

ارزیابی مقایسه‌ای فناوری‌های ارتباطی کم‌مصرف برای هوشمندسازی باغ‌ها بر پایهٔ اینترنت اشیا: شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیا باند باریک و وای‌فای هالو

بهاره جمشیدی^۱، محمد صالح رستمی^۲، جلیل تقی‌زاده طامه^۳

۱- بخش تحقیقات هوشمندسازی کشاورزی، موسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (نویسنده مسئول). *رایانامه: Taghimollaei@yahoo.com*

۲-بخش تحقیقات هوشمندسازی کشاورزی، موسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳-بخش تحقیقات هوشمندسازی کشاورزی، موسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۲ تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ صص: ۷۰-۵۷

چکیده

تحول کشاورزی هوشمند با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا در حال گسترش است. یکی از حوزه‌های کلیدی در این خصوص، طراحی و توسعهٔ سامانه‌های هوشمند برای مدیریت بهینه در باغ‌ها است. انتخاب راه‌کار ارتباطی مناسب یکی از عوامل کلیدی در موفقیت سامانه‌های هوشمند باغ‌ها مبتنی بر اینترنت اشیا است. تنوع فناوری‌های ارتباطی کم‌مصرف و برد بلند، تصمیم‌گیری در این زمینه را با چالش‌هایی مثل تفاوت در برد ارتباطی، نرخ داده، تأخیر، مصرف انرژی، وابستگی به زیرساخت کارور، ملاحظات مقرراتی و هزینهٔ پیاده‌سازی روبرو کرده است. در این پژوهش، سه راه‌کار ارتباطی کم‌مصرف در اینترنت اشیا شامل شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیا باند باریک و وای‌فای هالو، با تأکید بر کاربردهای هوشمندسازی باغ‌ها، ارزیابی تطبیقی شده‌اند. برای این منظور، ضمن معرفی و بررسی نقاط قوت و محدودیت‌های هر راه‌کار، ازمنظر نوع شبکه، باند فرکانسی، برد ارتباطی، نرخ داده، تأخیر، مصرف انرژی، توپولوژی شبکه و مالکیت زیرساخت مقایسه‌ای فنی انجام شد. سپس، در یک تحلیل کاربردی، معیارهایی مانند پوشش باغ‌های بزرگ، وابستگی به کارور، سهولت نگه‌داری، مقیاس‌پذیری و پشتیبانی از تبادل دادهٔ زمان – واقعی بررسی شد. نتایج نشان داد که شبکه گسترده دوربرد برای پایش گسترده و کم‌مصرف در باغ‌های بزرگ و فاقد زیرساخت ارتباطی مناسب است؛ اینترنت اشیا باند باریک برای سامانه‌های نیازمند مقیاس‌پذیری و مدیریت مبتنی بر زیرساخت کارور مناسب است؛ و وای‌فای هالو برای برنامه‌های نظارت و مدیریت محلی با نیاز به نرخ دادهٔ بالاتر و تأخیر کم‌تر، به شرط دسترسی به منبع انرژی پایدار، مناسب‌تر است. در نهایت، برای تسهیل تصمیم‌گیری در مرحلهٔ طراحی سامانه، یک چارچوب تصمیم‌یار اولیه مبتنی بر درخت تصمیم ارائه شد که نتایج مقایسهٔ فنی را به یک ابزار کاربردی برای انتخاب راه‌کار ارتباطی در پروژه‌های واقعی هوشمندسازی باغ‌ها تبدیل می‌کند. انتخاب آگاهانه راه‌کار ارتباطی متناسب با شرایط اجرایی و الزامات پروژه می‌تواند مصرف انرژی، کاهش هزینه و بهبود پایداری شبکه در سامانه‌های هوشمندسازی باغ‌ها را بهینه‌سازی کند.

کلیدواژه‌ها: اینترنت اشیا، باغ هوشمند، فناوری‌های ارتباطی کم‌مصرف، کشاورزی دقیق، کشاورزی هوشمند، شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیا باند باریک، وای‌فای هالو.

مقدمه

کشاورزی هوشمند^۱، یک رویکرد نوین در مدیریت سامانه‌های کشاورزی است که با بهره‌گیری از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات، ازجمله اینترنت اشیاء^۲، امکان پایش، تحلیل و مدیریت بهینهٔ منابع و فرایندهای کشاورزی را فراهم می‌کند. اینترنت اشیاء با ایجاد یک شبکهٔ ارتباطی گسترده و یکپارچه بین اشیاء (شامل حسگرها، محرک‌ها، دستگاه‌های مجهز به فناوری‌های ارتباطی بی‌سیم که قابلیت جمع‌آوری داده، نظارت‌پذیری و ارتباط از راه دور را دارند)، امکان هوشمندسازی محیط و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم می‌کند. در این شبکه، براساس مقیاس کاربرد و الزامات فنی، می‌توان از فناوری‌ها و پروتکل‌های ارتباطی گوناگونی از جمله شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۳؛ فناوری‌ها و پروتکل‌های شبکه گسترده کم‌مصرف^۴ مانند شبکه گسترده دوربرد^۵ و سیگ‌فاکس^۶، و فناوری‌ها و پروتکل‌های کم‌مصرف کوتاه‌برد مانند زیگ‌بی^۷؛ فناوری‌های ارتباطی سلولی^۸ شامل تکامل بلندمدت^۹ و اینترنت اشیاء باند باریک^{۱۰}؛ و شبکه‌های محلی کوتاه‌برد^{۱۱} شامل وای‌فای (وای‌فای)، بلوتوث^{۱۲} و ارتباطات میدانی نزدیک^{۱۳} استفاده کرد (جمشیدی و دهقانی‌سانیچ، ۱۳۹۹؛ جمشیدی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۵). هر یک از این فناوری‌ها و پروتکل‌ها بسته به الزامات کاربردی، برد ارتباطی^{۱۵} موردنیاز، محدودیت‌های مصرف انرژی و حجم دادهٔ قابل تبادل، می‌توانند در طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء نقش متفاوتی داشته باشند.

کشاورزی هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء، با بهینه‌سازی نیروی کار موردنیاز و استفادهٔ بهینه از منابع پایه و نهاده‌ها می‌تواند منجر به افزایش کَمّی و کیفی تولیدات کشاورزی، کاهش هزینه‌های تولید، افزایش سودآوری، کمینه‌سازی اثرات محیطی و درنتیجه بهبود بهره‌وری و تحقق تولید پایدار شود (جمشیدی و دهقانی‌سانیچ، ۱۳۹۹). از این رو، با توجه به این‌که توسعهٔ باغ‌ها یکی از راه کارهای پایدار برای حفاظت از زمین‌های کشاورزی رو به کاهش و تأمین امنیت غذایی به‌شمار می‌رود، به‌کارگیری

راه‌حل‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء در مدیریت باغ‌ها می‌تواند تولید محصول با کیفیت بالاتر را افزایش داده و هزینه‌های تولید و مدیریت را کاهش دهد.

با گسترش رویکرد کشاورزی هوشمند و مدیریت هوشمند باغ‌ها، استفاده از سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء به‌عنوان ابزارهای کلیدی پایش، پیش‌آگاهی و تصمیم‌یار در باغ‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در این راستا، فناوری‌ها و پروتکل‌های ارتباطی نقش اساسی در کارایی، پایداری، مصرف انرژی، هزینه و قابلیت اطمینان این سامانه‌ها ایفاء می‌کنند. باتوجه‌به این‌که هوشمندسازی باغ‌ها مبتنی بر اینترنت اشیاء مستلزم درنظرگرفتن ویژگی‌هایی مانند وسعت زیاد زمین‌ها، پراکندگی مکانی حسگرها، محدودیت منابع انرژی و نیاز به پایش بلندمدت شاخص‌های محیطی است، بسیاری از فناوری‌ها و پروتکل‌های متداول ارتباطی کوتاه‌برد یا پرمصرف، در چنین محیط‌هایی کارایی لازم را نخواهند داشت. افزون بر این، در شرایط ایران، باید به پراکندگی جغرافیایی باغ‌ها، محدودیت زیرساخت‌های مخابراتی، تنوع اقلیمی و الگوهای بهره‌برداری نیز به‌طور ویژه توجه شود. از این‌رو، انتخاب نادرست فناوری/ پروتکل ارتباطی می‌تواند به کاهش کارایی سامانه، افزایش هزینه‌ها و در نهایت شکست پروژه‌های هوشمندسازی باغ‌ها مبتنی بر اینترنت اشیاء بیانجامد.

در این پژوهش، سه راه‌کار ارتباطی کم‌مصرف و نوین برای هوشمندسازی باغ‌ها مبتنی بر اینترنت اشیاء، شامل شبکه گسترده

- Smart Agriculture (SA)
- Intrenet of Things (IOT)
- Wireless Sensor Networks (WSN)
- Low Power Wide Area Network (LPWAN)
- Long Range Wide Area Network
- Sigfox
- Zigbe
- Cellular Communication Technologies
- Long Term Evolution (LTE)
- Narrowband IoT (NB-IoT)
- Short Range Local Networks
- Bluetooth
- Near-field Communications (NFC)
- Jamshidi
- Communication Range

دوربرد، اینترنت اشیاء باند باریک و وایفای هالو^۱، ازمنظر فنی و کاربردی، ارزیابی شدند. این راه کارهای ارتباطی به‌عنوان نمایندگان سه رویکرد غالب و بنیادین در ارتباطات اینترنت اشیاء کشاورزی شامل: شبکه‌های کم‌توان گستردهٔ بدون‌مجوز^۲، شبکه‌های کم‌توان مبتنی بر زیرساخت سلولی^۳ و نسل نوین وای فای کم‌مصرف ویژهٔ کاربردهای اینترنت اشیاء و مناسب برای محیط‌های باغی (دارای قابلیت پاسخ‌گویی به الزامات ارتباطی سامانه‌های هوشمندسازی باغ)، بلوغ استانداردها و افزایش پذیرش (کاربرد گسترده) در کشاورزی هوشمند انتخاب شدند. در این پژوهش هم‌چنین، بر پایهٔ نتایج تحلیل، یک چارچوب تصمیم‌یار اولیه و عملی برای انتخاب راه‌کار ارتباطی مناسب در مراحل طراحی سامانه‌های هوشمندسازی باغ‌ها مبتنی بر اینترنت اشیاء پیشنهاد شده است. بدین ترتیب، نوآوری اصلی این پژوهش در تبدیل نتایج تحلیل تطبیقی به یک چارچوب تصمیم‌یار کاربردی برای انتخاب فناوری ارتباطی متناسب با نیازهای عملیاتی باغ‌ها است.

این پژوهش از نوع تحلیلی - مقایسه‌ای است و با هدف ارزیابی قابلیت‌ها و محدودیت‌های راه کارهای ارتباطی شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیاء باند باریک و وای‌فای هالو در کاربردهای هوشمندسازی باغ‌ها انجام شد. برای این منظور، اطلاعات فنی و کاربردی آن‌ها از مقالات علمی، استانداردهای معتبر و مستندات فنی استخراج شد. معیارهای مقایسه براساس الزامات ارتباطی سامانه‌های هوشمند باغ، شامل برد ارتباطی، نرخ داده، تأخیر، مصرف انرژی، توپولوژی شبکه، مالکیت زیرساخت، مقیاس‌پذیری و ملاحظات اجرایی تعیین و راه کارهای ارتباطی براساس این معیارها به‌صورت تطبیقی ارزیابی شدند. برای تهیهٔ جداول مقایسه‌ای، اطلاعات فنی و اجرایی از منابع متعدد استخراج، تطبیق و تلفیق شد و مقادیر متداول یا نماینده برای مقایسهٔ راه کارهای ارتباطی گزارش شد. در نهایت، با تحلیل نتایج مقایسه، منطق طراحی چارچوب تصمیم‌یار مفهومی برای انتخاب راه‌کار ارتباطی مناسب تدوین شد.

یافته‌ها

شبکه گسترده دوربرد

شبکه گسترده دوربرد یک پروتکل شبکهٔ کم‌مصرف و برد بلند است^۴ که بر فناوری فیزیکی بلندبرد مبتنی برشبکه گسترده کم‌مصرف اجرا می‌شود و به‌دلیل مصرف کم انرژی و برد ارتباطی طولانی، برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با تعداد زیاد گره^۵ های اینترنت اشیاء مناسب است. برد ارتباطی شبکه گسترده دوربرد در مناطق باز و حومهٔ شهری تا حدود ۱۵ کیلومتر گزارش شده است. مصرف انرژی تجهیزات مبتنی بر فناوری بلندبرد بسیار پایین است به‌طوری‌که گره‌های حسگر می‌توانند، بسته به الگوی ارسال داده و شرایط کاری، برای مدت‌زمان طولانی با استفاده از باتری‌های لیتیون-یون قابل شارژ^۶ (مانند سلول‌های رایج ۱۸۶۵۰ و ظرفیت معمول ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ میلی‌آمپر ساعت) و با پشتیبانی از شارژ محلی یا شارژ خورشیدی، بدون نیاز به منبع تغذیهٔ دائمی کار کنند (جمشیدی و همکاران، ۲۰۲۵؛ جمشیدی و همکاران، ۱۴۰۴).

شبکه گسترده دوربرد به زیرساخت کمی نیاز دارد و به‌دلیل پوشش‌دهی گسترده، برای محیط‌های باز مانند باغ‌ها به‌ویژه در مناطق دورافتاده و با دسترسی محدود به برق، مناسب است. هوشمندسازی باغ‌ها مستلزم جمع‌آوری داده‌های چندشاخصی شامل دما و رطوبت نسبی هوا، شدت نور، دما و رطوبت خاک، و شاخص‌های هواشناسی است و شبکه گسترده دوربرد، برای انتقال داده‌های این حسگرها گزینه‌ای مناسب است (ژانگ^۷ و همکاران، ۲۰۲۳).

باتوجه به برد بلند، مصرف انرژی پایین، استقلال از کارورهای مخابراتی و هزینهٔ مناسب پیاده‌سازی، شبکه گسترده دوربرد یکی از گزینه‌های ایده‌آل برای پایش بلندمدت شاخص‌های محیطی،

- Wi-Fi HaLow
- Low Power Wide Area Network Unlicensed (LPWAN Unlicensed)
- Cellular LPWAN
- LoRa (long Range)
- Node
- Rechargeable Lithium-Ion Batteries
- Zhang

^[1] Smart Agriculture (SA)

^[2] Intrenet of Things (IOT)

^[3] Wireless Sensor Networks (WSN)

^[4] Low Power Wide Area Network (LPWAN)

^[5] Long Range Wide Area Network

^[6] Sigfox

^[7] Zigbe

^[8] Cellular Communication Technologies

^[9] Long Term Evolution (LTE)

^[10] Narrowband IoT (NB-IoT)

^[11] Short Range Local Networks

^[12] Bluetooth

^[13] Near-field Communications (NFC)

^[14] Jamshidi

^[15] Communication Range

سامانه‌های هوشمند آبیاری و پیش‌آگاهی آفات و بیماری‌ها در باغ‌ها است. این ویژگی‌ها، زمینه را برای کاربردهای عملی موفق فراهم می‌کنند.

به‌عنوان نمونه، سامانهٔ هوشمند مدیریت باغ سیب مبتنی بر اینترنت اشیاء و پروتکل ارتباطی شبکه گسترده دوربرد با به‌کارگیری حسگرهای متعدد برای جمع‌آوری داده‌هایی ازجمله دما و رطوبت نسبی هوا، دما، رطوبت و هدایت الکتریکی خاک، و برای پیش‌آگاهی بیماری و آفت، مدیریت رشد، تغذیه و آبیاری توسعه یافته است (جمشیدی و همکاران، ۲۰۲۵؛ جمشیدی و همکاران، ۱۴۰۴). استفاده از این سامانه می‌تواند خسارت ناشی از آفت و بیماری، تعداد نوبت‌های سم‌پاشی، مصرف نهاده‌ها و هزینه‌های تولید را کاهش، و کیفیت محصول را افزایش دهد.

نمونهٔ دیگری در باغ هلو وجود دارد که با استفاده از سامانهٔ هوشمند آبیاری مبتنی بر اینترنت اشیاء و پروتکل شبکه گسترده دوربرد طراحی شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج به‌کارگیری این سامانه نشان می‌دهد که آبیاری دقیق، کیفیت و عملکرد محصول را افزایش و هزینه‌های تولید را کاهش داده است.

سامانهٔ هوشمند دیگری مبتنی بر اینترنت اشیاء در باغ هلو توسعه یافته است که با استفاده از حسگرهای متعدد، پروتکل شبکه گسترده دوربرد و نظارت‌کننده‌های پی آی دی، می‌تواند بر پاشش آب نظارت کرده و اختلاف دمای روز و شب را در مرحلهٔ رسیدگی میوه تنظیم کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). پیاده‌سازی این سامانه کیفیت محصول را بهبود بخشیده و عملکرد آن را افزایش داده است.

این نمونه‌ها نشان می‌دهند که شبکه گسترده دوربرد با برد طولانی، مصرف انرژی پایین و قابلیت اتصال چندین حسگر، گزینه‌ای مناسب و عملی برای هوشمندسازی باغ‌ها مبتنی بر اینترنت اشیاء است.

اینترنت اشیاء باند باریک

اینترنت اشیاء باند باریک یک راه‌کار ارتباطی سلولی شبکه گسترده کم‌مصرف و باند باریک است که به‌عنوان بخشی از خانوادهٔ LTE/4G در سازمان استانداردسازی 3GPP توسعه یافته است. این فناوری با هدف پشتیبانی از کاربردهای اینترنت اشیاء، ازنظر پیچیدگی، هزینه و مصرف انرژی، ساده‌سازی شده و بسیاری از قابلیت‌های پیشرفتهٔ فناوری LTE را حذف کرده است. اینترنت اشیاء باند باریک برای ارسال داده‌های کم‌حجم با قابلیت اطمینان بالا، تأخیر^۱ قابل قبول و پوشش گسترده طراحی شده است و از زیرساخت شبکه‌های کارورهای تلفن همراه بهره می‌برد (3GPP، ۲۰۱۹–۲۰۱۶؛ چن^۲ و همکاران، ۲۰۱۷؛ حسینی^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). این ویژگی در مناطق شهری و روستایی، به‌ویژه مناطق دورافتاده (مشروط به وجود پوشش شبکهٔ سلولی) پوشش مناسبی را فراهم می‌آورد.

از دیگر مزایای اینترنت اشیاء باند باریک می‌توان به امنیت بالا، پایداری ارتباط و مصرف انرژی نسبتاً پایین اشاره کرد که امکان عملکرد طولانی‌مدت تجهیزات مبتنی بر باتری را فراهم می‌کند. به همین دلیل، این فناوری برای ارسال داده‌های حساس و مهم در کاربردهای پایش از راه دور مناسب است. از این رو، پایش شرایط محیطی باغ‌ها به‌ویژه در مناطق دورافتاده روستایی و برای اندازه‌گیری از راه دور، از کاربردهای این فناوری ارتباطی است. بنابراین، اینترنت اشیاء باند باریک به‌عنوان یکی از گزینه‌های ارتباطی کم‌مصرف در کاربردهای اینترنت اشیاء در حوزهٔ کشاورزی هوشمند موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است (والچه^۴ و همکاران، ۲۰۲۰؛ میگابو^۵ و همکاران، ۲۰۲۰).

در مطالعات کاربردی، سامانه‌های آبیاری و پایش محیطی برپایهٔ اینترنت اشیاء باند باریک، برای محیط‌های کشاورزی طراحی و

- Latency
- Chen
- Hosseini
- Valecce
- Migabo

آزمایش شده‌اند. این سامانه‌ها داده‌های محیطی کم‌حجم مانند رطوبت خاک و دما را با مصرف انرژی پایین و پوشش گسترده شبکهٔ سلولی به رایانه خدمت‌دهنده^۱ یا سکوی ابری^۲ منتقل و امکان پایش دقیق و مدیریت هوشمند منابع آب را فراهم می‌کنند (وانگ^۳، ۲۰۲۶).

به‌عنوان نمونه‌ای دیگر، یک سامانهٔ مبتنی بر اینترنت اشیاء باند باریک برای پایش شرایط محیطی باغ هلو توسعه یافته است که با استفاده از حسگرهای متعدد و اتصال سلولی پایدار، داده‌های دما و رطوبت نسبی هوا، رطوبت خاک، و شدت نور را جمع‌آوری و پردازش می‌کند. این سامانه با پوشش عمیق و هزینهٔ نسبتاً پایین، مشکلات پایش از راه دور در باغ‌های پراکنده و سنتی هلو را کاهش می‌دهد و امکان مدیریت مؤثر منابع آب و نظارت بر رشد محصول را فراهم می‌کند (شن^۴ و همکاران، ۲۰۲۲).

با توجه به ویژگی‌های اینترنت اشیاء باند باریک، این فناوری برای کاربردهایی که به ارسال داده‌های کم‌حجم، مطمئن و با امنیت مناسب نیاز دارند و امکان دسترسی به شبکهٔ سلولی نیز وجود دارد، برای هوشمندسازی باغ‌های دورافتاده گزینه مناسبی است.

وای‌فای هالو

وای‌فای هالو یک راه‌کار ارتباطی کم‌مصرف و برد متوسط است که برپایهٔ استاندارد IEEE 802.11ah توسعه یافته و به‌طور ویژه برای کاربردهای اینترنت اشیاء طراحی شده است. برخلاف شبکه‌های وای‌فای رایج خانگی و اداری، وای‌فای هالو از ابتدا برای حسگرها و تجهیزات کم‌مصرف در محیط‌های باز توسعه یافته است و به‌عنوان پلی بین وای‌فای پرسرعت و پروتکل‌های کم‌مصرف اینترنت اشیاء عمل می‌کند. وای‌فای هالو از باند فرکانسی زیر یک گیگاهرتز استفاده می‌کند و با ترکیب برد مناسب، مصرف انرژی پایین، و نرخ دادهٔ قابل‌قبول، امکان انتقال داده‌های محیطی در سامانه‌های هوشمند باغ را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که وای‌فای هالو برای باغ‌های متوسط و محیط‌های باز که به نرخ دادهٔ بالاتر و تأخیر کم‌تری نیاز دارند، در کاربردهای

اینترنت اشیاء گزینه مناسبی باشد (IEEE، ۲۰۱۶؛ بانوس–گونزالس^۵ و همکاران، ۲۰۱۶)

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که وای‌فای هالو می‌تواند اتصال بی‌سیم پایدار، برد مناسب و مصرف انرژی کم را برای شبکه‌های گستردهٔ اینترنت اشیاء فراهم کند. به‌عنوان نمونه، آزمایش‌های میدانی مقایسه‌ای وای‌فای هالو و فناوری بلندبرد در محیط‌های واقعی، عملکرد این راه‌کار در برد ارتباطی و نرخ داده^۶ را بررسی کرده و نشان داده‌اند که وای‌فای هالو در مقایسه با فناوری بلندبرد عملکرد امیدوارکننده‌ای ارائه می‌دهد (کین^۷ و همکاران، ۲۰۲۳). هم‌چنین، گزارش‌های کاربردی نشان می‌دهند که در کاربردهای هوشمندسازی مبتنی بر اینترنت اشیاء در برنامه‌های کشاورزی هوشمند، وای‌فای هالو کارایی مناسبی دارد (Wireless Broad-band Alliance، ۲۰۲۴؛ احمد^۸ و همکاران، ۲۰۲۳).

دستاوردها

مقایسهٔ فنی راه‌کارهای ارتباطی

جدول ۱، مشخصات فنی شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیاء باند باریک و وای‌فای هالو را مقایسه می‌کند. این جدول ویژگی‌هایی مانند نوع شبکه، باند فرکانسی، برد ارتباطی، نرخ داده، تأخیر، مصرف انرژی، توپولوژی^۹ و مالکیت شبکه را برای هر راه‌کار ارتباطی ارائه می‌کند.

براساس جدول ۱، شبکه گسترده دوربرد به‌عنوان یک فناوری شبکه گسترده کم‌مصرف غیرسلولی، برد ارتباطی بسیار طولانی و مصرف انرژی بسیار کمی دارد ولی نرخ دادهٔ آن محدود است.

اینترنت اشیاء باند باریک، یک فناوری سلولی شبکه گسترده کم‌مصرف است که تحت پوشش شبکهٔ‌کارور^۱ عمل می‌کند،

- Server
- Cloud Platform
- Wang
- Shen
- Baños-Gonzalez
- Data Rate
- Kane
- Ahmed
- Topology
- Operator

برد متوسط و نرخ دادهٔ کم دارد، و تأخیر آن کم‌تر از شبکه گسترده دوربرد است. در مقابل، وای‌فای هالو در باند فرکانسی زیر ۱ گیگاهرتز عمل می‌کند و با نرخ دادهٔ بالاتر و تأخیر کم‌تر، عملکرد بهتری برای انتقال داده‌های زمان ـ واقعی^۱ ارائه می‌دهد، هرچند برد آن نسبت به شبکه گسترده دوربرد محدودتر است.

 جدول ۱– مقایسهٔ فنی شبکه گسترده دوربرد ، اینترنت اشیاء باند باریک، ووای‌فای هالو* (PPG3،۲۰۱۶–۲۰۱۶؛ چین و همکاران،۲۰۱۷؛ حسینی و همکاران،۲۰۱۸؛ IEEE،۲۰۱۶؛ کین و همکاران،۲۰۲۳؛ نورا^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ وسیم^۳ و همکاران،۲۰۲۵؛ راستوگی^۴ و همکاران، ۲۰۲۰)

ویژگی	شبکه گسترده دوربرد	اینترنت اشیاء باند باریک	وای‌فای هالو
نوع شبکه	شبکه گسترده کم‌مصرف غیرسلولی	شبکه گسترده کم‌مصرف سلولی	WLAN کم‌مصرف
باند فرکانسی	بدون مجوز (Sub-GHz)	مجوزدار (LTE band)	بدون مجوز (Sub-GHz)
برد ارتباطی (m)	<i>تا</i> ۱۵۰۰۰	تا ۱۰۰۰۰	تا ۱۰۰۰
نرخ داده	۵۰ kbps – ۰/۳ (بسیار کم)	۲۵۰ kbps (کم)	تا ۳۰۰ Mbps (متوسط)
تأخیر	~ ۱ تا ۱۶ ثانیه (زیاد)	~ ۱/۵ تا ۱۰ ثانیه (متوسط)	ده‌ها میلی‌ثانیه (کم)
مصرف انرژی	بسیار کم	کم	کم تا متوسط
توپولوژی	ستاره‌ای/مش	ستاره‌ای	ستاره‌ای
مالکیت شبکه	خصوصی/عمومی	کارورمحور	خصوصی
استاندارد	LoRa Alliance	3GPP Rel-13+	IEEE 802.11ah

^{*}مقادیر و ارزیابی‌های ارائه‌شده در این جدول حاصل تحلیل و تلفیق اطلاعات استخراج‌شده از منابع علمی و مستندات فنی معتبر است.

مقایسهٔ فنی شبکه گسترده دوربرد

این مقایسهٔ فنی، پایه‌ای برای تحلیل تناسب این راه‌کارهای ارتباطی با نیازهای عملی هوشمندسازی باغ‌ها برپایهٔ اینترنت اشیاء فراهم می‌کند که در ادامه بررسی شده است.

تحلیل کاربردی راه‌کارهای ارتباطی

در جدول ۲، راه‌کارهای ارتباطی شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیاء باند باریک و وای‌فای هالو از نظر کاربردی برای هوشمندسازی باغ‌ها مقایسه شده‌اند. معیارهای این جدول شامل پوشش سطح باغ‌های بزرگ، وابستگی به زیرساخت کارور، هزینهٔ پیاده‌سازی، سهولت نگه‌داری، پشتیبانی از انتقال دادهٔ زمان ـ واقعی یا نزدیک به زمان ـ واقعی^۵، مقیاس‌پذیری شبکه و میزان بلوغ فناوری^۶ در کاربردهای واقعی کشاورزی است. منظور از انتقال دادهٔ نزدیک به زمان واقعی، انتقال داده با تأخیر در بازهٔ چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه است که برای

مقایسهٔ فنی شبکه گسترده دوربرد

- Real-time Data
- Noura
- Waseem
- Rastogi
- Near Real-time
- Technological Maturity

کاربردهای پایش و تصمیم‌یار در هوشمندسازی باغ‌ها کافی است و الزام زمانی سخت در سامانه‌های زمان ـ واقعی را ندارد.

 جدول ۲. مقایسهٔ کاربردی شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیاء باند باریک، ووای‌فای هالو* (PPG3،۲۰۱۹–۲۰۱۶؛ چن و همکاران،۲۰۱۷؛ حسینی و همکاران،۲۰۱۸؛ IEEE،۲۰۱۶؛ کین و همکاران،۲۰۲۳؛ احمد و همکاران، ۲۲۰۲؛ انریکو^۱ و گوستیانا^۲، ۲۲۰۲)

ویژگی	شبکه گسترده دوربرد	اینترنت اشیاء باند باریک	وای‌فای هالو
پوشش سطح باغ‌های بزرگ	بسیار مناسب (برد طولانی، پوشش گسترده)	مناسب (وابسته به پوشش شبکهٔ سلولی)	متوسط (برد محدود، مناسب باغ‌های متوسط)
هزینهٔ پیاده‌سازی	کم (شبکهٔ خصوصی قابل راه‌اندازی)	متوسط تا زیاد	متوسط
وابستگی به زیرساخت کارور	ندارد (قابل پیاده‌سازی خصوصی)	زیاد (وابسته به شبکهٔ سلولی)	(نیاز به سخت‌افزار وای‌فای هالو)
مناسب برای باغ‌های دورافتاده	بسیار مناسب	وابسته به پوشش شبکه	نسبتاً مناسب
پشتیبانی از داده زمان ـ واقعی	ضعیف (نرخ دادهٔ بسیار کم)	متوسط (نرخ دادهٔ بهتر از شبکه گسترده	قوی (نرخ دادهٔ بالا)
سهولت نگه‌داری	بالا (شبکهٔ خصوصی)	متوسط (وابسته به پوشش شبکهٔ سلولی)	متوسط
مقیاس‌پذیری تعداد حسگر	بسیار بالا (صدها/ هزاران گره در یک	بالا (چندصد/هزار گره تحت پوشش	متوسط (ده‌ها تا چندصد گره بسته به
مناسب برای پایش بلندمدت	بسیار مناسب	شبکهٔ سلولی)	معماری شبکه)
بلوغ فناوری و کاربرد در باغ‌ها	بالا	متناسب	نسبتاً مناسب
(مطالعات و کاربردهای عملی متعدد)	(برخی کاربردهای کشاورزی)	متوسط	در حال توسعه/ پذیرش اولیه

^{*} مقادیر و ارزیابی‌های ارائه‌شده در این جدول حاصل تحلیل و تلفیق اطلاعات استخراج‌شده از منابع علمی و مستندات فنی معتبر است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، شبکه گسترده دوربرد به دلیل برد ارتباطی طولانی و مصرف انرژی بسیار کم، و امکان پیاده‌سازی شبکهٔ خصوصی، پوشش گسترده و مقیاس‌پذیری بالایی را برای تعداد زیادی حسگر فراهم می‌کند.

این ویژگی‌ها، شبکه گسترده دوربرد را برای پایش بلندمدت شاخص‌های محیطی در باغ‌های بزرگ و پراکنده مناسب می‌سازد.
بالین‌حال، به‌دلیل نرخ دادهٔ محدود و سازوکارهای دسترسی به کانال، پشتیبانی از انتقال داده‌های زمان ـ واقعی در شبکه گسترده دوربرد محدود بوده و بیش‌تر برای کاربردهای پایش دوره‌ای مناسب است.
اینترنت اشیاء باند باریک به‌عنوان یک فناوری شبکه گسترده کم‌مصرف سلولی، از زیرساخت شبکهٔ کارور استفاده می‌کند و در مناطق دارای پوشش مناسب شبکه، قابلیت

^[1] Enriko

^[2] Gustiyana

رو برای کاربردهایی که نیازمند انتقال داده با حجم بیش تر یا پاسخ‌گویی نزدیک به زمان ـ واقعی هستند، گزینهٔ مناسبی است.

بااین‌حال، برد ارتباطی کوتاه‌تر و محدودیت در تعداد گره‌های قابل‌پشتیبانی در مقیاس بسیار بزرگ، استفاده از آن را عمدتاً به باغ‌های با وسعت متوسط یا برنامه‌های ترکیبی محدود می‌کند.

این مقایسهٔ کاربردی نشان می‌دهد که ویژگی‌های فنی ذاتی هر راه‌کار ارتباطی در محیط عملیاتی باغ‌ها، به قابلیت‌های کاربردی متفاوتی می‌انجامد. بنابراین، انتخاب راه‌کار ارتباطی مناسب برای هوشمندسازی باغ‌ها باید براساس ترکیبی از عوامل، شامل وسعت و پراکندگی باغ، شرایط محیطی و موانع فیزیکی، نوع داده‌های تولیدی (داده‌های حسگری کم‌حجم یا داده‌های تصویری با حجم بالا)، مصرف انرژی، هزینهٔ پیاده‌سازی، نیاز به انتقال زمان ـ واقعی و سهولت نگه‌داری، انجام شود. برد ارتباطی موردنیاز باید باتوجه به اندازه و گستردگی باغ، هم‌چنین محیط فیزیکی و موانع احتمالی، مصرف انرژی، هزینهٔ پیاده‌سازی، قابلیت پشتیبانی از دادهٔ زمان ـ واقعی و سهولت نگه‌داری انجام شود. بر این اساس، در باغ‌های بزرگ و پراکنده که هدف پایش بلندمدت با مصرف انرژی پایین است، شبکه گسترده دوربرد معمولاً گزینهٔ مناسب‌تری است. در مناطقی که پوشش شبکهٔ سلولی پایدار وجود دارد، اینترنت اشیاء باند باریک می‌تواند برای افزایش قابلیت اطمینان ارتباط، انتخاب مناسبی باشد. هم‌چنین در کاربردهایی که نیاز به انتقال داده با نرخ بالاتر یا پردازش نزدیک به زمان ـ واقعی و در شرایطی که نیاز به ارسال دادهٔ زمان ـ واقعی وجود دارد (مانند کاربردهای مبتنی بر دادهٔ تصویری یا سامانه‌های تصمیم‌یار سریع)، وای‌فای هالو می‌تواند گزینهٔ مناسب‌تری باشد یا در قالب معماری ترکیبی، در کنار فناوری‌های شبکه گسترده کم‌مصرف قرار گیرد.

یکی از دلایل کاربرد گستردهٔ فناوری‌های شبکه گسترده کم‌مصرف برای پایش هوشمند باغ‌ها این است که در محیط‌های دارای پوشش متراکم، فرکانس‌های Sub-GHz تضعیف کم‌تری نسبت به فرکانس‌های بالاتر دارند و در محیط‌های با موانع طبیعی مانند باغ‌های میوه، پوشش بهتری فراهم می‌کنند. وای‌فای هالو با

توجه به فرکانس نسبتاً بالاتر و طراحی برای شبکه‌های کم‌مصرف، برد محدودتری دارد و موانع می‌توانند عملکرد آن را کاهش دهند (انریکو و گوستیانا، ۲۰۲۴). تجربهٔ عملی پیاده‌سازی سامانهٔ هوشمند پایش و مدیریت باغ سیب مبتنی بر اینترنت اشیاء نیز نشان داده است که برای کاربردهای پایش بلندمدت محیطی، شبکه گسترده دوربرد به‌دلیل مصرف انرژی کم و پایداری ارتباط، عملکرد قابل اتکایی نسبت به راه‌کارهای با نرخ دادهٔ بالاتر دارد. در این کاربردها، انتقال دادهٔ نزدیک به زمان ـ واقعی کافی است و نیاز به ارتباط کاملاً زمان ـ واقعی وجود ندارد (جمشیدی و همکاران، ۲۰۲۵؛ جمشیدی و همکاران، ۱۴۰۴؛ جمشیدی و خباز جلفائی، ۱۴۰۳). با این‌حال، به دلیل محدودیت چرخهٔ کاری ^۱ و نرخ دادهٔ کم، شبکه گسترده دوربرد برای ارسال مداوم داده‌های حجیم مانند تصاویر، مناسب نیست.

اشاره به این نکته ضروری است که مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱، بر اساس مشخصات استاندارد‌ها و نتایج گزارش‌شده در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی استخراج شده و در شرایط عملی و محیط واقعی باغ ممکن است تحت تأثیر عوامل محیطی تغییر کنند. برد ارتباطی در شبکه‌های بی‌سیم اینترنت اشیاء به عواملی مانند شرایط انتشار امواج رادیویی، وجود موانع طبیعی نظیر درختان و ناهمواری‌های زمین، تراکم پوشش گیاهی، نویز محیطی، توان ارسال و نسل سخت‌افزار مورداستفاده وابسته است. ازسوی‌دیگر، میان برد ارتباطی، نرخ داده، مصرف انرژی و تأخیر، یک رابطهٔ مصالحه‌ای ^۲ وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که افزایش نرخ داده معمولاً با افزایش مصرف انرژی و کاهش برد ارتباطی همراه است. این ویژگی به‌ویژه در فناوری‌های شبکه گسترده کم‌مصرف مانند شبکه گسترده دوربرد و اینترنت اشیاء باند باریک که برای پوشش گسترده و مصرف انرژی پایین طراحی شده‌اند، به‌وضوح مشاهده می‌شود. هم‌چنین در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با تعداد

زیاد گره‌ها، احتمال برخورد بسته‌های داده ^۱ و نیاز به ارسال مجدد ^۲ وجود دارد که می‌تواند باعث افزایش تأخیر و کاهش توان عملی شبکه شود، به‌ویژه در فناوری‌هایی که از سازوکارهای دسترسی اشتراکی به کانال استفاده می‌کنند. بنابراین، عملکرد واقعی شبکه به شاخص‌هایی مانند چگالی گره‌ها، الگوی ارسال داده، و شرایط کانال ارتباطی وابسته است. بر این اساس، مقادیر ارائه‌شده در جدول مقایسهٔ فنی (جدول ۱) باید به‌عنوان بازه‌های مرجع درنظر گرفته شوند و انتخاب نهایی راه‌کار ارتباطی در کاربردهای هوشمندسازی باغ‌ها باید با توجه به شرایط محیطی، وسعت باغ، نوع داده‌های تولیدی (حسگری یا تصویری) و الزامات عملیاتی هر سامانه انجام شود (نورا و همکاران، ۲۰۲۰؛ طالب ^۳ و همکاران، ۲۰۲۱؛ مکی ^۴ و همکاران، ۲۰۱۹؛ آدلانتادو ^۵ و همکاران، ۲۰۱۷؛ رجب ^۶ و همکاران، ۲۰۲۳؛ کوی ^۷ و همکاران، ۲۰۲۲).

چارچوب تصمیم‌یار انتخاب راه‌کار ارتباطی

همان‌طور که گفته شد، انتخاب راه‌کار ارتباطی مناسب برای هوشمندسازی باغ‌ها باید براساس ترکیبی از عوامل مختلف انجام شود. بااین‌حال، برای تبدیل نتایج مقایسهٔ فنی (جدول ۱) و کاربردی (جدول ۲)، یک چارچوب تصمیم‌یار عملی، و یک درخت تصمیم ^۸ برای انتخاب راه‌کار ارتباطی کم‌مصرف مناسب برای هوشمندسازی باغ‌ها ارائه شده است (شکل ۱). این درخت تصمیم با در نظر گرفتن عواملی نظیر وسعت باغ، دسترسی به زیرساخت کارورر، نیاز به داده زمان ـ واقعی، مصرف انرژی و سطح استقلال شبکه، مسیر انتخاب بین شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیاء باند باریک و وای‌فای هالو را مشخص می‌کند.

لازم به ذکر است که درخت تصمیم ارائه‌شده، براساس عوامل تعیین‌کنندهٔ اولیه که بیش‌ترین تأثیر را بر انتخاب راه‌کار ارتباطی در مرحلهٔ طراحی شبکه دارند، طراحی شده است. برخی عوامل دیگر مانند هزینهٔ پیاده‌سازی، نوع داده‌های تولیدی (حسگری یا تصویری)، سیاست‌های مدیریتی بهره‌بردار، و محدودیت‌های اجرایی، و نیز الزامات مقرراتی و دسترسی به باندهای فرکانسی

مجاز، اگرچه در انتخاب نهایی مؤثر هستند، اما به‌دلیل وابستگی به شرایط پروژه، منطقهٔ جغرافیایی و تغییرپذیری بالا، در سطح تصمیم‌گیری ثانویه قرار می‌گیرند. از این‌رو، درخت تصمیم ارائه‌شده یک الگوی قطعی نیست بلکه یک راهنمای مفهومی است که به‌عنوان چارچوب تصمیم‌یار اولیه در نظر گرفته شده است و انتخاب نهایی راه‌کار ارتباطی می‌تواند با در نظر گرفتن سایر عوامل اشاره‌شده، در مرحلهٔ طراحی تفصیلی شبکه اصلاح شود.

در یک پیاده‌سازی میدانی سامانهٔ هوشمند پایش و مدیریت باغ سیب مبتنی بر اینترنت اشیاء، باتوجه‌به وسعت باغ (بیش از ۲۰ هکتار)، قرارگیری باغ در منطقه‌ای کوهستانی با دسترسی محدود به زیرساخت ارتباطی سلولی، و نبودِ نیاز به تبادل دادهٔ کاملاً زمان ـ واقعی در پایش بلندمدت محیطی، راه‌کار ارتباطی شبکه گسترده دوربرد انتخاب شد که با مسیر پیشنهادی درخت تصمیم ارائه‌شده انطباق دارد. ارزیابی عملکرد سامانه نشان داد که این راه‌کار با فراهم‌کردن مصرف انرژی پایین، پایداری مناسب ارتباط و کفایت نرخ تبادل داده برای پایش محیطی، امکان بهره‌برداری پایدار سامانه را فراهم کرده است (جمشیدی و همکاران، ۲۰۲۵؛ جمشیدی و همکاران، ۱۴۰۴؛ جمشیدی و خباز جلفائی، ۱۴۰۳).

^[1] Packet Collision

^[2] Retransmission

^[3] Taleb

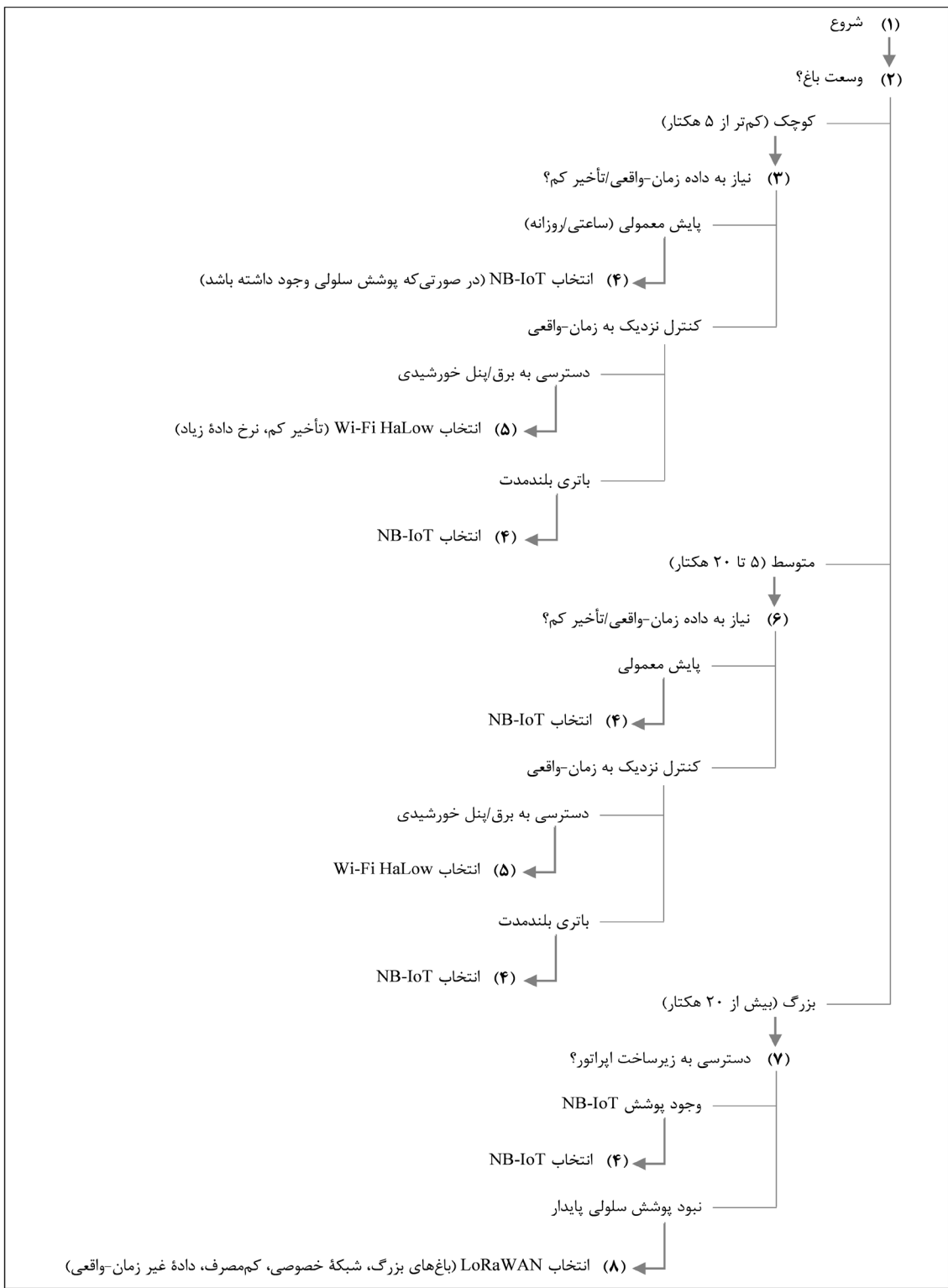
^[4] Mekki

^[5] Adelantado

^[6] Rajab

^[7] Quy

^[8] Decision Tree



شکل ۱. درخت تصمیم انتخاب راه‌کار ارتباطی کم‌مصرف مناسب برای هوشمندسازی باغ‌ها. (۱): شروع فرایند تصمیم‌گیری، (۲): بررسی وسعت باغ، (۳):

بررسی نیاز به داده زمان - واقعی/تأخیر کم در باغ کوچک، (۴): انتخاب اینترنت اشیاء باند باریک، (۵): انتخاب وای‌فای هالو، (۶): بررسی نیاز به داده زمان -

واقعی/تأخیر کم در باغ متوسط، (۷): بررسی دسترسی به زیرساخت کارور در باغ بزرگ، (۸): انتخاب شبکه گسترده دوربرد.

جمع‌بندی و توصیه‌ها

در این پژوهش، سه راه‌کار ارتباطی پرکاربرد در سامانه‌های اینترنت اشیاء، شامل شبکه گسترده دوربرد، اینترنت اشیاء باند باریک، و وای‌فای هالو با تمرکز بر هوشمندسازی باغ‌ها بررسی و مقایسه شد. نتایج مقایسه فنی نشان داد که هر یک از این راه‌کارها دارای ویژگی‌ها و محدودیت‌های مشخصی از نظر برد ارتباطی، نرخ داده، تأخیر و مصرف انرژی هستند و انتخاب هر یک به شرایط کاربردی، الزامات عملیاتی و محیط اجرای سامانه وابسته است.

براساس تحلیل کاربردی، شبکه گسترده دوربرد به دلیل مصرف انرژی پایین، امکان پیاده‌سازی شبکه خصوصی و پوشش مناسب، گزینه‌ای مناسب برای پایش محیطی در باغ‌های بزرگ و پراکنده است. در مقابل، اینترنت اشیاء باند باریک با بهره‌گیری از زیرساخت کارور، پوشش گسترده و قابلیت اطمینان بالا، برای پروژه‌هایی که نیازمند مدیریت متمرکز و مقیاس‌پذیری شبکه هستند، مناسب‌تر ارزیابی می‌شود. هم‌چنین، وای‌فای هالو با فراهم کردن نرخ داده بالاتر و تأخیر کم‌تر، می‌تواند در برنامه‌های نظارتی و مدیریت محلی باغ‌های کوچک و متوسط، به‌ویژه در صورت دسترسی به منبع انرژی پایدار، عملکرد مطلوبی داشته باشد.

لازم به ذکر است که در انتخاب راه‌کار ارتباطی در کاربردهای واقعی، علاوه بر شاخص‌های فنی، الزامات مقرراتی و دسترسی به باندهای فرکانسی مجاز نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. اینترنت اشیاء باند باریک، به‌عنوان یک فناوری مبتنی بر شبکه‌های سلولی، در باندهای فرکانسی مجوزدار عمل می‌کند و بهره‌برداری از آن به زیرساخت و سیاست‌های کارورهای تلفن همراه و مقررات ملی طیف فرکانسی وابسته است. ازسوی دیگر، وای‌فای هالو به‌دلیل نوظهور بودن و وابستگی به شرایط تخصیص باندهای Sub-GHz در کشورهای مختلف، هنوز در بسیاری از کاربردهای عملیاتی به‌صورت گسترده به کار گرفته نشده است. ازاین‌رو، انتخاب نهایی راه‌کار ارتباطی باید افزون بر معیارهای فنی، با

در نظر گرفتن شرایط مقرراتی و امکان‌پذیری اجرایی در محیط بهره‌برداری انجام شود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب یک راه‌کار ارتباطی واحد به‌عنوان راه‌حل برتر برای همه برنامه‌های هوشمندسازی باغ‌ها امکان‌پذیر نیست و تصمیم‌گیری باید براساس ترکیبی از شاخص‌های فنی و شرایط اجرایی انجام شود. در همین راستا، یک درخت تصمیم به‌عنوان چارچوب تصمیم‌یار ارائه شد که با در نظر گرفتن عواملی نظیر وسعت باغ، نیاز به تبادل داده نزدیک به زمان - واقعی، دسترسی به زیرساخت ارتباطی، مصرف انرژی و سطح استقلال شبکه، فرایند انتخاب راه‌کار ارتباطی مناسب را تسهیل کند. این چارچوب می‌تواند به‌عنوان راهنمای اولیه برای طراحان سامانه‌های هوشمندسازی باغ‌ها، شرکت‌های فناور فعال در این زمینه و بهره‌برداران استفاده شود و خطر انتخاب نادرست فناوری/ پروتکل ارتباطی در مراحل اولیه طراحی را کاهش دهد. این چارچوب پیشنهادی قابلیت توسعه در مطالعات آینده را دارد و می‌تواند با افزودن شاخص‌های کمی مانند هزینه کل مالکیت، قابلیت اطمینان شبکه و تحلیل عملکرد در مقیاس میدانی، تکمیل شود.

در پایان، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آتی بر اعتبارسنجی این چارچوب در شرایط واقعی بهره‌برداری و در مقیاس‌های مختلف باغی متمرکز شوند تا امکان تدوین الگوهای بومی انتخاب راه‌کار ارتباطی در سامانه‌های اینترنت اشیاء کشاورزی فراهم شود. هم‌چنین، انجام مطالعات تکمیلی با تمرکز بر تحلیل اقتصادی، ارزیابی هزینه چرخه عمر، و بررسی امکان‌پذیری اجرایی فناوری‌های ارتباطی در شرایط زیرساختی و اقتصادی ایران می‌تواند به توسعه چارچوب‌های تصمیم‌یار جامع‌تر و کاربردی‌تر برای هوشمندسازی باغ‌ها کمک کند.

منابع

- جمشیدی، ب.، محمدپور، کاظم، و فرازمند، حسین (۱۴۰۴). توسعه و ارزیابی سامانه هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا برای پیش‌آگاهی آفت کرم سیب در باغ با استفاده از شبکه حسگر بی‌سیم. *نشریه مکانیزاسیون کشاورزی*، دوره ۰۱، شماره ۳، صفحات ۳۰-۱۷.
- جمشیدی، ب.، و خباز جلفائی، حسین (۱۴۰۳). پیش‌آگاهی بیماری سفیدک پودری برای باغ‌های سیب بر پایه فناوری اینترنت اشیا. *مجله پژوهش‌های کاربردی در گیاه‌پزشکی*، دوره ۱۳، شماره ۴، صفحات ۳۵۸-۳۴۷.
- جمشیدی، ب.، و دهقانی‌سانج، ح. (۱۳۹۹). کلان داده‌های مبتنی بر اینترنت اشیا از چشم‌انداز کشاورزی هوشمند. *رشد فناوری*، دوره ۱۶، شماره ۳۶، صفحات ۲۲-۱۲.
- 3GPP. (2016–2019). *NB-IoT technical specifications*, Releases 13–15. 3rd Generation Partnership Project.
- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J. and Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications magazine*, 55(9), 34-40.
- Ahmed, N., Esposito, F., Okafor, O. and Shakoar, N. (2023). Softfarmnet: reconfigurable wi-fi halow networks for precision agriculture. *IEEE 12th International Conference on Cloud Networking (CloudNet)*. Hoboken, NJ, USA, Nov. 212-220.
- Baños-Gonzalez, V., Afaqui, M.S., Lopez-Aguilera, E. and Garcia-Villegas, E. (2016). IEEE 802.11 ah: A technology to face the IoT challenge. *Sensors*, 16.
- Chen, J., Hu, K., Wang, Q., Sun, Y., Shi, Z. and He, S. (2017). Narrowband internet of things: Implementations and applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), 2309-2314.
- Enriko, I.K.A. and Gustiyana, F.N. (2024). Wi-Fi HaLow: literature review about potential use of technology in agriculture and smart cities in Indonesia. *International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)*, Miri Sarawak, Malaysia, Jan. 277-281.
- Hosseini, T.Y., Fazel, Z. and Atarodi, S.M. (2018). A survey of two dominant low power and long range com-

- tions and future challenges in WBAN: A survey. *Wireless Networks*, 27(8), 5271-5295.
- Valecce, G., Petruzzi, P., Strazzella, S. and Grieco, L.A. (2020). NB-IoT for smart agriculture: Experiments from the field. *7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies CoDIT*, Prague, Czech Republic, Nov. 2020, pp. 71-75.
- Wang, Y. (2026). Design of a low-cost smart irrigation system based on NB-IoT for agriculture. *PloS one*, 21(1), e0339878.
- Waseem, M., Lopez, A., Carro, P.L., Losada, M.A., Richards, D. and Aziz, A. (2025). Understanding the potentials of narrowband Internet of Things (NB-IoT) cellular technology: Salient features, architecture, smart applications and quality of service (QoS) challenges. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 6, 6258–6280.
- Wireless Broadband Alliance. (2024). *Wi-Fi HaLow for IoT: Field Trials Report*. WBA IoT Work Group Whitepaper, Jul. [Online] Available: <https://wballiance.com/wi-fi-halow-for-iot-field-trials-report/>:contentReference[oaicite:2]{index=2}
- 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.
- Zhang, P., Wang, S., Bai, M., Bai, Q., Chen, Z., Chen, X., Hu, Y., Zhang, J., Li, Y. and Hu, X. (2022). Intelligent spraying water based on the internet of orchard things and fuzzy PID algorithms. *Journal of Sensors*, 2022(1), 4802280.

- munication technologies. *JIST*, 6(22), 60-66.
- IEEE. (2016). *IEEE Standard 802.11ah™-2016 – IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 2: Sub 1 GHz Operation*, IEEE.
- Jamshidi, B., Khabbaz Jolfaee, H., Mohammadpour, K., Seilsepour, M., Dehghanisanij, 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.
- Kane, L., Liu, V., McKague, M. and Walker, G. (2023). An experimental field comparison of Wi-Fi HaLow and LoRa for the smart grid. *Sensors*, 23(17), 7409.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. and Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT express*, 5(1), 1-7.
- Migabo, E.M., Djouani, K.D. and Kurien, A.M. (2020). The narrowband Internet of Things (NB-IoT) resources management performance state of art, challenges, and opportunities. *IEEE Access*, 8, 97658-97675.
- Noura, H., Hatoum, T., Salman, O., Yaacoub, J.P. and Chehab, A. (2020). LoRaWAN security survey: Issues, threats and possible mitigation techniques. *Internet of Things*, 12, 100303.
- Quy, V.K., Hau, N.V., Anh, D.V., Quy, N.M., Ban, N.T., Lanza, S., Randazzo, G. and Muzirafuti, A. (2022). IoT-enabled smart agriculture: architecture, applications, and challenges. *Applied Sciences*, 12(7), 3396.
- Rajab, H., Al-Amaireh, H., Bouguera, T. and Cinkler, T. (2023). Evaluation of energy consumption of LPWAN technologies. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2023, 118.
- Rastogi, E., Saxena, N., Roy, A. and Shin, D.R. (2020). Narrowband internet of things: A comprehensive study. *Computer networks*, 173, 107209.
- Shen, D., Chen, W., Liu, P. and Wang, Z. (2022). NB-IoT-based environmental monitoring system for peach orchard. *3rd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, Xi'an, China Jul. 2022, 1-4.
- Taleb, H., Nasser, A., Andrieux, G., Charara, N. and Motta Cruz, E. (2021). Wireless technologies, medical applica-

Comparative assessment of low-power communication technologies for smart orchards based on the Internet of Things: LoRaWAN, NB-IoT, and Wi-Fi HaLow

Bahareh Jamshidi¹, Mohammad Saleh Rostami², Jalil Taghizadeh Tameh³

1. Smart Agricultural Research department, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (Corresponding Author). Email: b.jamshidi@areeo.ac.ir.

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

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

Abstract

The evolution of smart agriculture is expanding with the use of new technologies such as the Internet of Things (IoT). One of the key areas in this regard is the design and development of smart systems for optimal management in orchards. Choosing the right communication solution is considered as one of the key factors in the success of IoT-based smart orchard systems. The diversity of low-power and long-range communication technologies has presented decision-making in this area with challenges such as differences in communication range, data rates, latency, energy consumption, operator infrastructure dependency, regulatory considerations, and implementation costs. In this study, three low-power IoT communication solutions, including LoRaWAN, NB-IoT, and Wi-Fi HaLow, were subjected to comparative evaluation with a focus on smart orchard applications. To this end, while introducing and examining the strengths and limitations of each solution, a technical comparison was conducted in terms of network type, frequency band, communication range, data rate, latency, energy consumption, network topology, and infrastructure ownership. Then, in a practical analysis, criteria such as coverage of large-scale orchards, operator dependency, ease of maintenance, scalability, and support for real-time data exchange were examined. The results showed that LoRaWAN is suitable for widespread and low-power monitoring in large-scale orchards without communication infrastructure; NB-IoT is suitable for systems requiring scalability and management based on operator infrastructure; and Wi-Fi HaLow is more suitable for local control and management scenarios requiring higher data rates and lower latency, provided that a stable energy source is available. Finally, to facilitate decision-making during the system design phase, a preliminary decision-support framework based on a decision tree was presented that transforms the results of technical comparison into a practical tool for selecting a communication solution in real smart orchard projects. Informed selection of a communication solution appropriate to the implementation conditions and project requirements can optimize energy consumption, reduce costs, and improve network stability in smart orchard systems.

Keywords: Internet of Things, LoRaWAN, Low-power Communication Technologies, NB-IoT, Precision Farming, Smart Agriculture, Smart Orchard, Wi-Fi HaLow.