، پیش‌بینی زمان مناسب برداشت هم‌چنین رده‌بندی خاک‌ها با توجه به فرهنگ و اقلیم کمک کند (Libelium, 2016a).

یک سامانه هوشمند برپایه اینترنت اشیا مبتنی بر شبکه حسگر بی‌سیم در یک باغ زیتون در ایتالیا به‌منظور مانیتورینگ شرایط آب و هوایی باغ و با هدف کنترل آفت مگس میوه زیتون طراحی و پیاده‌سازی شد. حسگرهای مورد استفاده در این سامانه، اطلاعات دقیقی از برخی پارامترهای مهم شامل دما و رطوبت نسبی هوا، فشار اتمسفری، جهت و سرعت باد، میزان بارش، رطوبت خاک، و رطوبت برگ فراهم می‌کردند. سامانه طراحی شده قادر بود براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از حسگرها و اطلاعات مربوط به تله‌های چسبی نصب‌شده در باغ و حشرات بالغ به دام‌افتاده آفت مگس میوه زیتون و سایر اطلاعات مربوط به گسترش آفت، هشدارهای به‌موقع برای کنترل آفت اعلام و از بروز خسارت به محصول جلوگیری کند. آفت مگس میوه زیتون روی اسیدپته روغن زیتون و کیفیت آن تاثیرگذار است. بنابراین، با کنترل به‌موقع آفت به کمک این سامانه، کیفیت روغن زیتون و قیمت خرده‌فروشی آن نیز افزایش می‌یابد (Libelium, 2016b).

طی پژوهشی، یک سامانه هوشمند مانیتورینگ برپایه اینترنت اشیا و شبکه حسگر بی‌سیم برای جمع‌آوری و انتقال اطلاعات محیطی مربوط به تولید سبزیجات یا میوه‌های سالم و مغذی در باغ پیشنهاد شد. حسگرهای مورد استفاده در این سامانه اطلاعات مهم باغ شامل مواد مغذی خاک، مقدار نور خورشید، رطوبت خاک، دما و رطوبت نسبی هوا را جمع‌آوری می‌کردند. این سامانه قادر بود اقدامات کاراندازی لازم و مناسب را در باغ ایجاد کند. کاراندازهای مورد استفاده

5- Wireless Sensor Network

6- Tag

7- Near-field Communications

8- Dashboard

1- Internet of Things

2- Sensor Network

3- Smart Agriculture

4- IoT-based Smart Agriculture

شامل آبپاش‌ها برای آبیاری و کوددهی روزانه، و سایه‌بان متحرک سقف و/یا سایه‌بان و چراغ‌ها برای کنترل روشنایی بودند (Magsino, 2019).

پژوهشگران دیگری یک سامانه هوشمند آبیاری برپایه اینترنت اشیا توسعه دادند که در آن از حسگرهای جمع‌آوری رطوبت خاک و اطلاعات هواشناسی در زمان-واقعی^۱ در باغ و همچنین ادغام دوره رشد محصول و خواص خاک قطعات زمین استفاده شد. یک اپلیکیشن تلفن همراه برای بصری‌سازی داده‌ها و امکان کنترل دقیق و از راه دور شیرهای برقی برای آبیاری طراحی شد (Zhang et al., 2025).

این پژوهش، بخشی از پروژه پیلوتی است که در آن یک سامانه هوشمند برپایه اینترنت اشیا مبتنی بر شبکه حسگر بی‌سیم در باغ سیب واقع در شهرستان دماوند استان تهران و به‌منظور مانیتورینگ و مدیریت چالش‌های مهم باغ شامل پیش‌آگاهی بیماری و آفت، مدیریت آبیاری، مدیریت تغذیه و مانیتورینگ رشد میوه طراحی و پیاده‌سازی شد. این مقاله فقط به بحث طراحی سامانه برای پیش‌آگاهی آفت کرم سیب^{۱۰} *Cydia pomonella* (Lep.: Tortricidae) می‌پردازد و نتایج ارزیابی و اثربخشی سامانه در این خصوص را ارائه می‌کند.

یکی از مخرب‌ترین آفات درختان میوه از جمله درخت سیب آفت کرم سیب است. این آفت ابتدا در منطقه اوراسیا^{۱۱} وجود داشت ولی طی دو قرن گذشته در سراسر جهان پراکنده شد. با توجه به کشت تجاری سیب، این آفت به عنوان یکی از خسارت‌زاترین آفات این محصول محسوب می‌شود.

حشره کامل آفت کرم سیب (به‌صورت انفرادی یا در دسته‌های دو تا سه‌تایی) روی نهنگ گلبزرگ یا کاسبرگ تخم‌گذاری می‌کند. تخم‌ها خیلی کوچک هستند و رنگ آن‌ها سفید شنی^{۱۲} است. لاروها پس از خروج از تخم‌ها، ابتدا از برگ‌ها تغذیه می‌کنند و ظرف ۴۸ ساعت خود را به میوه درخت می‌رسانند که بیش‌تر هم‌زمان با مرحله فندقه‌شدن سیب‌های شمیرانی بوده و مناسب‌ترین زمان برای مبارزه شیمیایی با آفت است. لاروها پس از ورود به میوه سیب از گوشت و دانه‌های آن تغذیه می‌کنند. بیش‌تر میوه‌هایی که در مراحل اولیه رشد خود مورد تغذیه آفت قرار می‌گیرند، می‌ریزند و اگر روی درخت باقی بمانند به دلیل وجود فضولات حشره و عوامل فساد مانند قارچ‌ها و باکتری‌ها غیر قابل استفاده می‌شوند. همه مراحل لاروی آفت کرم سیب درون میوه سپری می‌شود و خسارت اصلی را لاروها می‌زنند. زمستان‌گذرانی به‌صورت لارو کامل، داخل پیله‌های سفیدرنگ و ضخیم زیر پوستک تنه درختان است و در بهار لاروها به شفیره تبدیل می‌شوند و با پایان دوره گل‌دهی، شفیرگی نیز پایان می‌یابد و حشرات بالغ ظاهر می‌شوند.

حشره کامل از شبنم و شهد گل‌ها تغذیه می‌کند (Hatami et al., 2011; Azmayesh Fard, 2015).

آفت کرم سیب هر ساله با جمعیتی قابل ملاحظه درختان میوه دانه‌دار مانند سیب را مورد حمله قرار می‌دهد به‌طوری‌که همواره خسارت آن از سطح زیان اقتصادی تجاوز می‌کند. با وجود پژوهش‌های گسترده در مورد استفاده از روش‌های غیر شیمیایی و کنترل تلفیقی در مدیریت این آفت، هنوز هم کاربرد آفت‌کش‌ها به‌عنوان محور اصلی کنترل آفت کرم سیب است و حذف کنترل شیمیایی در باغ‌های سیب ممکن نیست. گزارش‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین مصرف سموم شیمیایی در ایران مربوط به باغ‌های سیب است (Hatami et al., 2011). بنابراین، پیش‌آگاهی آفت کرم سیب با هدف تعیین و اعلام مناسب‌ترین زمان سم‌پاشی به باغداران برای کنترل آن بسیار بااهمیت است و نقش مهمی در مدیریت باغ سیب دارد. پیش‌آگاهی این آفت می‌تواند منجر به کاهش مصرف سموم شیمیایی و آب، و هزینه‌های کنترل آفت شود و با جلوگیری از کاهش تولید به ارتقای عملکرد و کیفیت محصول کمک کند.

با توجه به این‌که با استفاده از مدل‌های پیش‌آگاهی آفت کرم سیب می‌توان زمان ظهور هر یک از مراحل زیستی آفت شامل تخم، لارو، شفیره و حشره کامل را تعیین کرد و براساس آن به باغداران در زمان‌های بیان‌شده، هشدار لازم برای سم‌پاشی ارائه کرد؛ شناسایی عوامل موثر در رشدونمو آفت کرم سیب و استفاده از آن‌ها در مدل‌های پیش‌آگاهی بسیار مهم است. پیش‌آگاهی دقیق آفت، کاهش تعداد نوبت‌های سم‌پاشی و به تبع آن کاهش مصرف سموم شیمیایی را به همراه خواهد داشت. به این ترتیب، کنترل آفت موثرتر، هزینه‌های کنترل کم‌تر و عملکرد محصول بیش‌تر خواهد شد.

در گذشته، برای پیش‌آگاهی آفت کرم سیب استفاده از اندازه قطر میوه معرفی و بررسی شد (Rajabi, 1986). همچنین، استفاده از تله فرمونی^{۱۳} به دلیل تعیین زمان ظهور اولیه حشرات کامل آفت کرم سیب و نیز تعیین اوج حضور آن‌ها از قدیم مورد استفاده قرار گرفته است.

مهم‌ترین عامل محیطی در رشدونمو حشرات و ازجمله آفت کرم سیب، دما است. به عبارت دیگر، نرخ رشد هر یک از مراحل تخم، لارو، شفیره و حشره کامل تابعی از دمای محیط است. نیاز گرمایی هر مرحله رشدی حشره با مجموع نیاز گرمایی روزانه از زمان بیوفیکس^{۱۴} تا ظهور هر مرحله زیستی برابر است.

مقدار رشد هر یک از مراحل زیستی آفت به صورت روز-درجه^{۱۵} یا ساعت-درجه^{۱۶} بیان می‌شود ولی مدل ساعت-درجه دقیق‌تر است و امروزه بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های پیش‌آگاهی وابسته به داده‌های هواشناسی است و براساس سه فاکتور دمای آستانه پایین،

5- Biofix
6- Degree-Day
7- Degree-Hour

1- Real-time
2- Codling Moth
3- Eurasia
4- Pheromone Trap



شکل ۱- باغ سیب انتخاب شده برای اجرای پژوهش
Fig. 1. The apple orchard selected for the research

پوشش باغ انتخاب شده به طور کامل به درختان سیب شامل ترکیبی از ارقام گلدن دلشیز^{۱۷} و رد دلشیز^{۱۸} اختصاص داشت. سن درختان بخشی از باغ که ارزیابی سامانه هوشمند طراحی شده در آن انجام شد، ۲۰ تا ۲۵ ساله و فاصله درختان سیب (در ردیف ها و بین ردیف ها)، ۶ متر از یکدیگر و هرس آن ها فرم مخروطی بود. سیستم آبیاری باغ از نوع تحت فشار قطره ای بود. زمان و تعداد نوبت های سم پاشی برای پیش گیری یا مبارزه با آفت کرم سیب پیش از اجرای پایلوت براساس تجربه باغدار انجام می شد.

۲-۲- معماری اینترنت اشیا

معماری اینترنت اشیا در نظر گرفته شده در این پژوهش از نوع چهار لایه و شامل لایه ادراک^{۱۹}، لایه انتقال^{۲۰}، لایه پردازش^{۲۱}، و لایه کاربرد^{۲۲} بود. لایه ادراک برای دریافت برخط داده های محیطی باغ شامل گره یا نود^{۲۳} حسگر بی سیم دما و رطوبت نسبی هوا THI ساخت شرکت ویراسنسور (Virasensor) بود. به دلیل این که در پروژه اصلی و به منظور مدیریت سایر چالش ها در باغ (مانند کنترل بیماری) پایش مداوم دما و رطوبت نسبی هوا لازم بود، از این نود که مناسب اندازه گیری مستمر دما و رطوبت نسبی هوا است استفاده شد ولی برای پایش آگاهی آفت کرم سیب تنها از داده های دمای اندازه گیری شده توسط نود استفاده شد. قبل از اندازه گیری، حسگر با دمای مرجع کالیبره شد. جدول ۱ مشخصات فنی نود حسگر بی سیم انتخاب شده را نشان می دهد.

داده های محیطی باغ که توسط نود حسگر انتخاب شده اندازه گیری و جمع آوری شدند از طریق پروتکل رادیویی لورا (LoRaWAN) به گیت وی^{۲۴} ارسال و سپس از گیت وی به سرور شبکه فرستاده می شد (لایه انتقال). انتخاب پروتکل رادیویی لورا به این دلیل بود که لورا پلتفرمی دوربرد، کم مصرف و یک پلتفرم عالی بی سیم ویژه اینترنت اشیا است. پوشش رادیویی گیت وی لورا در مناطق باز و حومه شهر به ۱۵ کیلومتر هم می رسد. تجهیزات مبتنی بر پروتکل رادیویی لورا می توانند تا سال ها فقط با یک باتری کار کنند. شبکه لورا به سیگنال ها

دمای آستانه بالا و هم چنین دمای بهینه رشد تعیین می شود. برای به دست آوردن این آستانه پایین رشد هم فرمول های مختلفی وجود دارد که مدل خطی ایکموتو^{۱۶} یکی از مدل های مناسب است (رابطه ۱):

$$DT = k + t_{min}D \quad (1)$$

که در آن، D: طول دوره رشد، T: دمای محیط، k: نیاز گرمایی، و t_{min} : آستانه پایین رشد است.

ساده ترین روش محاسبه نیاز گرمایی، روش مستطیلی است که در آن میانگین دمای بیشینه و کمینه شبانه روز با استفاده از دیتالاگر نصب شده یا حسگرهای دمایی به دست می آید و سپس با کم کردن از آستانه پایین دما، مقدار دمای موثر روزانه محاسبه می شود. ولی همان طور که گفته شد روش ساعت-درجه دقیق تر است و امروزه برای پایش آگاهی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش دمای ۲۴ ساعت هر روز ملاک ارزیابی است.

همان گونه که پیش تر گفته شد در این پژوهش، از راه حل های هوشمند اینترنت اشیا برای پایش آگاهی آفت کرم سیب استفاده شد که می تواند نقش موثرتری در مدیریت باغ های سیب داشته باشد.

۲-۲- مواد و روش ها

۲-۱- محل اجرای پژوهش

محل اجرای پژوهش یک باغ سیب با وسعت حدود ۲۰ هکتار در شرق روستای جابان و حوالی روستای سرپندان در دهستان ابرشیوه از توابع شهرستان دماوند استان تهران بود که وضعیت اقلیمی آن با وضعیت اقلیمی شهرستان دماوند مشابه است. دماوند از نظر مختصات جغرافیایی، بین ۵۱ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و بین ۳۵ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. میانگین بارش سالانه این منطقه کوهستانی که در دامنه جنوبی رشته کوه های البرز مرکزی و در قسمت شمال شرقی استان تهران واقع شده است حدود ۳۸۵ میلی متر بوده و دارای میانگین دمای سالانه ۱۳ درجه سلسیوس، ۱۱۶ روز یخبندان در سال، و اقلیم نیمه خشک سرد است. دماوند رتبه سوم در بین استان های تولیدکننده سیب در کشور را دارد. شکل ۱، نمای باغ سیب انتخاب شده برای اجرای پژوهش را نشان می دهد.

- 5- Processing Layer
- 6- Application Layer
- 7- Node
- 8- Gateway

- 8- Ikemoto
- 1- Golden Delicious
- 2- Red Delicious
- 3- Perception Layer
- 4- Transport Layer

پژوهش تعیین شد، در نرم افزار سامانه مبنای تصمیم گیری قرار گرفت. پردازش ها روی داده ها و تجزیه و تحلیل های مورد نیاز در تلفیق با اطلاعات هواشناسی در نرم افزار سامانه انجام شد (لایه پردازش).

در نهایت برای نمایش بصری نتایج شامل داده های برخط حسگرها، اطلاعات هواشناسی منطقه، هشدارها و توصیه های سم پاشی داشبوردی ایجاد شد (لایه کاربرد). برای مدیریت کامل عملکرد سامانه از پلتفرم مدیریتی اینترنت اشیا طراحی شده توسط شرکت دانش بنیان موج آینده فرافن استفاده شد.

شکل ۲ نمایی از نود حسگر بی سیم دما و رطوبت نسبی هوا و گیت وی نصب شده در باغ را نشان می دهد.

سامانه طراحی شده از نظر قابلیت انتقال داده ها و درصد از دست رفتن داده ها^{۲۸} در جریان انتقال داده از نود حسگر تا سرور با مقایسه تعداد بسته های ارسالی و دریافتی ارزیابی شد.

اجازه می دهد تا حتی در سطوح پایین تر از نویز نیز منتشر و بازیابی شوند. معماری ساختار یک شبکه لورا از دستگاه ها، حسگرها و کارلندازها که اصطلاحاً نودهای انتهایی^{۲۵} یا دستگاه های انتهایی^{۲۶} خوانده می شوند، گیت وی ها، سرور شبکه، و نرم افزار کاربر و اپلیکیشن تشکیل شده است. توپولوژی شبکه لورا به صورت ستاره ای (Star of Stars) است. در این شبکه داده ها به صورت کامل (End-to-End) بین دستگاه های انتهایی و نرم افزار کاربر از طریق رمزگذاری AES ارسال می شود. از این رو، امنیت اطلاعات کاربران نیز تضمین می شود.

گیت وی استفاده شده در این پژوهش، گیت وی لورا (LoRaGateway) ساخت شرکت لاوان پایش ونداد (LPWANDATA) مدل LPWANGatewayRadio شامل یک برد اصلی (LpwanCore Board) با قابلیت اتصال به باتری قابل شارژ بود که از پنل خورشیدی برای شارژ باتری و استفاده همزمان توسط برد اصلی پشتیبانی می کند. همچنین، دارای سامانه موقعیت یاب جهانی^{۲۷} (GPS) است.

اطلاعات از سرور شبکه در اختیار نرم افزاری که برای کاربران طراحی شد، قرار می گیرد. مدل پیش آگاهی آفت کرم سیب که در این

جدول ۱- مشخصات فنی نود حسگر بی سیم انتخاب شده

Table 1. Technical specifications of the selected wireless sensor node

ویژگی ها Specifications	حسگر Sensor
بازه: -۳۵ تا +۷۵ درجه سلسیوس °C -35 to +75 رزولوشن: ۰/۰۱ درجه سلسیوس °C 0.01 Temperature measurement interval: 5 دقیقه ۵ فاصله زمانی اندازه گیری دما: ۵ دقیقه	حسگر دما Temperature sensor
بازه: صفر تا ۱۰۰ درصد 0 to 100% رزولوشن: ۰/۰۴ درصد 0.04% Relative humidity measurement interval: 5 دقیقه ۵ فاصله زمانی اندازه گیری رطوبت نسبی: ۵ دقیقه	حسگر رطوبت نسبی Relative humidity sensor
مدولاسیون: LoRaWAN LoRaWAN فرکانس رادیویی: ۸۶۸ مگاهرتز 868 MHz Distance to Gateway: 1 km ۱ کیلومتر فاصله تا گیت وی: ۱ کیلومتر Signal strength: 18 dbm ۱۸ dbm قدرت سیگنال:	رادیو Radio
ولتاژ: ۳/۶ ولت 3.6V Capacity: 2600mAh ۲۶۰۰ mAh Batter Life: 2 سال ۲ عمر باتری:	باتری Battery
ابعاد خارجی: ۸۸×۵۸×۳۳ میلی متر External dimensions: 88×58×33 mm IP65 کلاس حفاظتی: Protection class: IP65	ابعاد Dimensions



شکل ۲. نصب نود حسگر بی سیم دما و رطوبت نسبی هوا، گیت‌وی و آنتن در باغ

Fig. 2. Wireless temperature and humidity sensor node, gateway and antenna installation in the orchard

جدول ۲- زمان فیزیولوژیک رخداد مراحل مختلف فنولوژیک کرم سیب بر اساس مدل پیش‌آگاهی (Ranjbar Aghdam & Seddighi, 2015)

Table 2. Physiological time of occurrence of different phenological stages of apple codling moth based on the forecasting model (Ranjbar Aghdam & Seddighi, 2015)

نیاز گرمایی (ساعت-درجه سلسیوس) Thermal requirement (Hour- Degree Celsius)	مرحله فنولوژیک Phenological stage	نسل آفت Pest generation
3080±210	اوج پرواز شب‌پرها Moths flight peak	زمستان‌گذران (اول) Overwintering (First)
4570±230	اوج جمعیت تخم‌ها Eggs population peak	
10290±390	اوج جمعیت لاروها Larva population peak	
19080±250	اوج پرواز شب‌پرها Moths flight peak	تابستانی (دوم) Summer (Second)
21560±380	اوج جمعیت تخم‌ها Eggs population peak	
25120±480	اوج جمعیت لاروها Larva population peak	



شکل ۳- یکی از تله‌های فرمونی نصب‌شده در باغ

Fig. 3. One of the pheromone traps installed in the orchard

اندازه‌گیری‌شده از تاریخ رخداد بیوفیکس تا زمان برداشت میوه‌ها در مهرماه بررسی شد. هم‌چنین بررسی ظهور مراحل زیستی حشره طی دو سال انجام شد.

۲-۳-۴-۲- ارزیابی کارایی مدل برای پیش‌بینی زمان سم‌پاشی

۲-۳-۴-۱- پیش‌بینی رخدادهای مهم فنولوژیک

تعیین دقیق زمان ظهور اوج پرواز شب‌پرها، اوج تخم‌گذاری و اوج جمعیت لاروی آفت کرم سیب در هر نسل از مهم‌ترین مراحل زیستی مورد نیاز بود که برای این منظور از مدل پیش‌آگاهی ساعت-درجه سلسیوس کرم سیب استفاده شد. جدول ۲ گرمای موثر ساعتی که برای هر یک از مراحل زیستی در نسل‌های اول و دوم آفت کرم سیب لازم است را نشان می‌دهد. این جدول براساس پژوهش‌های پیشین در حوالی منطقه اجرای این پژوهش (جایان) به‌دست‌آمده است و به دلیل این‌که از نظر ارتفاع از سطح دریا با باغ مورد آزمایش در این پژوهش تفاوتی نداشت، مورد استفاده قرار گرفت. به‌این ترتیب، مقدار گرمای موثر تامین‌شده در هر ساعت برای رشدونمو آفت کرم سیب در محیط باغ با به‌کارگیری داده‌های دمایی که توسط سامانه ثبت می‌شد، محاسبه و بر پایه دمای تجمعی ارائه‌شده در جدول برای هر یک از مراحل فنولوژیک مورد نظر تعیین شد. بر این اساس، آستانه‌های مناسب سم‌پاشی برای اعلام هشدار به باغدار در خصوص کنترل آفت کرم سیب در نرم‌افزار سامانه تعیین شد. برای سم‌پاشی از حشره‌کش استامپی‌پراید^{۲۰} که مورد استفاده باغدار بود با دوز ۰/۵ در هزار استفاده و سم‌پاشی در زمان‌های اعلام‌شده توسط سامانه انجام شد.

۲-۳-۴-۲- نمونه‌برداری از درختان برای تعیین آلودگی به آفت کرم سیب

برای این‌که اثربخشی مدل پیش‌آگاهی پیشنهادی که در سامانه طراحی‌شده مبنای تصمیم‌گیری برای زمان‌های سم‌پاشی و کنترل آفت کرم سیب قرار گرفت، ارزیابی شود، از درختان سیب در باغ نمونه‌برداری و آلودگی آن‌ها به آفت بررسی شد. در هر مرحله نمونه‌برداری، ۱۰ درخت سیب حدود ۲۰ تا ۲۵ ساله (ارقام گلدن دلشیز و رد دلشیز) که براساس مدل پیش‌آگاهی سامانه هوشمند طراحی‌شده سم‌پاشی شده بودند و هم‌چنین درختان شاهد (طبق عرف باغدار) انتخاب شدند. از هر درخت، ۲۰ عدد سیب به صورت تصادفی از نظر آلوده‌بودن یا نبودن به لارو آفت کرم سیب بررسی شد. از سوی دیگر، در زمان برداشت نیز درصد سیب‌های آلوده به آفت کرم سیب که زیر درخت ریخته شده بودند برای ۱۰ درخت سیب تعیین شد.

با توجه به این‌که در درختانی که براساس مدل پیش‌آگاهی سامانه هوشمند طراحی‌شده سم‌پاشی شده بودند نسبت به درختان شاهد (طبق عرف باغدار)، خسارت ناشی از آفت کرم سیب کاهش یافت که نتایج آن در بخش نتایج و بحث ارائه شده است، ارزش ریالی این کاهش

۲-۳-۲- پیش‌آگاهی آفت کرم سیب

به‌منظور تعیین سن فیزیولوژیک آفت کرم سیب در باغ و استفاده در مدل پیش‌آگاهی آفت، برآورد شاخص‌های دمایی رشدونمو جمعیت آفت، تعیین بیوفیکس آفت، و اندازه‌گیری دما مورد توجه قرار گرفت.

۲-۳-۱- شاخص‌های دمایی رشدونمو جمعیت آفت

شاخص‌های دمایی مهم رشدونمو جمعیت آفت کرم سیب در منطقه اجرای پژوهش شامل آستانه پایین دمای رشدونمو (۹/۶ درجه سلسیوس)، نیاز گرمایی (طبق جدول ۲) و آستانه بالای دمای رشدونمو آفت کرم سیب (۳۵ درجه سلسیوس) براساس برآوردهای انجام‌شده در بررسی‌های پیشین (Ranjbar Aghdam & Seddighi, 2015; Ranjbar Aghdam et al., 2021) در نظر گرفته شد.

۲-۳-۲- تعیین بیوفیکس آفت

تعیین زمان ظهور مراحل زیستی آفت در باغ نکته مهمی است که یا باید قبلاً در منطقه مورد نظر براساس پژوهش‌ها به‌دست‌آمده و موجود باشد و یا پس از مشخص‌شدن محل اجرا نسبت به نمونه‌برداری هفتگی تا زمان اوج ظهور هر مرحله اقدام شود و در سال بعد با استفاده از رابطه ۱ و ضرب کردن آن در تعداد روزهای به‌دست‌آمده ظهور آفت، نیاز گرمایی محاسبه شود. تعیین دقیق تاریخ بیوفیکس ظهور حشره کامل برای استفاده در مدل پیش‌آگاهی ضروری بود.

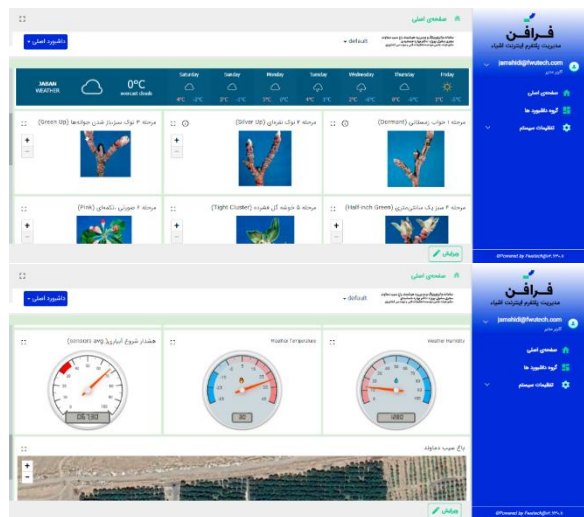
برای این‌که تاریخ دقیق بیوفیکس تعیین شود از ثبت اولین شکارهای پایدار در تله‌های فرمونی از تاریخ شروع گل‌دهی درختان سیب استفاده شد. برای این منظور، سه عدد تله دلتا^{۲۱} در باغ و در ارتفاع میانی کانوپی درختان سیب (۱/۵ تا ۲ متر از سطح زمین) نصب شد (شکل ۳).

فاصله تقریبی تله‌های فرمونی از یک‌دیگر ۱۰۰ متر بود. پس از نصب تله‌ها بازدید به‌صورت روزانه انجام و شکار ثبت شد. پس از شکار اولین پروانه‌ها و در صورت پایداری آن به مدت چند روز، بازدید تله‌ها به‌طور هفتگی انجام شد.

۲-۳-۳- ثبت ساعتی دما

دمای باغ با استفاده از نود حسگر بی‌سیم دما و رطوبت نسبی هوای ویراسنسور که در مرکز باغ در سایه و به‌طور تقریبی در ارتفاع میانی تاج درختان نصب شد، اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که پیش‌تر گفته‌شد، مدل پیش‌آگاهی آفت کرم سیب مورد استفاده در این پژوهش براساس ساعت-درجه سلسیوس بود. بنابراین، اندازه‌گیری دما توسط حسگر به‌صورت ساعتی تنظیم شد به‌گونه‌ای که دماهای اندازه‌گیری‌شده در داشبورد سامانه به‌صورت برخط قابل مشاهده بود. داده‌های دمای

دانشبورد سامانه طراحی شده امکان گزارش گیری از داده های حسگرها و هشدارها هم چنین ارسال هشدارها از طریق ایمیل و پیامک را دارد.



شکل ۴. بخش هایی از داشبورد سامانه هوشمند
Fig. 4. Some parts of the smart system dashboard

۳-۲- اثر بخشی سامانه

جدول ۳ نتایج ارزیابی سامانه هوشمند طراحی شده را از نظر میانگین تعداد لاروهای آفت کرم سیب در درختان سیب کنترل شیمیایی شده طبق مدل پیش آگاهی سامانه در مقایسه با درختان شاهد طی دو سال ارزیابی و به ازای هر درخت نشان می دهد.

مطابق جدول ۳، میانگین تعداد لاروهای آفت کرم سیب در درختان شاهد و کنترل شیمیایی طبق مدل پیش آگاهی سامانه طراحی شده و در سال اول به ترتیب ۱۵ و صفر لارو به ازای هر درخت بود. در سال دوم نیز لاروی در درختان کنترل شده برپایه هشدارهای سامانه هوشمند طراحی شده و مدل پیش آگاهی آن وجود نداشت در حالی که میانگین تعداد لاروهای آفت در درختان شاهد در سال دوم بیش از مقدار آن در سال اول و برابر با ۱۷ به ازای هر درخت بود. این نتایج نشان می دهد که با وجود افزایش آلودگی درختان شاهد به آفت در سال دوم ارزیابی، هشدارهای به موقع سامانه هوشمند طراحی شده توانست از خسارت آفت کرم سیب به میوه درختانی که براساس هشدارها کنترل شیمیایی شدند، کاملاً جلوگیری کند. Ranjbar (2015) و Aghdam & Seddighi در پژوهشی که برای تعیین بهترین زمان سم پاشی برای کنترل شیمیایی آفت کرم سیب با استفاده از مدل پیش آگاهی ساعت-درجه سلسیوس در منطقه جابان شهرستان دماوند انجام دادند نیز، میانگین تعداد لاروهای آفت موجود در درختان کنترل شده براساس مدل پیش آگاهی که تعیین کرده بودند نسبت به

خسارت نیز با در نظر گرفتن قیمت هر کیلو سیب سالم، متوسط عملکرد باغات سیب در کشور، سطح باغات سیب در کشور، و درصد باغاتی که در آن ها سامانه هوشمند طراحی شده برای پیش آگاهی آفت کرم سیب پیاده سازی شود، برآورد شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سامانه هوشمند طراحی شده

بخش هایی از داشبورد سامانه هوشمند طراحی شده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این بخش ها اطلاعات هواشناسی منطقه و تغییرات برخط دما و رطوبت نسبی هوای باغ مشاهده می شود. همان طور که پیش تر اشاره شد، این سامانه افزون بر پیش آگاهی آفت برای مدیریت هوشمند برخی چالش های مهم دیگر در باغ سیب شامل مدیریت رشد و تغذیه، پیش آگاهی بیماری، و مدیریت آبیاری نیز توسعه یافته است و موارد دیگری که در صفحه داشبورد دیده می شود مانند مراحل فنولوژی گل دهی سیب و گیج آبیاری مربوط به برخی از آن ها بوده که در این مقاله شرح داده نشده است.

آستانه های مناسب سم پاشی برای کنترل آفت کرم سیب در نرم افزار سامانه براساس مدل پیش آگاهی تعیین شده، تعریف شد. بنابراین، اعلام هشدار به باغدار برای سم پاشی، یک هفته بعد از رسیدن دمای تجمعی به اوج تخم گذاری آفت کرم سیب در نسل اول و دوم (به ترتیب 230 ± 4570 و 21560 ± 380) تعیین شد که نرم افزار سامانه هوشمند قادر به محاسبه آن بود. هشدار زمان های سم پاشی برای کنترل آفت کرم سیب به همراه توصیه های کاربردی در خصوص نوع سم پیشنهادی و دوز آن در داشبورد سامانه اعلام می شد.

ارزیابی سامانه هوشمند طراحی شده برای پیش آگاهی آفت کرم سیب از نظر قابلیت انتقال داده ها و درصد از دست دادن داده نشان داد که ارسال و دریافت بسته داده در شبکه لورا با قابلیت اطمینان عالی انجام می شود. این ارزیابی با مقایسه بین بسته های ارسال شده از نود حسگر با پیش بینی تعداد ارسال ها با توجه به تنظیمات زمانی انجام شده برای ارسال هر بسته (هر ساعت یک بسته) و تعداد بسته دریافت شده در سرور انجام شد. طبق نتایج ارزیابی، درصد از دست دادن داده، صفر بود. با توجه به این که فاصله نود حسگر دما و رطوبت نسبی هوا و گیت وی نصب شده در باغ کم (البته نه خیلی نزدیک) بود، قدرت بسیار خوب سیگنال، نسبت سیگنال به نویز زیاد و احتمال برخورد کم در کنار عوامل دیگری مانند تنظیمات درست پارامترهای لورا و نصب درست آنتن می تواند دلایل انتقال عالی داده ها باشند.

از سوی دیگر، سامانه هوشمند طراحی شده از نظر اعلام هشدارهای به موقع دارای دقت عالی (۱۰۰ درصد) بود که دلیل آن را می توان در دقت خوب حسگر دما، کالیبره شدن آن و انتقال عالی بدون از دست دادن داده ها دانست.

دیگر بدون در نظر گرفتن جزئیات هزینه‌ای، هشدارهای سامانه هوشمند طراحی شده برپایه مدل پیش‌آگاهی ساعت-درجه سلسیوس می‌تواند به کاهش تقریبی ۵۰ درصدی در کل هزینه‌های عملیات مرتبط با سم‌پاشی برای کنترل آفت کرم سیب در باغ منجر شود. این صرفه‌جویی مستقیم تاثیر قابل توجهی در بهبود سودآوری و کاهش هزینه‌های تولید دارد. از طرفی کارایی سامانه در کنترل آفت کرم سیب در باغ عالی بود، به طوری که با وجود کاهش تعداد دفعات سم‌پاشی و براساس نتایج ارزیابی که پیش‌تر ارائه شد، کاهش شدیدی در خسارت ناشی از آفت مشاهده شد که می‌تواند باعث افزایش کیفیت و ارزش نهایی محصول شود. کاهش آسیب به میوه‌ها به معنی افزایش درصد برداشت میوه‌های سالم و در نتیجه افزایش درآمد باغدار است. از مزایای غیرمستقیم و دیگر نتایج مثبت به کارگیری هشدارهای سامانه هوشمند طراحی شده می‌توان به کاهش ریسک بهداشتی و زیست‌محیطی، افزایش پایداری کشاورزی و ایجاد ارزش افزوده برای جامعه کشاورزی اشاره کرد. اگر صرفه‌جویی هزینه‌ای سالانه برای سم‌پاشی هر هکتار باغ سیب تنها با در نظر گرفتن متوسط هزینه سم مورد استفاده در هر نوبت برای یک هکتار (با فرض این که از حشره‌کش استامی‌پراید ۰/۵ در هزار استفاده شود) ۴ میلیون ریال باشد، با کاهش دو نوبت سم‌پاشی در سال، ۸ میلیون ریال صرفه‌جویی در هزینه سم برای هر هکتار مورد انتظار است. با توجه به سطح زیر کشت زیاد سیب در کشور (حدود ۲۵۰ هزار هکتار)، در صورتی که این سامانه تنها در ۱۰ درصد باغات سیب پیاده‌سازی و استفاده شود، صرفه‌جویی هزینه‌ای سالانه از نظر سم مورد استفاده بالغ بر ۲۰۰ میلیارد ریال خواهد بود. هم‌چنین با توجه به کارایی اثبات‌شده سامانه هوشمند پیش‌آگاهی آفت کرم سیب در کاهش خسارت ناشی از آن و کاهش درصد میوه‌های کرم‌خورده، اگر سامانه تنها در ۱۰ درصد باغات سیب به کار گرفته شود و با فرض این که قیمت هر کیلو سیب سالم ۱۵۰۰۰۰ ریال (قیمت محافظه‌کارانه برای فروش از باغدار) و متوسط عملکرد باغات سیب کشور ۲۳ تن در هکتار باشد؛ ارزش ریالی کاهش خسارت حدود ۶۰/۴ هزار میلیارد ریال در سال برآورد می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که پیاده‌سازی و کاربرد این سامانه می‌تواند چه پتانسیل صرفه‌جویی سالانه عظیمی در صنعت سیب کشور داشته باشد.

درختان شاهد خیلی کم‌تر بود (به ترتیب ۰/۵ و ۷/۰۴ در نسل اول آفت و ۱/۶ و ۱۴/۲ در نسل دوم آفت) ولی صفر نبود.

نتایج دو سال ارزیابی سامانه هوشمند طراحی شده از نظر میانگین درصد کرم‌خوردگی میوه‌های سیب ریخته‌شده زیر درختان سیب کنترل شیمیایی شده طبق مدل پیش‌آگاهی سامانه در مقایسه با درختان شاهد در زمان برداشت در جدول ۴ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، میانگین درصد میوه‌های آفت‌زده در سال‌های اول و دوم و در زمان برداشت در تیمار شاهد به ترتیب ۱۰ و ۱۷ درصد بود. در حالی که میانگین درصد کرم‌خوردگی میوه‌ها در تیمار کنترل شیمیایی طبق مدل پیش‌آگاهی سامانه طراحی شده به ترتیب ۲/۱ و ۱ درصد در سال اول و دوم بود. این نتایج نشان داد که در مرحله برداشت محصول، درصد کرم‌خوردگی میوه‌ها در درختان شاهد بیش از ۷۰ درصد بیش از درختانی بود که براساس هشدارهای سامانه هوشمند طراحی شده و مدل پیش‌آگاهی آن سم‌پاشی شدند. هم‌چنین، خسارت ناشی از آفت کرم سیب در زمان برداشت محصول در قطعاتی از باغ که براساس هشدارهای سامانه هوشمند سم‌پاشی شدند، حدود یک درصد بود. Ranjbar Aghdam & Seddighi (2015) گزارش کردند که درصد کرم‌خوردگی میوه‌ها در زمان برداشت در درختان شاهد بیش از ۵۰ درصد بیش از درختانی بود که براساس مدل پیش‌آگاهی تعیین‌شده آن‌ها سم‌پاشی شده بودند.

بنابراین، سامانه هوشمند طراحی شده در این پژوهش کارایی بالایی در کنترل آفت کرم سیب در باغ داشت. به گفته مدیر باغ، در سال‌های قبل از پیاده‌سازی این سامانه در باغ، تعداد نوبت‌های سم‌پاشی به‌طور متوسط چهار نوبت (با توجه به پیش‌بینی‌های انجام‌شده با تله‌های فرمونی) بود ولی با به‌کارگیری سامانه هوشمند طراحی شده، نوبت‌های سم‌پاشی به دو نوبت در سال کاهش یافت. باغدار هم‌چنین اظهار داشت که خسارت ناشی از آفت کرم سیب در سال‌های قبل نیز بیش از مقدار برآوردشده در این پژوهش و با استفاده از سامانه هوشمند طراحی شده و مدل پیش‌آگاهی ساعت-درجه سلسیوس تعیین‌شده در آن بود.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش در خصوص تاثیر مدل پیش‌آگاهی مبتنی بر محاسبه میزان گرمای موثر برای طی مراحل مختلف زیستی آفت کرم سیب با استفاده از حسگر اندازه‌گیری دما در کاهش نوبت‌های سم‌پاشی با نتایج پژوهش‌های پیشین (Ranjbar Aghdam & Seddighi, 2015) هم‌خوانی داشت.

در سامانه هوشمند طراحی شده برپایه اینترنت اشیا، اندازه‌گیری و ثبت برخط دما توسط حسگر بی‌سیم نصب‌شده در باغ انجام می‌شد و سامانه قادر به اعلام به‌موقع هشدارهای لازم درخصوص زمان مناسب سم‌پاشی برپایه مدل پیش‌آگاهی تشریح‌شده بود. بنابراین، با فرض این که تمام هزینه‌های مرتبط با هر نوبت سم‌پاشی برای کنترل آفت کرم سیب در باغ شامل هزینه‌های سم، آب، کارگر سم‌پاش، سوخت، تجهیزات سم‌پاشی، استهلاک و غیره به‌طور نسبی ثابت باشد به عبارت

جدول ۳- نتایج ارزیابی براساس تعداد لاروهای آفت موجود در درختان سیب
Table 3. Evaluation results based on the number of pest larvae present in apple trees

زمان ارزیابی Evaluation time	میانگین تعداد لاروهای آفت در درختان سیب به ازای هر درخت Average number of pest larvae in apple trees per tree	سم‌پاشی شده براساس هشدارهای سامانه Sprayed based on the system alarms	شاهد Control
سال اول First year	15	0	
سال دوم Second year	17	0	

جدول ۴- نتایج ارزیابی براساس درصد میوه‌های آفت‌زده ریخته‌شده زیر درختان سیب در زمان برداشت
Table 4. Evaluation results based on the percentage of infested fruits dropped under apple trees at harvest time

زمان ارزیابی Evaluation time	میانگین درصد میوه‌های آفت‌زده ریخته‌شده زیر درختان سیب در زمان برداشت Average percentage of infested fruits dropped under apple trees at harvest time	سم‌پاشی شده براساس هشدارهای سامانه Sprayed based on the system alarms	شاهد Control
سال اول First year	10	2.1	
سال دوم Second year	17	1	

۴- نتیجه‌گیری

برای مدیریت چالش‌های اساسی دیگری در باغ سیب در حال توسعه و تکمیل است. کاربرد این سامانه برای مدیریت باغ‌های سیب می‌تواند گام موثری در هوشمندسازی باغات و کاهش نیاز به نیروی انسانی و نظارت‌های میدانی هم‌چنین، کاهش هزینه‌های تولید، افزایش کمی و کیفی محصول و سودآوری باشد. در ادامه این پژوهش هم‌چنین، هوشمندسازی فرایند تعیین بیوفیکس با ایجاد تله‌های هوشمند قابل اتصال به شبکه حسگر بی‌سیم سامانه مورد توجه قرار گرفته است.

سپاس‌گزاری

از شرکت موج آینده فراخن بابت همکاری و فراهم کردن تجهیزات و زیرساخت‌های لازم برای اجرای این پژوهش قدردانی می‌شود. هم‌چنین از همکاری و همراهی‌های مدیر باغ سیب (آقای مهندس شادلو) سپاسگزاری می‌شود.

منابع

Azmayesh Fard, P. (2015). *A Colour Atlas of Fruit Pests and Management their Recognition and Bioecology of Insects, Acari and Rodents*. First Edition. Sepehr Publication Center, 860pp. (In Persian).

در این پژوهش به‌منظور پیش‌آگاهی آفت کرم سیب در باغ، سامانه‌ای هوشمند برپایه اینترنت اشیا و شبکه حسگر بی‌سیم طراحی، پیاده‌سازی و اثربخشی آن بررسی شد. سامانه طراحی شده قادر است هشدارهای لازم و به‌موقع برای کنترل آفت کرم سیب را با صحت عالی به‌همراه توصیه‌های کاربردی در خصوص نوع سم پیشنهادی و دوز آن به باغدار اعلام کند بدون این‌که داده‌ای از دست بدهد.

براساس نتایج ارزیابی‌ها، سامانه هوشمند طراحی شده برپایه مدل پیش‌آگاهی تعیین شده در نرم‌افزار آن می‌تواند از خسارت ناشی از آفت کرم سیب جلوگیری کند که افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول را در پی خواهد داشت.

سامانه هوشمند طراحی شده برپایه اینترنت اشیا با کاهش دفعات سم‌پاشی از چهار نوبت به دو نوبت برای کنترل آفت کرم سیب سبب کاهش ۵۰ درصدی کل هزینه‌های عملیات مرتبط با سم‌پاشی در باغ می‌شود که اثربخشی مثبت کاربرد سامانه را نشان می‌دهد. از اثرات مثبت غیرمستقیم به‌کارگیری سامانه هوشمند طراحی شده می‌توان به کاهش ریسک آلودگی کارگران سم‌پاش هم‌چنین کاهش مقدار باقی‌مانده سموم در محصول اشاره کرد. سامانه طراحی شده هم‌اکنون

- Magsino, E.R. (2019). *An IoT-based smart orchard monitoring system by employing wireless sensor networks*. International Journal of Recent Technology and Engineering, 8(3). <https://doi.org/10.35940/ijrte.C5852.098319>.
- Mowla, M.N., Mowla, N., Shah, A.F.M.S., Rabie, K.M. and Shongwe, T. (2023). *Internet of Things and wireless sensor networks for smart agriculture applications: A survey*. IEEE Access, 11, 145813–145852. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299>.
- Rajabi, G. (1986). *Insects Attacking Rosaceous Fruit Trees in Iran*. Vol. 2. Publication of Plant Pest & Diseases Research Institute, Tehran. 209 pp. (In Persian).
- Ranjbar Aghdam, H. and Seddighi, L. (2015). *Reducing the frequency of pesticide spraying in apple orchards by determining the exact time of spraying to control the apple codling moth Cydia pomonella (L.) using the degree-hour forecasting model*. The 3rd National Symposium on Agriculture and Sustainable Development Opportunities and Future Challenges, March 4–5, Shiraz Azad University. (In Persian).
- Ranjbar Aghdam, H., Ghasemi, M. and Karimpour, Y. (2021). *Estimation of the low temperature threshold and thermal requirement of the established codling moth populations in West Azerbaijan, Tehran and Isfahan provinces*. Iranian Journal of Plant Protection Science, 51(2): 265–274. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJPPS.2020.290195.1006913>.
- Song, Y., Bi, J. and Wang, X. (2024). *Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT*. Internet of Things (Neth.), 25, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101029>.
- Subhrajit, M., Anamika, Y., Florence, A.P., Kshetrimayum, M.D. and Shravan, K.S.M. (2024). *Adaption of smart applications in agriculture to enhance production*. Smart Agricultural Technology, 7, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100431>.
- Wang, Z., Wang, Y., Lan, P. and Sun, F. (2019). *The application of the internet of things technology in apple production*. IEEE 11th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), Jinan, China, 109–112.
- Xu, L., Xiaoning, S., Zhipeng, L. and Huijuan, X. (2022). *Design and simulation of intelligent orchard system based on internet of things*. 12th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), Xiamen, China, 146–150.
- Feng, C., Wu, H., Zhu, H. and Sun, X. (2012). *The design and realization of apple orchard intelligent monitoring system based on internet of things technology*. Advanced Materials Research, 546–547: 898–902. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.546-547.898>.
- Hatami, N., Radjabi, G., Mohiseni, A.A. and Goldasteh, S. (2011). *Investigation on the most appropriate time for chemical control of codling moth, Cydia pomonella (L.) using calculate the thermal constant by double sine wave method*. 2nd Iranian Pest Management Conference (IPMC), September 14–15, Kerman, Iran. (In Persian).
- Jamshidi, B. and Dehghanisani, H. (2020). *Big IoT data from the perspective of smart agriculture*. Roshd -e- Fanavari, 63(16): 12–22. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jstpi.20875.16.63.12>.
- Jamshidi, B. and Khabbaz Jolfaei, H. (2024). *Powdery mildew disease forecasting for apple orchards based on Internet of Things technology*. Journal of Applied Research in Plant Protection, 13(4): 347–358. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/arp.2024.18012>.
- Jamshidi, B., Khabbaz Jolfaei, H., Mohammadpour, K., Seilsepour, M., Dehghanisani, H., Hajnajari, H., Farazmand, H. and Atri, A. (2025). *Internet of things-based smart system for apple orchards monitoring and management*. Smart Agricultural Technology, 10, 100715. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100715>.
- Khanna, A. & Kaur, S. (2019). *Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 157, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>.
- Libelium, (2015). *Sustainable farming and the IoT: Cocoa research station in Indonesia*. <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/sustainable-farming-and-the-iot-cocoa-research-station-in-indonesia/>
- Libelium, (2016a). *Improving banana crops production and agricultural sustainability in Colombia using sensor networks*. <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/improving-banana-crops-production-and-agricultural-sustainability-in-colombia-using-sensor-networks/>
- Libelium, (2016b). *Monitoring weather conditions to prevent pest in olives*. <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/monitoring-weather-conditions-to-prevent-pest-in-olives/>

Zhang, P., Chen, X., Li, S., Zhang, C. and Hu, Y. (2023). *Development of the internet of smart orchard things based on multi-sensors and LoRa technology*. *Intelligent and Converged Networks*, 4(4): 342–354. <https://doi.org/10.23919/ICN.2023.0028>.

Zhang, P., Wang, S., Bai, M., Bai, Q., Chen, Z., Chen, X., Hu, Y., Zhang, J., Li, Y., Hu, X., Shi, Y. and Deng, J. (2022). *Intelligent spraying water based on the internet of orchard things and fuzzy PID algorithms*. *Journal of Sensors*, vol. 2022, Article ID 4802280. <https://doi.org/10.1155/2022/4802280>.

Zhang, Y., Wang, X., Jin, L., Ni, J., Zhu, Y., Cao, W. and Jiang, X. (2025). *Research and development of an IoT smart irrigation system for farmland based on LoRa and edge computing*. *Agronomy*, 15(2), 366. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020366>.