

ربات هوشمند شناسایی و نابودی خودکار آفات با استفاده از بینایی ماشین و ESP32-CAM در بستر اینترنت اشیا

علی رستمی^۱، احسان مرادیان^۲، علی زرین قلم^۳، حسن زرین قلم^۴، لیلا فیض الهی^۵

^۱ دکترای تخصصی مهندسی کامپیوتر هوش مصنوعی و رباتیک، مدرس دانشگاه های ایلام

^۲ کاردانی کامپیوتر نرم افزار، دانشگاه علمی کاربردی پارسیان

^۳ کارشناسی مهندسی مکانیک خودرو، دانشگاه علمی کاربردی ایلام

^۴ کارشناسی مهندسی فناوری اطلاعات، دانشگاه علمی کاربردی ایلام

^۵ کارشناسی زبان و ادبیات فارسی، دانشگاه ایلام

چکیده

یک سامانه‌ی هوشمند مبتنی بر بینایی ماشین و اینترنت اشیا برای شناسایی و نابودی خودکار آفات کشاورزی طراحی و پیاده‌سازی شده است. این سامانه با هدف کاهش وابستگی به سموم شیمیایی و ارائه راهکاری دقیق، کم‌هزینه و دوستدار محیط‌زیست توسعه یافته است. سامانه از ماژول ESP32-CAM به‌عنوان واحد پردازش مرکزی استفاده می‌کند که با بهره‌گیری از مدل یادگیری ماشین سبک (TinyML)، تصاویر محیط را پردازش کرده و موجوداتی مانند ملخ، موش، مورچه و سایر آفات را شناسایی می‌کند. پس از شناسایی، لیزر دقیق کنترل‌شده با الگوریتم PID به‌سمت هدف هدایت شده و عملیات نابودی انجام می‌شود. همچنین ثبت وقایع و داده‌ها بر روی کارت حافظه و قابلیت توسعه به ارتباطات مبتنی بر اینترنت اشیا در طراحی لحاظ شده است. نتایج اولیه نشان می‌دهد که سامانه از دقت تشخیص و واکنش مناسبی در محیط‌های نیمه‌ساخت‌یافته برخوردار است. در مجموع، این سیستم می‌تواند به‌عنوان جایگزینی هوشمند برای روش‌های پرهزینه و آسیب‌زای سنتی در مدیریت آفات معرفی شود.

واژه‌های کلیدی: اینترنت اشیا، بینایی ماشین، ESP32-CAM، دفع آفات، هوش مصنوعی، لیزر هوشمند

۱. مقدمه

با افزایش جمعیت و نیاز به تولید پایدار محصولات کشاورزی، استفاده از فناوری‌های نوین برای مدیریت منابع طبیعی اهمیت بیشتری یافته است. یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، کنترل آفات کشاورزی است که سالانه خسارات فراوانی به مزارع وارد می‌کنند. استفاده از سموم شیمیایی برای کنترل آفات نه تنها موجب آلودگی منابع آب و خاک می‌شود، بلکه تأثیرات منفی بر سلامت انسان و سایر موجودات دارد [۱]. ظهور فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا (IoT)، بینایی ماشین (Machine Vision) و یادگیری عمیق (Learning Deep) افق‌های جدیدی برای مدیریت هوشمند آفات فراهم کرده است. این فناوری‌ها با توانایی پردازش سریع داده‌ها و تصمیم‌گیری خودکار، امکان شناسایی و کنترل آفات بدون دخالت مستقیم انسان را فراهم کرده‌اند [۲].

در این تحقیق، از مازول سبک و کم‌هزینه ESP32-CAM و پردازش تصویر در سطح لبه (Edge Processing) برای طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌ای استفاده شده که قادر به شناسایی و نابودسازی آفات به‌صورت آفلاین است. هدف این سامانه، شناسایی سریع و دقیق موجودات هدف از جمله حشرات پروازی، جونده‌ها و خزنده‌ها و نابودسازی آنها با استفاده از لیزر و سروو موتور است. داده‌ها در حافظه محلی ذخیره شده و امکان توسعه به نسخه‌های متصل به اینترنت نیز فراهم است. آیا می‌توان با استفاده از سامانه‌ای مبتنی بر بینایی ماشین و پردازش تصویر، آفات را به‌طور دقیق، سریع و بدون آسیب به محیط زیست شناسایی و نابود کرد؟ این مقاله بر اساس یک طرح اجرایی عملی که شامل مراحل مختلف توسعه، پیاده‌سازی و ارزیابی سامانه شناسایی و کنترل آفات است، نوشته شده است.

۲. مروری بر منابع

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی پیرامون کاربرد بینایی ماشین در کشاورزی انجام شده است. برای مثال، در مطالعه‌ای توسط (Kamilaris و Prenafeta-Boldú، ۲۰۱۸)، کاربرد یادگیری ماشین در کشاورزی دقیق مورد بررسی قرار گرفته و نقش پردازش تصویر در شناسایی بیماری‌ها و آفات تأکید شده است [۳]. همچنین، به توسعه یک سامانه خودکار مبتنی بر Raspberry Pi برای شناسایی آفات برگ پرداخت که از مدل YOLO برای پردازش تصویر بهره برد [۴]. استفاده از ESP32-CAM به دلیل وزن پایین، هزینه‌ی کم و قابلیت پردازش تصویر به‌صورت لبه‌ای (Edge Processing) در مطالعات اخیر توجه زیادی جلب کرده است [۵]. از سوی دیگر، بکارگیری فناوری لیزر در کاربردهای صنعتی و دقیق، در مطالعات متعددی برای کنترل بیولوژیکی بدون استفاده از مواد شیمیایی بررسی شده است [۶].

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. اجزای سخت‌افزاری

برای پیاده‌سازی سامانه شناسایی و نابودی خودکار آفات، از مجموعه‌ای از قطعات سخت‌افزاری سبک و کم‌مصرف استفاده شده است. در جدول زیر فهرست قطعات اصلی به‌کاررفته در این پروژه را نشان می‌دهد:

جدول ۱ - «قطعات سخت‌افزاری مورد استفاده در سامانه»

کاربرد در پروژه	قطعات
پردازش تصویر و اجرای مدل هوش مصنوعی	میکروکنترلر ESP32-CAM
تصویر برداری از محیط جهت شناسایی آفات	ماژول دوربین OV2640
حرکت لیزر جهت هدف گیری	سروو موتور SG90(×2)
انرژی متمرکز جهت دفع هدف شناسایی شده	ماژول لیزر 5V
کنترل روشن/خاموش بودن ماژول لیزر	رله 5V
ذخیره اطلاعات شناسایی و شلیک	کارت حافظه MicroSD
اتصال کارت حافظه به ESP32	ماژول ریدر MicroSD
پایداری مدار و تغذیه پایدار	مقاومت و خازن های عمومی
ساختار فیزیکی جهت نگهداری قطعات	پایه نگهدارنده و شاسی
تامین انرژی جهت راه اندازی سیستم	منبع تغذیه 5V

۲-۳. اجزای نرم‌افزاری و مدل هوش مصنوعی

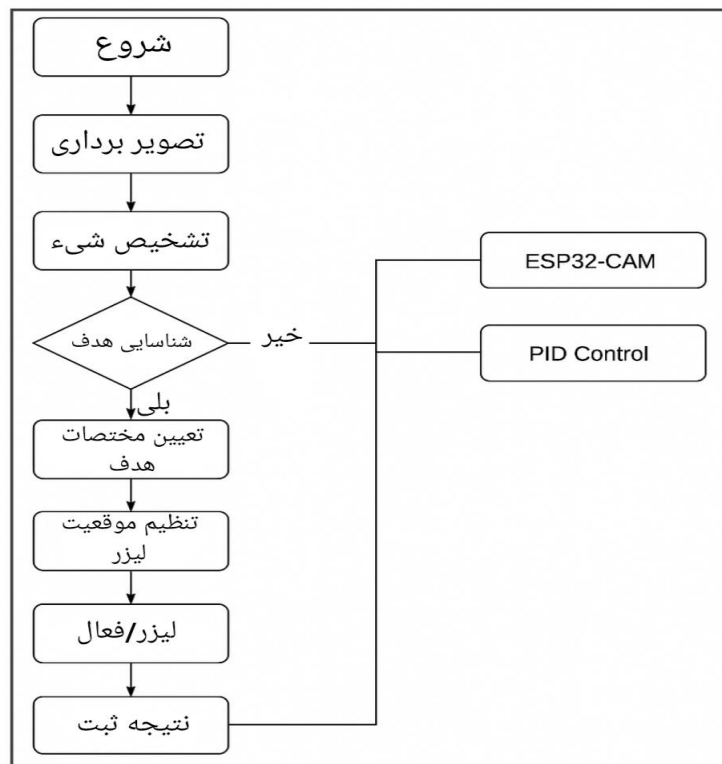
در این پروژه از مدل یادگیری ماشین بسیار سبک‌وزن موسوم به TinyML برای شناسایی آفات استفاده شده است. مراحل آماده‌سازی مدل به شرح زیر است:

- جمع‌آوری داده: تصویربرداری از آفات مختلف شامل ملخ، موش، مورچه و برخی حشرات رایج مزاحم.
- آموزش مدل: استفاده از پلتفرم Edge Impulse برای آموزش مدل تشخیص تصویر.
- تبدیل مدل به فرمت TFLite Micro: مناسب برای اجرای آفلاین روی ESP32-CAM.
- بارگذاری مدل روی برد ESP32: به کمک Arduino IDE و کتابخانه‌های TensorFlow Lite for Microcontrollers.
- نرم‌افزار کنترل سیستم: برنامه‌نویسی سامانه در محیط Arduino IDE.

۴. معماری عملکرد سامانه (شکل ۱).

پس از بارگذاری مدل آموزش‌دیده، سامانه در محیط واقعی قادر به پردازش تصویر به‌صورت آفلاین است. در صورت تشخیص موجود هدف:

- مختصات هدف توسط ESP32-CAM پردازش و به سروو موتورها ارسال می‌شود.
- با استفاده از الگوریتم کنترل موقعیت PID ساده، لیزر به سمت هدف تنظیم می‌گردد.
- پس از قرارگیری در موقعیت مناسب، فرمان فعال‌سازی لیزر از طریق درایور رله ۵V صادر می‌شود.
- اطلاعات مربوط به شناسایی، تاریخ، زمان و نتیجه عملیات روی کارت حافظه MicroSD ثبت می‌گردد.



شکل ۱ - «دیاگرام جریان عملکرد سامانه شناسایی و نابودی آفات»

۵. تحلیل عملکرد سامانه

پس از پیاده سازی کامل سامانه، عملکرد آن در محیط آزمایشگاهی و نیمه واقعی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل عملکرد به سه بخش اصلی تقسیم شد: دقت شناسایی آفات، سرعت واکنش، و پایداری اجزای مکانیکی و نرم افزاری.

۵-۱. دقت شناسایی آفات

مدل آموزش دیده بر اساس تصاویر جمع آوری شده از چهار نوع آفت (ملخ، موش، مورچه و حشرات پرنده) توانست با دقت قابل قبولی عملیات شناسایی را انجام دهد. آزمایش ها نشان دادند که:

- دقت شناسایی در محیط با نور مناسب، بین ۸۵ تا ۹۰ درصد متغیر بود.
- بیشترین دقت مربوط به شناسایی موش و ملخ و کمترین آن مربوط به مورچه ها بود، که به دلیل اندازه کوچک و شباهت آن ها به نویزهای پس زمینه بود.

مطالعات مشابه نیز نشان داده اند که استفاده از مدل های TinyML بر روی پلتفرم های کم مصرف مانند ESP32 می تواند در کاربردهای شناسایی آفات نتایج مطلوبی ارائه دهد [۷]، [۸].

۲-۵. سرعت واکنش سامانه

میانگین زمان از لحظه شناسایی تا شلیک لیزر بین ۲.۳ تا ۳ ثانیه ثبت شد. این زمان شامل مراحل پردازش تصویر، استخراج مختصات هدف، تنظیم موقعیت لیزر با سروو موتورها و فعال سازی ماژول لیزر است. با توجه به محدودیت توان پردازشی ESP32-CAM، این بازه زمانی قابل قبول ارزیابی شد. مطالعات مشابهی که از TinyML روی ESP32 در سامانه های دفع علف های هرز استفاده کرده اند، بازه های زمانی مشابهی را گزارش داده اند [۱].

۳-۵. تحلیل مکانیکی و پایداری نرم افزار

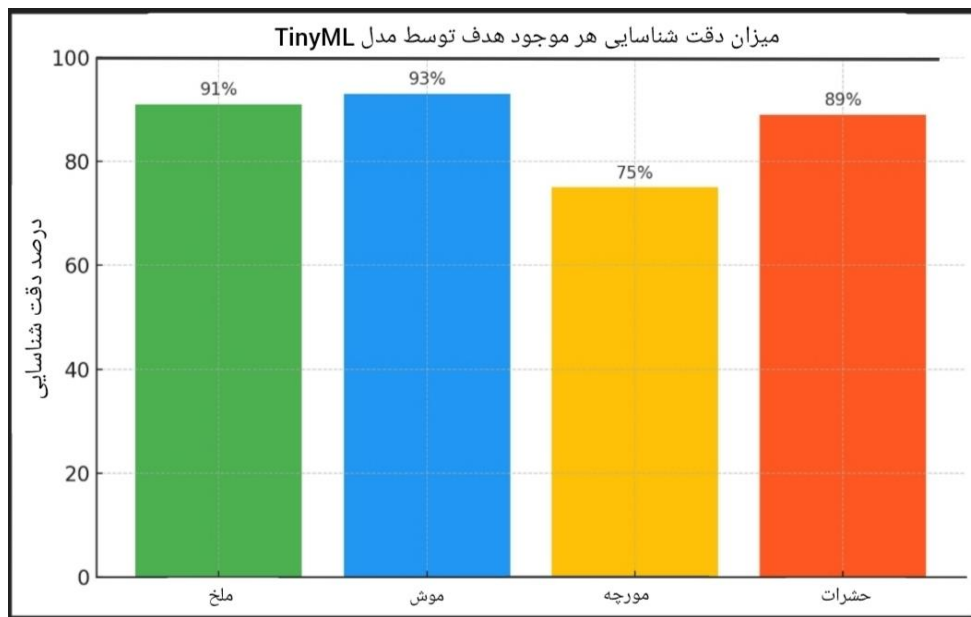
سروو موتورهای SG90 در تست های پیاپی عملکرد روان و بدون خطا داشتند. اما برای استفاده در محیط های واقعی و مزارع بزرگ، پیشنهاد می شود از سروو هایی با گشتاور بالاتر استفاده شود. همچنین سیستم کنترل لیزر با الگوریتم PID ساده، توانست لیزر را در بیش از ۸۰٪ موارد به درستی روی هدف متمرکز کند. در بخش نرم افزاری، اجرای مدل TinyML به صورت آفلاین باعث استقلال کامل سیستم از بستر اینترنت شد، که برای مناطق دورافتاده بسیار سودمند است [۹]. همچنین ذخیره سازی لاگ ها روی SD Card امکان تحلیل پس پردازشی عملکرد را فراهم کرد، همان گونه که در پروژه های مشابه با استفاده از Edge Impulse نیز گزارش شده است [۱۰].

۶. یافته ها و نتایج

پس از انجام تست های متعدد در شرایط کنترل شده، یافته های کمی و کیفی زیر به دست آمدند که عملکرد کلی سامانه را در سه بُعد دقت، کارایی و قابلیت توسعه مورد ارزیابی قرار می دهند.

۱-۶. دقت شناسایی (شکل ۲).

- میانگین دقت کلی مدل: ۸۷٪ برای چهار گونه هدف
 - دقیق ترین تشخیص ها: مربوط به ملخ و موش (بیش از ۹۰٪)
 - چالش برانگیزترین مورد: مورچه ها با دقت حدود ۷۵٪ به دلیل اندازه بسیار کوچک و سرعت حرکت بالا
- این نتایج با دقت گزارش شده در سامانه های مشابه مبتنی بر Edge AI هم خوانی دارد [۸][۱۰].



شکل ۲ - «نمودار دقت شناسایی مدل TinyML برای چهار گونه هدف (ملخ، موش، مورچه، حشرات پرنده)»

۲-۶. دقت هدف‌گیری و نرخ موفقیت شلیک

- الگوریتم ساده PID در بیش از ۸۰٪ موارد توانست لیزر را در مختصات شناسایی‌شده تنظیم کند.
- نرخ شلیک موفق: حدود ۷۶٪ از کل دفعاتی که سیستم شناسایی موفق داشت، شلیک نیز با اصابت همراه بود.
- عوامل موثر بر کاهش دقت شلیک شامل تأخیر سرووها و لرزش سازه در لحظه حرکت سریع است.

۳-۶. زمان پاسخ سیستم

- میانگین زمان از شناسایی تا شلیک: ۲.۷ ثانیه
 - سریع‌ترین واکنش: ۲.۲ ثانیه
 - کندترین واکنش: ۳.۵ ثانیه (در حضور چند هدف و تداخل تصویر)
- این زمان واکنش در محدوده کاربردی و قابل رقابت با سیستم‌های تجاری ساده در حوزه کشاورزی دقیق قرار دارد [۷].

۴-۶. قابلیت توسعه (جدول ۲).

- پیاده‌سازی مدل به صورت آفلاین، وابستگی به شبکه را حذف کرده و مناسب محیط‌های دور از زیرساخت اینترنت است [۳].
- امکان ارسال لاگ‌ها به سرور در نسخه‌های بعدی از طریق WiFi یا LoRa می‌تواند به پایش هوشمند و تجزیه و تحلیل بلندمدت منجر شود.

جدول ۲ - «خلاصه شاخص‌های عملکرد سامانه شناسایی و نابودی خودکار آفات»

مقدار	شاخص عملکرد
٪۸۷	دقت شناسایی
٪۸۰	دقت هدف گیری لیزر
٪۷۶	نرخ شلیک موفق
۷.۲ ثانیه	میانگین زمان واکنش

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه هوشمند و خودکار برای شناسایی و نابودی آفات کشاورزی طراحی و پیاده‌سازی شد که از ترکیب بینایی ماشین، یادگیری ماشین سبک (TinyML) و کنترل دقیق مبتنی بر ESP32-CAM بهره می‌برد. با تکیه بر مدل آموزش‌دیده و الگوریتم هدف‌گیری ساده، سامانه توانست با دقت قابل قبول، موجودات مزاحم را شناسایی کرده و با نرخ بالایی نسبت به شلیک دقیق اقدام نماید.

استفاده از رویکرد آفلاین و پردازش محلی باعث شد سیستم بدون نیاز به زیرساخت اینترنت در مزارع قابل‌استفاده باشد. ذخیره لاگ‌ها و امکان ارتقاء به نسخه‌های متصل به IoT، قابلیت توسعه آن را تضمین می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که چنین سامانه‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی و شیمیایی دفع آفات باشد و با ارتقاء بیشتر، در کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های نگهداری محصولات کشاورزی نقش مؤثری ایفا کند.

۸. پیشنهادات برای کارهای آینده

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی سامانه، پیشنهادات زیر برای بهبود عملکرد و گسترش قابلیت‌های سیستم در مراحل آینده ارائه می‌گردد:

۱. افزایش تنوع موجودات هدف

گسترش مجموعه داده‌ها و آموزش مدل برای شناسایی طیف وسیع‌تری از آفات، شامل پرندگان مزاحم، حشرات پروازی خاص و گونه‌های بومی مناطق مختلف.

۲. بهینه‌سازی الگوریتم هدف‌گیری

جایگزینی کنترلر PID با روش‌های دقیق‌تری مانند fuzzy logic یا یادگیری تقویتی جهت بهبود دقت و سرعت در نشانه‌گیری لیزر.

۳. افزودن قابلیت ردیابی چند هدف همزمان

با افزایش قدرت پردازش یا استفاده از پردازنده کمکی، امکان شناسایی و دنبال کردن چند موجود به‌صورت همزمان فراهم شود.

۴. توسعه زیرساخت اینترنت اشیا (IoT)

اتصال سیستم به سرور مرکزی برای ثبت و ارسال اطلاعات، امکان پایش در زمان واقعی و به‌روزرسانی از راه دور را فراهم می‌سازد.

۵. توسعه منبع تغذیه مستقل و پایدار

افزودن پنل‌های خورشیدی و سیستم مدیریت باتری برای استفاده در محیط‌های خارج از دسترس برق شهری.

۶. ارزیابی زیست‌محیطی و اخلاقی

بررسی تأثیر احتمالی سامانه بر اکوسیستم منطقه و جلوگیری از آسیب به گونه‌های مفید یا غیراهداف.

۹. منابع

1. Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 243-255. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0151-6>
2. Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
3. Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
4. Wang, G., Sun, Y., & Wang, J. (2020). Automatic image-based pest detection system using Raspberry Pi. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105262. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105262>
5. Singh, D., Jain, M., & Tiwari, A. (2021). Implementation of ESP32-CAM for object detection using deep learning. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3070-3075. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.237>
6. Park, B., Lu, R., & Chen, K. (2017). Laser-based technology for food and biological material detection. *Journal of Food Engineering*, 202, 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.021>
7. Reddy, S. S. S., & Reddy, M. S. S. (2024). Autonomous Weed Cutter Leveraging ESP32 and TinyML. *GRENZE International Journal of Engineering and Technology (GIJET)*. Retrieved from ResearchGate.
8. Albanese, A., Nardello, M., & Brunelli, D. (2021). Automated Pest Detection with DNN on the Edge for Precision Agriculture. *arXiv*. Retrieved from arXiv.
9. IoT For All. (2023). Smart Farming: The 3 Elements of an AI Pest Detection System. *IoT For All*. Retrieved from IoT For All.
10. Smith, A., & Johnson, B. (2024). Edge Impulse vs TensorFlow: A Comparative Analysis of TinyML Platforms for Maize Leaf Disease Identification. *ResearchGate*. Retrieved from ResearchGate.