

کاربرد اینترنت اشیاء در مدیریت محیط زیست

ماریا قهرمانی^{*۱}

Ghahremani.maria@gmail.com

فاطمه کرمی قهی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۶

چکیده

زمینه و هدف: اینترنت اشیاء مفهومی جدید در دنیای فناوری و ارتباطات است و به صورت خلاصه، فناوری مدرنی است که در آن برای هر موجودی (انسان، حیوان و یا اشیاء) قابلیت ارسال داده از طریق شبکه‌های ارتباطی فراهم می‌گردد و اشیای فیزیکی را با تکیه بر حسگرها، شبکه‌های ارتباطی و برنامه‌های اینترنتی به اشیای هوشمند تبدیل می‌کند. اینترنت اشیاء به عنوان یک پارادایم فناورانه نوین^۳، امکان اتصال و تبادل داده میان اشیای فیزیکی، انسان و سامانه‌های رایانه‌ای را در مقیاس وسیع فراهم کرده است. در سال‌های اخیر، این فناوری در پاسخ به چالش‌های محیط‌زیستی نظیر آلودگی هوا و آب، کمبود منابع آب و نیاز به کشاورزی پایدار، به شکل روزافزون مورد توجه قرار گرفته است. هدف این مقاله، تبیین مفهومی اینترنت اشیاء و مرور کاربردهای آن در پایش و مدیریت محیط زیست با تأکید بر حوزه‌هایی مانند کیفیت هوا، کیفیت آب، کشاورزی و شهر هوشمند است. در این مطالعه، با مرور مجموعه‌ای از منابع علمی منتخب، نمونه‌هایی از سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء شامل: شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۴، سامانه‌های آبیاری هوشمند، شبکه برق هوشمند و پروژه‌های کشاورزی دقیق بررسی شده‌اند.

روش بررسی: در این پژوهش، رویکرد کار مرور و جمع‌بندی مطالعات پیشین است. بدین منظور، ابتدا متون و مقالات مرتبط با اینترنت اشیاء در حوزه‌های مختلف محیط زیست گردآوری شد. در گام بعد، این منابع بر اساس نوع کاربرد و فناوری‌های به‌کاررفته دسته‌بندی و نتایج آن‌ها مقایسه و تحلیل شد.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان می‌دهد به‌کارگیری اینترنت اشیاء می‌تواند به پایش بلادرنگ پارامترهای محیط‌زیستی، کاهش مصرف منابع (به‌ویژه آب و انرژی) و بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی در مقیاس محلی و شهری کمک کند، هرچند چالش‌هایی مانند امنیت داده‌ها، یکپارچگی استانداردها و مصرف انرژی تجهیزات همچنان پابرجاست.

نتیجه‌گیری: نتیجه‌گیری کلی آن است که اینترنت اشیاء، در صورت توجه به اصول اینترنت اشیاء سبز^۵ و بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر رایانش لبه‌ای^۶ و هوش مصنوعی^۷، می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در جهت تحقق مدیریت پایدار محیط زیست به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: اینترنت اشیاء، محیط زیست، پایش محیطی، کشاورزی هوشمند، اینترنت اشیاء سبز.

^۱ کارشناس ارشد تجارت الکترونیک، مهندسی فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران * (مسوول مکاتبات)

^۲ کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، گرایش ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۳ New technological paradigm

^۴ Wireless Sensor Networks (WSN)

^۵ Green Internet of Things (GIoT)

^۶ Edge Computing

^۷ Artificial Intelligence

The application of the Internet of Things in environmental management

Masoud Moradi^{1*}

Ghahremani.maria@gmail.com

Shoaib Rahimi²

Accepted Date: September 7, 2023

Date Received: June 18, 2022

Abstract

Background and Objective: The Internet of Things (IoT) is an emerging concept in the world of technology and communications. In brief, it is a modern technology that enables any entity—whether human, animal, or object—to transmit data through communication networks, thereby transforming physical objects into intelligent ones through sensors, communication networks, and internet-based applications. As a new technological paradigm, IoT facilitates large-scale connectivity and data exchange among physical objects, humans, and computer systems. In recent years, this technology has increasingly attracted attention as a response to environmental challenges such as air and water pollution, water scarcity, and the need for sustainable agriculture. The objective of this paper is to conceptualize IoT and review its applications in environmental monitoring and management, with a focus on areas such as air quality, water quality, agriculture, and smart cities. This study reviews a collection of selected scholarly sources and examines examples of IoT-based systems, including wireless sensor networks, smart irrigation systems, smart grids, and precision agriculture projects.

Methods: This research follows a review-based approach that synthesizes previous studies. First, texts and articles related to IoT in various environmental domains were collected. Then, these sources were categorized based on their applications and the technologies employed, and their findings were compared and analyzed.

Findings: The results indicate that employing IoT can contribute to real-time monitoring of environmental parameters, reduction in resource consumption (particularly water and energy), and improved management decisions at local and urban levels. However, challenges such as data security, standardization, and device energy consumption remain significant concerns.

Conclusion: Overall, the findings suggest that IoT—if developed in line with green IoT principles and combined with technologies such as edge computing and artificial intelligence—can serve as an effective tool for achieving sustainable environmental management.

Keywords: Internet of Things (IoT), environment, environmental monitoring, smart agriculture, green IoT.

¹ MSc in Electronic Commerce, Information Technology Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran * (Corresponding Author)

² MSc in Environmental Engineering, Assessment and Land Planning, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran

۱- مقدمه:

اینترنت اشیا یکی از تحولات مهم دهه‌های اخیر در دنیای فناوری و ارتباطات است. در حقیقت «اینترنت اشیا» به فناوری‌ای گفته می‌شود که در آن برای هر یک از موجودات اعم از انسان، حیوان و انواع اشیای فیزیکی، قابلیت ارسال و دریافت اطلاعات از طریق کانال‌های ارتباطی مانند اینترنت یا اینترنت فراهم می‌شود و مهم‌ترین ره‌آورد آن، امکان اتصال تقریباً همه اشیا و وسایل به دنیای مجازی است.

با گسترش استفاده از تلویزیون‌ها، گوشی‌های همراه و رایانه‌های متصل به شبکه، ایده اتصال طیف وسیع‌تری از تجهیزات و اشیا به اینترنت به تدریج عملی شده و زمینه شکل‌گیری اینترنت اشیا را فراهم کرده است. افزایش شمار این ابزارهای متصل با سرعتی غیرقابل پیش‌بینی، باعث شده است که اینترنت اشیا در حوزه‌هایی مانند خانه‌های هوشمند، سیستم‌های کنترل و نظارت^۱ HVAC، حمل‌ونقل، سلامت، اتوماسیون صنعتی و مدیریت شرایط اضطراری جایگاه ویژه‌ای پیدا کند و کیفیت زندگی را در بسیاری از بخش‌ها بهبود بخشد.

در این رویکرد، اینترنت اشیا به اشیای فیزیکی اجازه می‌دهد «بشنوند»، «حس کنند»، «تصور کنند» و با استفاده از حسگرها و عملگرها، اطلاعات را جمع‌آوری کرده، به اشتراک بگذارند و تصمیمات را هماهنگ کنند. به این ترتیب، اشیا با تکیه بر فناوری‌هایی مانند محاسبات فراگیر، ابزارهای تعبیه‌شده، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، پروتکل‌های ارتباطی و برنامه‌های اینترنتی، از قالب‌های سنتی به اشیای هوشمند تبدیل می‌شوند. این اشیای هوشمند همراه با وظایف مشخص، برنامه‌های کاربردی حوزه‌ای (بازارهای عمودی) را پشتیبانی می‌کنند، در حالی که خدمات تحلیلی و پلتفرم‌های مشترک، نقش بازارافقی و مستقل از حوزه را بر عهده دارند؛ مفهومی که در شکل ۱ نیز به صورت شماتیک نشان داده شده است.

در طول زمان، از IoT انتظار می‌رود که نقشی برجسته در برنامه‌های تجاری و خانگی و محیط زیستی داشته باشد تا کیفیت زندگی را بهبود بخشد و رشد اقتصاد جهانی را موجب شود و سبب ارتقا عملکردهای محیط زیستی خواهد شد. برای مثال، خانه‌های هوشمند قادر به بازکردن خودکار درب گاراژ در زمان رسیدن به خانه، آماده سازی قهوه، کنترل هوای خانه، تلویزیون و برنامه‌های دیگر خواهند بود. برای تحقق این رشد بالقوه، فناوری‌ها و نوآوری‌های نوظهور و برنامه‌های خدماتی نیازمند رشد نسبی برای تطابق با تقاضای بازار و نیازهای مشتریان هستند. علاوه بر این، ابزارها نیازمند توسعه برای

تناسب با نیازهای دسترسی مکانی و زمانی می‌باشند. همچنین، پروتکل‌های جدیدی برای سازگاری ارتباطی بین اشیای ناهمسان (موجودات زنده، وسایل نقلیه، گوشی‌های هوشمند، لوازم خانگی، کالاها و غیره) مورد نیاز است.

با وجود این مزایا، پیاده‌سازی گسترده اینترنت اشیا در محیط زیست با چالش‌هایی مانند محدودیت منابع انرژی در گرهِای حسگر، نیاز به مقیاس‌پذیری و پایداری شبکه، مسائل امنیت و حریم خصوصی داده‌ها، نبود استانداردهای یکپارچه و پیچیدگی مدیریت حجم بالای داده، مواجهه است. در سال‌های اخیر، رویکردهایی همچون اینترنت اشیا سبز، رایانش لبه‌ای و بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های محیطی به عنوان مسیرهایی برای افزایش کارایی، کاهش مصرف انرژی و ارتقای دقت و سرعت تصمیم‌گیری مطرح شده‌اند. شناخت صحیح این مفاهیم و تجارب حاصل از پیاده‌سازی سامانه‌های واقعی می‌تواند به سیاست‌گذاران، مدیران و پژوهشگران در انتخاب راهکارهای مناسب و طراحی معماری‌های کارآمد کمک کند.

علاوه بر این، استانداردسازی ساختاری می‌تواند به عنوان ستون فقرات اینترنت اشیا برای ایجاد یک محیط رقابتی سالم میان شرکت‌ها و ارائه محصولات و خدمات با کیفیت در نظر گرفته شود. همچنین، معماری سنتی اینترنت برای تطابق با الزامات اینترنت اشیا نیازمند بازنگری و تکامل است؛ زیرا تعداد بسیار زیادی از اشیای متصل باید در لایه‌های مختلف پروتکل‌ها و سامانه‌های مدیریت شبکه پشتیبانی شوند. به همین دلیل، استفاده از فضاهای آدرس‌دهی گسترده مانند پروتکل اینترنت نسخه ۶^۲ IPv6، به منظور پاسخ‌گویی به نیاز روزافزون برای اشیای هوشمند و خدمات مرتبط با آن‌ها، به یک ضرورت تبدیل شده است.

امنیت و حریم خصوصی نیز به دلیل ناهمگونی اشیا و توانایی این سامانه‌ها در نظارت و کنترل مستقیم اشیای فیزیکی، از مهم‌ترین نیازهای اینترنت اشیا به شمار می‌آید. علاوه بر این، مدیریت و پایش سامانه‌های اینترنت اشیا باید به گونه‌ای انجام شود که ضمن تضمین کیفیت خدمات ارائه‌شده، هزینه‌های پیاده‌سازی و بهره‌برداری در سطح قابل قبولی حفظ شود.

در چنین بستری، اینترنت اشیا فرصت‌های بازار قابل توجهی برای تولیدکنندگان تجهیزات، ارائه‌دهندگان خدمات ارتباطی و توسعه‌دهندگان برنامه‌های کاربردی، به‌ویژه در حوزه محیط زیست، ایجاد می‌کند. رشد اقتصادی خدمات مبتنی بر اینترنت اشیا برای کسب‌وکارها و همچنین برنامه‌های محیط‌زیستی و

^۱ Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)

^۲ Internet Protocol version 6 (IPv6)

کشاورزی و شهر هوشمند را بررسی می‌کند. در ادامه، برخی از چالش‌های فنی و مدیریتی پیش‌رو و فرصت‌های ناشی از تلفیق اینترنت اشیا با مفاهیمی نظیر اینترنت اشیا سبز، رایانش لبه‌ای و هوش مصنوعی مورد بحث قرار می‌گیرد تا تصویری روشن‌تر از ظرفیت‌ها و محدودیت‌های این فناوری در مسیر تحقق مدیریت پایدار محیط زیست ارائه شود.

تولیدی که به دنبال اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌تر هستند، بسیار حائز اهمیت است.

بر این اساس، مقاله حاضر با رویکردی مروری، به تبیین مفهومی اینترنت اشیا و معرفی اجزای اصلی آن پرداخته و سپس با تمرکز بر حوزه‌های محیط‌زیستی، نمونه‌هایی از کاربرد این فناوری در پایش و مدیریت کیفیت هوا، کیفیت آب،



شکل ۱. نمای کلی IoT با تاکید بر بازارهای عمودی و انسجام افقی بین آن‌ها.

Figure 1. IoT overview with emphasis on vertical markets and horizontal integration between them.

عمر شبکه و در دسترس بودن و کیفیت خدمات را نشان می‌دهد. [۱]
بسیلی و همکاران (۲۰۱۴) در قالب پروژه SAFEST، امنیت در اینترنت اشیا را با تمرکز بر حفاظت از مردم و زیرساخت‌های حیاتی بررسی کرده‌اند و سامانه‌ای توزیع‌شده مبتنی بر شبکه‌های حسگر ناهمگن (حسگرهای تصویری، تشخیص حرکت مادون‌قرمز غیرفعال PIR^۲، رادار، مغناطیسی، لرزه‌ای و آکوستیک) برای پایش محیطی و شناسایی تهدیدها ارائه داده‌اند. [۲]

ماچادو و همکاران (۲۰۱۳) استفاده از اینترنت اشیا را در حوزه‌های دانشگاهی، صنعتی، شهری و دولتی، از جمله بهداشت و درمان، نظارت بر محیط‌زیست و ساختمان‌های هوشمند مطرح کرده‌اند و نقش شبکه‌های حسگر بی‌سیم را در تحقق این کاربردها برجسته دانسته‌اند. با توجه به محدودیت انرژی، پردازش و حافظه در گره‌های حسگر و همچنین مشکلات نویز و تداخل در ارتباطات بی‌سیم، آن‌ها پروتکل مسیریابی REL^۱ را برای افزایش قابلیت اطمینان و بهره‌وری انرژی در شبکه‌های اینترنت اشیا پیشنهاد کرده‌اند که نتایج حاصل، افزایش طول

^۱ Routing protocol based on Reliability and Energy (REL routing protocol)

^۲ Passive Infrared Sensor (PIR)

مدیریت داده‌های محیطی برجسته می‌کنند. [۷]

ویسوشوارا راتو و همکاران (۲۰۲۵) از پژوهش‌ها بر به‌کارگیری اینترنت اشیا در کشاورزی هوشمند و مدیریت منابع آب تمرکز دارند. در این مطالعات، از حسگرهای رطوبت خاک، دما، رطوبت هوا و تابش خورشید به همراه سامانه‌های آبیاری هوشمند و پلتفرم‌های تحلیلی برای بهینه‌سازی مصرف آب، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد محصولات کشاورزی استفاده شده است. نتایج گزارش‌شده در این حوزه نشان می‌دهد که ترکیب شبکه‌های حسگر با راهکارهای کنترلی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه مصرف آب و افزایش بهره‌وری در مزارع و فضاهای سبز شهری شود. [۸]

میموس و همکاران (۲۰۲۰) در کنار توسعه کاربردها، مفهوم «اینترنت اشیا سبز» برای کاهش اثرات زیست‌محیطی خود زیرساخت‌های اینترنت اشیا مطرح شده است. این رویکرد با تأکید بر طراحی کم‌مصرف تجهیزات، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و بهینه‌سازی پروتکل‌های ارتباطی و مسیریابی، تلاش می‌کند مصرف انرژی و رد پای کربنی سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیا را کاهش دهد. همچنین، استفاده از رایانش لبه‌ای، برای پردازش محلی داده‌های حسگر و کاهش وابستگی به مراکز داده ابری، به‌عنوان راهکاری برای کاهش تأخیر، صرفه‌جویی در پهنای باند و مدیریت بهتر داده‌های محیطی پیشنهاد شده است. [۹]

اسدالله و میات (۲۰۲۵)، دسته‌ای از پژوهش‌های جدید نیز به ترکیب اینترنت اشیا با الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین پرداخته‌اند. در این مطالعات، داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرهای محیطی با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و طبقه‌بندی‌کننده تحلیل می‌شود تا امکان پیش‌بینی رخدادهایی مانند آلودگی شدید هوا، سیلاب، بیماری‌های گیاهی یا تغییرات غیرعادی در کیفیت آب فراهم شود. این نتایج نشان می‌دهد که همگرایی اینترنت اشیا و هوش مصنوعی می‌تواند ارزش افزوده قابل توجهی در سامانه‌های مدیریت محیط زیست ایجاد کند و تصمیم‌گیری را از سطح توصیفی به سمت تصمیم‌گیری پیش‌نگرانه سوق دهد. [۱۰]

۲- روش بررسی

این پژوهش با رویکرد مروری انجام شده و تمرکز آن بر معرفی اجزای اصلی زیرساخت اینترنت اشیا و نقش آن‌ها در کاربردهای محیط‌زیستی است. در این راستا، ابتدا فناوری‌های پایه‌ای مانند تشخیص فرکانس رادیویی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، روش‌های آدرس‌دهی، ذخیره‌سازی و تحلیل داده و مجازی‌سازی مرور شده و سپس ارتباط آن‌ها با سامانه‌های پایش و مدیریت محیط

گوتی و همکاران (۲۰۱۳) اینترنت اشیا را چشم‌اندازی می‌دانند که در آن اشیای ناهمگن مانند رایانه‌ها، حسگرها، برچسب‌های تشخیص فرکانس رادیویی^۱ RFID و تلفن‌های همراه می‌توانند با استفاده از طرح آدرس‌دهی^۲ IP مشترک، به صورت مؤثر برای دستیابی به اهداف مشترک همکاری کنند. تمرکز آن‌ها بر قابلیت اطمینان برنامه‌های اضطراری مبتنی بر اینترنت اشیا است و مکانیزم انرژی‌کاری AJIA را برای بازیابی بسته‌های از دست‌رفته و ارزیابی کیفیت مسیر در شبکه‌های بی‌سیم پیشنهاد کرده‌اند که از ویژگی شوند و توصیف کانال به‌عنوان سیگنال تأیید^۳ ACK ضمنی بهره می‌گیرد. [۳]

کورچادو و همکاران (۲۰۰۸) مجموعه‌ای از توصیه‌ها برای طراحی معماری شبکه‌های اینترنت اشیا با هدف افزایش قابلیت اطمینان انتقال بسته‌ها و طول عمر شبکه ارائه کرده‌اند و بر اهمیت مدیریت صحیح منابع در شبکه‌های متکی بر اشیای فیزیکی تأکید نموده‌اند. [۴]

استرادا و همکاران (۲۰۱۲) با طرح مفهوم معماری تکامل‌پذیر اینترنت^۴ EIA نشان داده‌اند که چگونه می‌توان هر جسم فیزیکی را به‌صورت یک «شیء هوشمند» در نظر گرفت و به بررسی سازوکارهای کنترلی و تعامل این اشیا در محیط‌های هوشمند پرداخته‌اند. [۵]

بارناقی و همکاران (۲۰۱۳) با توجه به رشد سریع سنسورها، ارتباطها و دستگاه‌های تلفن همراه، چارچوب سنسور جهانی مدیریت داده‌های حسگر^۵ GSN را برای مدیریت و انتزاع جریان داده‌های حسگر، به‌ویژه در کاربردهای مبتنی بر تلفن همراه، معرفی کرده‌اند که می‌تواند مبنایی برای توسعه کاربردهای محیط‌زیستی مبتنی بر اینترنت اشیا فراهم آورد. [۶]

گوربانوآ و عبدالله‌یف (۲۰۲۵) در سال‌های اخیر، مرورهای متعددی به‌طور خاص کاربرد اینترنت اشیا در پایش محیط زیست را بررسی کرده‌اند. در این مطالعات، سامانه‌های مبتنی بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای اندازه‌گیری پارامترهایی مانند کیفیت هوا، کیفیت آب، نویز محیطی و وضعیت اکوسیستم‌ها معرفی شده و نشان داده شده است که این سامانه‌ها می‌توانند دقت پایش و پوشش مکانی را نسبت به روش‌های سنتی به‌طور قابل توجهی افزایش دهند و امکان هشدارهای زودهنگام را فراهم کنند. این دسته از کارها، اهمیت معماری‌های چندلایه و یکپارچه‌سازی داده‌ها در بسترهای ابری یا لبه‌ای را برای

^۱ Radio Frequency Identification (RFID)

^۲ Internet Protocol (IP)

^۳ Acknowledgement (ACK)

^۴ Evolvable Internet Architecture (EIA)

^۵ Global Sensor Networks

زیست تبیین می‌شود. در ادامه، برای روشن‌تر شدن نحوه تعامل این اجزاء، از چند نمونه معماری رایج اینترنت اشیا استفاده شده است (شکل‌های ۱ و ۲).

۲-۱. لزوم استفاده از اینترنت اشیا

فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی در اینترنت اشیا، زیرساختی مشترک برای طیف وسیعی از خدمات مدیریتی، آموزشی، سلامت، امنیت عمومی و حمل‌ونقل فراهم می‌کنند. در این چارچوب، حسگرها و عملگرهای مختلف از طریق یک بستر ارتباطی و نرم‌افزاری واحد به یکدیگر متصل می‌شوند و امکان تبادل داده و کنترل از راه دور را در حوزه‌های مختلف، از خانه و شهر هوشمند تا کشاورزی و پایش محیط زیست، فراهم می‌سازند. توسعه چنین چارچوب‌های یکپارچه‌ای، تصویر اجرایی مشترکی ایجاد می‌کند که می‌تواند نوآوری و کارایی سامانه‌های محیط‌زیستی را افزایش دهد.

۲-۲. تشخیص فرکانس رادیویی RFID

فناوری RFID یکی از اجزای کلیدی در بسیاری از سامانه‌های اینترنت اشیا است و در نمونه‌های جاسازی‌شده ارتباطی که نیاز به شناسایی خودکار اشیا دارند، به‌طور گسترده به کار می‌رود. برچسب‌های RFID می‌توانند به‌صورت غیرفعال، انرژی مورد نیاز خود را از سیگنال‌های خوانشگر دریافت کنند و در نتیجه برای ردیابی و مدیریت دارایی‌ها، موجودی‌ها و تجهیزات محیط‌زیستی بدون نیاز به منبع تغذیه محلی استفاده شوند. برچسب‌های فعال RFID با بهره‌گیری از منبع تغذیه داخلی، امکان ارتباط سریع‌تر و برد بیشتر را فراهم می‌کنند و در کاربردهایی که نیاز به ارسال داده‌های بیشتر یا فاصله طولانی‌تر وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۳. شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN)

پیشرفت‌های اخیر در فناوری ارتباطات بی‌سیم، طراحی گره‌های حسگر کم‌هزینه، کوچک و کم‌مصرف را امکان‌پذیر کرده است. شبکه‌های حسگر بی‌سیم، متشکل از تعداد زیادی گره با توان پردازشی و ذخیره‌سازی محدود هستند که می‌توانند پارامترهای محیطی را اندازه‌گیری کرده و داده‌ها را به‌صورت چندپرسی به درگاه‌های تجمع ارسال کنند. در بسیاری از کاربردها، گره‌های حسگر فعال از نظر ساختار و توانایی، مشابه برچسب‌های RFID پیشرفته عمل می‌کنند و نقش ستون فقرات سامانه‌های پایش محیط زیست مبتنی بر اینترنت اشیا را بر عهده دارند.

توانایی شناسایی و آدرس‌دهی منحصربه‌فرد اشیا، پیش‌نیاز اصلی برای پیاده‌سازی اینترنت اشیا در مقیاس گسترده است. استفاده از طرح‌های آدرس‌دهی مبتنی بر پروتکل اینترنت، امکان شناسایی میلیون‌ها دستگاه و در نهایت کنترل و نظارت بر ابزارهای دوردست را از طریق شبکه فراهم می‌کند. در این میان، استفاده از پشته پروتکلی TCP/IP^۱ و نسخه‌های توسعه‌یافته آن، به‌ویژه IPv6، برای مسیریابی داده‌ها بین گره‌های حسگر، دروازه‌ها و پلتفرم‌های ابری، نقش مهمی در پایداری و مقیاس‌پذیری سامانه‌های محیط‌زیستی مبتنی بر اینترنت اشیا ایفا می‌کند.

۲-۵. ذخیره‌سازی و تحلیل داده

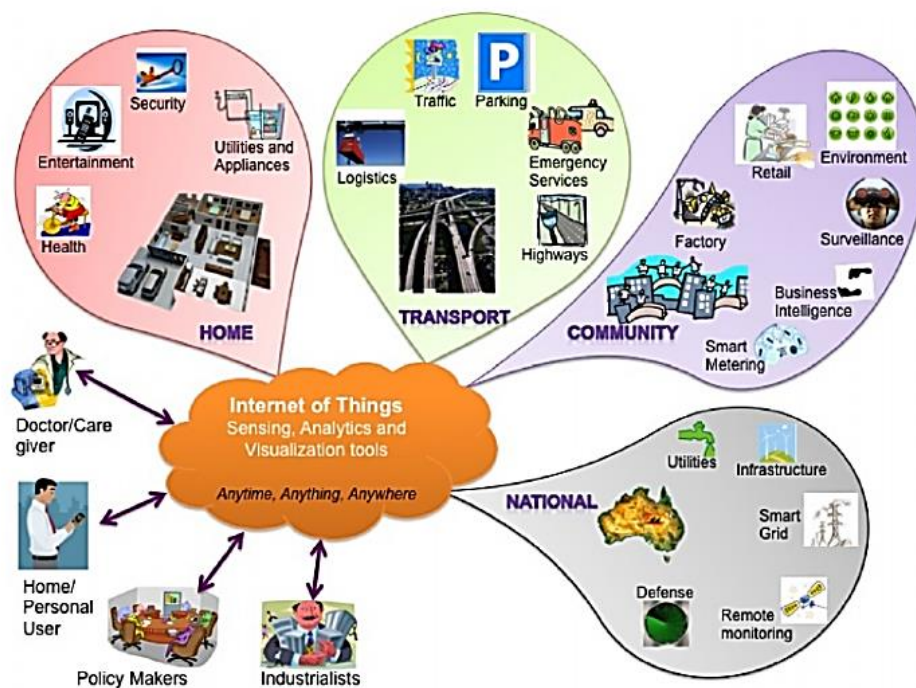
ذخیره‌سازی، مالکیت و چرخه عمر داده‌های تولیدشده توسط حسگرها از جنبه‌های حیاتی در سامانه‌های اینترنت اشیا است. داده‌ها باید به‌گونه‌ای هوشمند ذخیره و سازمان‌دهی شوند که امکان نظارت مستمر و اجرای تحلیل‌های مورد نیاز (از جمله شناسایی الگوها و رخداد‌های غیرعادی در محیط) فراهم شود. استفاده از زیرساخت‌های پردازش و ذخیره‌سازی ابری و همچنین پلتفرم‌های لبه‌ای، دسترسی مقیاس‌پذیر به منابع محاسباتی را ممکن می‌سازد و زمینه را برای به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته تحلیل داده و یادگیری ماشین در پایش محیط زیست فراهم می‌کند.

۲-۶. مجازی‌سازی و پلتفرم‌های ابری

مجازی‌سازی به عنوان یکی از ارکان اصلی محیط‌های ابری و هیبریدی، امکان تجمع و مدیریت انعطاف‌پذیر منابع محاسباتی و ذخیره‌سازی را برای کاربردهای اینترنت اشیا فراهم می‌کند. با استفاده از مجازی‌سازی، می‌توان خدمات مختلف را به‌صورت پویا بر روی زیرساخت‌های متنوع (ابر خصوصی، عمومی و لبه‌ای) استقرار داد و متناسب با نیازهای سامانه‌های محیط‌زیستی، آن‌ها را مقیاس داد. پیشرفت ابزارهای کاربرپسند مانند تبلت‌ها و تلفن‌های همراه هوشمند نیز دسترسی به این خدمات و توسعه برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا را برای مدیران و کاربران نهایی ساده‌تر کرده است.

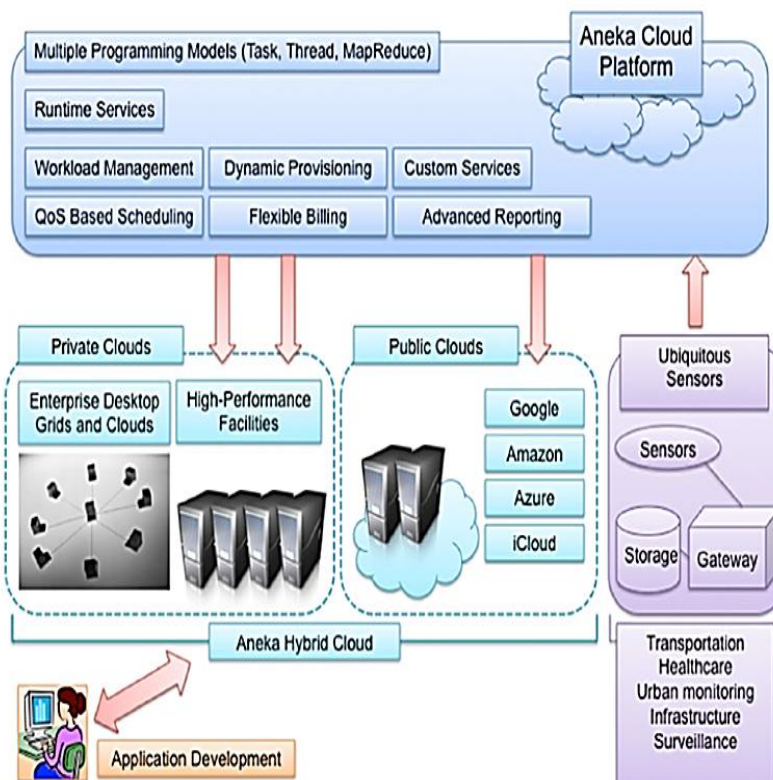
شکل ۱ شمای کلی اینترنت اشیا و حوزه‌های اصلی کاربرد آن را نشان می‌دهد و شکل ۲ نمونه‌ای از معماری یک سامانه اینترنت اشیا مبتنی بر حسگرها، درگاه‌های ارتباطی و پلتفرم ابری را برای استفاده در بخش‌هایی مانند حمل‌ونقل، سلامت، پایش شهری و نظارت بر محیط زیست نمایش می‌دهد.

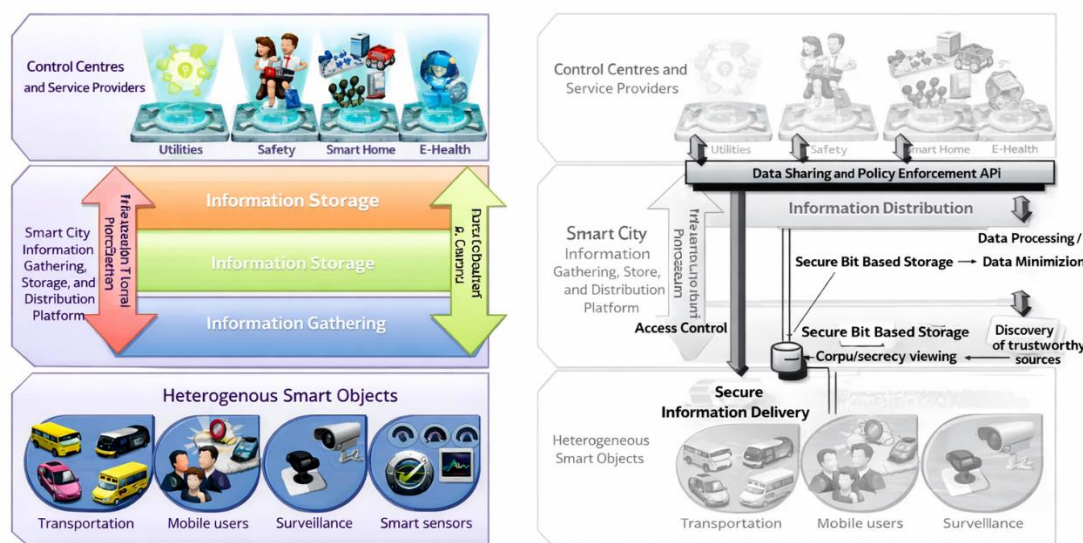
¹Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP)



شکل ۱: شمای کلی اینترنت اشیاء.

Figure 1: Overview of the Internet of Things.





شکل ۲: معماری سیستم اینترنت اشیاء.
Figure 2: Internet of Things system architecture.

۳- یافته ها

شهر هوشمند

یکی از اهداف اصلی فناوری شهر هوشمند، بهینه سازی جمع آوری، ذخیره سازی و تحلیل داده ها برای بهبود مدیریت شهری است. در این چارچوب، داده ها از منابع مختلفی همچون سامانه های حمل و نقل عمومی و خصوصی، حسگرهای ترافیک و پارکینگ، تجهیزات زیرساختی، دستگاه های تلفن همراه شهروندان و سامانه های نظارت تصویری سازمان های دولتی و خصوصی گردآوری می شود. این داده ها در پایگاه های داده متمرکز یا توزیع شده، شبکه های اجتماعی و سامانه های ذخیره سازی ابری نگهداری شده و از طریق پلتفرم های تحلیلی برای کاربردهایی مانند مدیریت ترافیک، ایمنی، مصرف انرژی و خدمات محیط زیستی به کار گرفته می شوند. شکل ۳ اجزای اصلی یک سیستم اطلاعات شهر هوشمند را نشان می دهد که در آن، عبور داده از مرزهای اداری مختلف و استفاده برای اهداف متنوع، ضرورت توجه ویژه به امنیت و حریم خصوصی را برجسته می سازد. در چنین سامانه هایی، طراحی پلتفرم ها باید به گونه ای باشد که مسیرهای تبادل داده از ابتدا با ملاحظات امنیت، کنترل دسترسی و حفاظت از حریم خصوصی کاربران و سازمان ها همراه باشد.

کاربردهای اینترنت اشیاء در محیط زیست

مطالعات و پروژه های مختلف در کشورهای گوناگون نشان داده اند که اینترنت اشیاء می تواند در طیفی از کاربردهای محیط زیستی به کار گرفته شود، از جمله:

تشخیص آتش سوزی جنگل: در این کاربرد، شبکه ای از حسگرها گازهای حاصل از احتراق، دما و رطوبت هوا را اندازه گیری می کنند و با تعریف آستانه ها و مناطق هشدار، امکان شناسایی زودهنگام آتش سوزی و ارسال هشدار به مراکز مدیریت بحران فراهم می شود (شکل ۳). این رویکرد می تواند زمان واکنش را کاهش داده و از گسترش حریق جلوگیری کند.

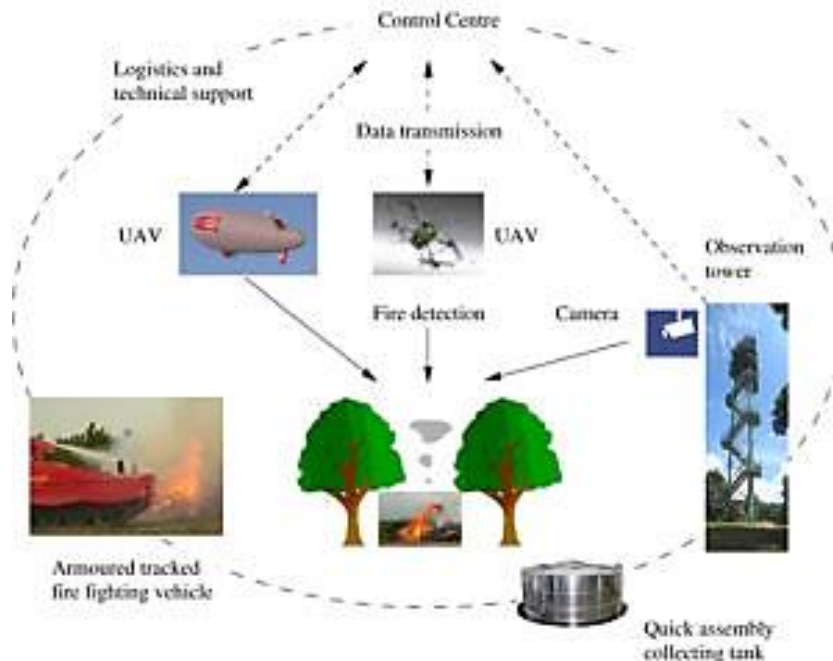
پایش آلودگی هوا: سامانه های اینترنت اشیاء با استفاده از حسگرهای گازهای آلاینده مانند CO₂ و سایر ترکیبات، میزان انتشار ناشی از کارخانه ها، خودروها و فعالیت های کشاورزی را پایش می کنند. داده های جمع آوری شده می تواند برای ارزیابی وضعیت کیفیت هوا، تدوین سیاست های کنترل انتشار و اطلاع رسانی به شهروندان استفاده شود.

نظارت بر برف، زمین لغزش و زلزله: اندازه گیری ارتفاع برف و شرایط آن برای ایمنی مسیرهای اسکی و پیشگیری از بهمن اهمیت دارد. همچنین، حسگرهای رطوبت خاک، ارتعاش و تراکم زمین می توانند الگوهای خطرناک را شناسایی و احتمال وقوع زمین لغزش را پیش بینی کنند. در برخی سامانه ها، آرایه های حسگر لرزه ای برای تشخیص زودهنگام زلزله در نقاط حساس به کار گرفته می شود تا امکان واکنش سریع فراهم شود.

نظارت بر آب آشامیدنی: در شهرها، حسگرهای کیفیت آب برای پایش پارامترهایی نظیر کدورت، هدایت الکتریکی، pH و برخی آلاینده ها در شبکه توزیع به کار می روند. این سامانه ها با ارسال داده های بلادرنگ، امکان شناسایی سریع آلودگی ها و انجام اقدامات اصلاحی را فراهم می کنند.

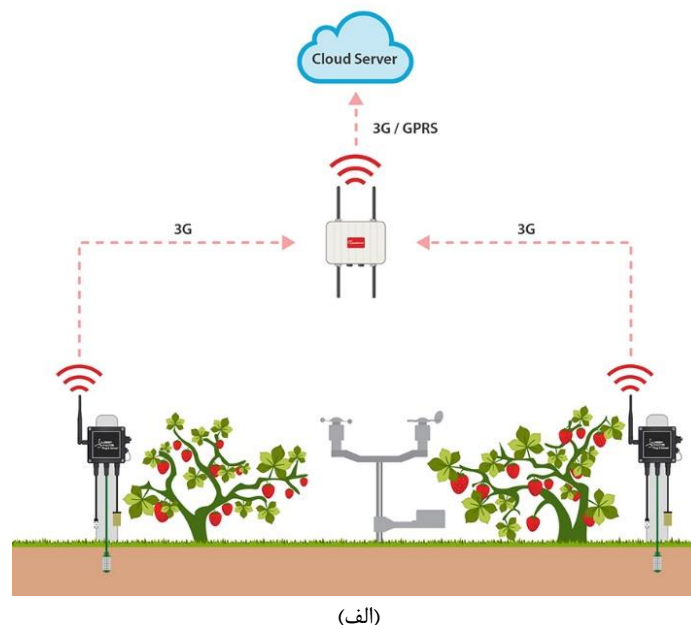
می‌دهد. داده‌های به‌دست‌آمده از طریق یک پورتال وب یا پلتفرم ابری در دسترس قرار می‌گیرد و بر اساس آن، سیستم آبیاری و تهویه به‌صورت خودکار تنظیم می‌شود. نتایج چنین طرح‌هایی حاکی از بهبود کیفیت محصول، کاهش زمان زراعت و کاهش ضایعات پس از برداشت است.

کشت توت‌فرنگی هوشمند: در برخی پروژه‌های کشاورزی دقیق، برای کشت توت‌فرنگی از شبکه‌ای از حسگرهای محیطی در گلخانه یا مزرعه استفاده می‌شود که پارامترهایی مانند دمای هوا، رطوبت، میزان تابش و رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کنند. شکل ۴ (الف) و (ب) نمونه‌ای از این سامانه‌ها را نشان

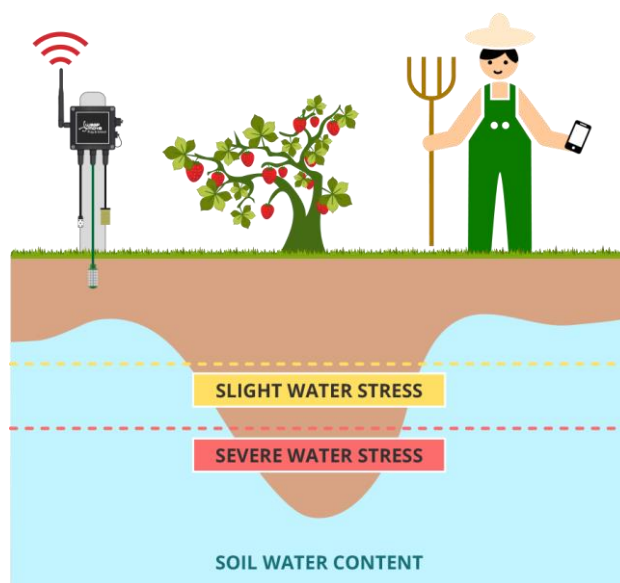


شکل ۳: مراحل نظارت بر گازهای حاصل از احتراق جهت تشخیص آتش سوزی جنگل.

Figure 3: Steps for monitoring combustion gases to detect forest fires.



(الف)



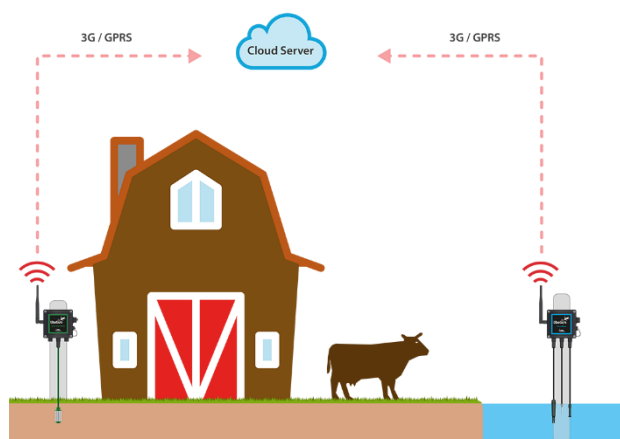
(ب)

شکل ۴: (الف) (ب) توت فرنگی هوشمند و نحوه ی زراعت.

Figure 4: (a) (b) Smart strawberry and cultivation method.

زیرزمینی به کار می‌رود و حسگرهای کیفیت آب (هدایت الکتریکی، دما، اکسیژن محلول، نیترات و pH) در نهرهای مرزی، نظارت بلادرنگ بر کیفیت آب و هشدار در صورت خطر آلودگی آب‌های سطحی را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها پتانسیل کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی و رعایت الزامات قانونی در طیف وسیعی از فعالیت‌های انسانی را دارند.

جلوگیری از اثرات زیست‌محیطی آبیاری فاضلاب: در یکی از پروژه‌ها، سنسورهای رطوبت خاک در منطقه آبیاری فاضلاب برای بزرگ‌ترین صنعت گوشت در استرالیا نصب شده‌اند تا بر اساس وضعیت واقعی رطوبت، زمان روشن و خاموش شدن سیستم آبیاری تنظیم شود (شکل ۵). رطوبت خاک به‌عنوان شاخص اصلی برای جلوگیری از نفوذ نیترات به آب‌های



شکل ۵: اثرات زیست محیطی در منطقه آبیاری صنعت گوشت-کشاورزی با آب هوشمند.

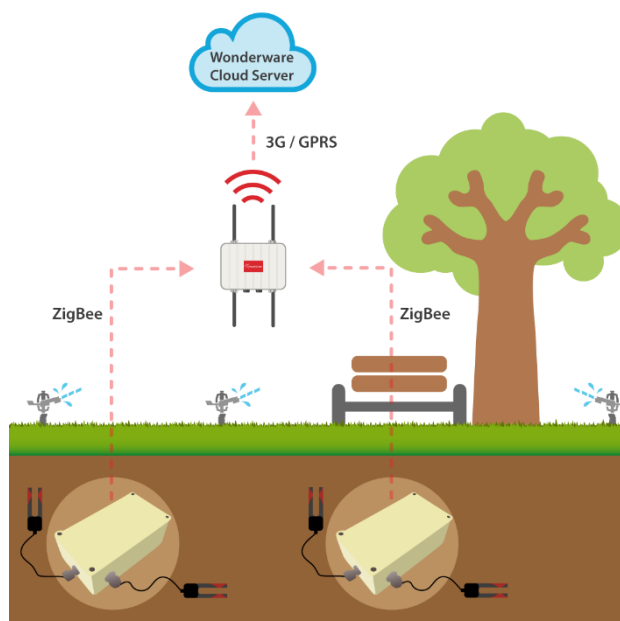
Figure 5: Environmental impacts in the area of irrigation of the meat-agriculture industry with smart water.

خاک به‌صورت درجا نصب شده و داده‌ها را به سامانه مرکزی ارسال می‌کنند؛ بر اساس این داده‌ها، زمان و میزان آبیاری به‌صورت خودکار تنظیم می‌شود. نتایج گزارش‌شده نشان می‌دهد که استفاده از این سامانه توانسته مصرف آب را حدود

صرفه‌جویی در آب با آبیاری هوشمند در بارسلونا: بارسلونا به‌عنوان یکی از شهرهای پیشرو در حوزه شهر هوشمند، پروژه‌ای برای مدیریت هوشمند آبیاری در پارک‌های شهری اجرا کرده است (شکل ۶). در این طرح، سنسورهای رطوبت

۲۵ درصد کاهش دهد و در عین حال کیفیت نگهداری فضای

سبز را حفظ یا بهبود بخشد.



شکل ۶: سیستم آبیاری هوشمند.

Figure 6: Smart irrigation system.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود ظرفیت‌های قابل توجه اینترنت اشیا در پایش و مدیریت محیط زیست، پیاده‌سازی گسترده این سامانه‌ها با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، محدودیت منابع انرژی در گره‌های حسگر و تجهیزاتی است که معمولاً در محیط‌های دور از دسترس و بدون زیرساخت برق پایدار مستقر می‌شوند. طولانی بودن دوره‌های بهره‌برداری و دشواری تعمیر و تعویض باتری، ضرورت استفاده از سخت‌افزارهای کم‌مصرف، پروتکل‌های ارتباطی بهینه و در صورت امکان بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر را برجسته می‌کند.

مقیاس‌پذیری و قابلیت اطمینان شبکه نیز از دیگر چالش‌های اساسی است. با افزایش تعداد گره‌ها و تنوع تجهیزات، تضمین مسیریابی پایدار، تحمل‌پذیری در برابر خطا، حفظ کیفیت خدمت و مدیریت ازدحام ترافیک داده اهمیت می‌یابد. در کاربردهای محیط‌زیستی که نیازمند پایش بلادرنگ و هشدار زودهنگام هستند، هرگونه تأخیر زیاد یا از دست رفتن بسته‌ها می‌تواند کارایی سامانه را به‌طور جدی کاهش دهد. طراحی پروتکل‌ها و معماری‌های چندلایه‌ای که بتوانند این الزامات را برآورده کنند، همچنان موضوع پژوهش و توسعه است.

امنیت و حریم خصوصی داده‌ها از دیگر دغدغه‌های مهم در سامانه‌های اینترنت اشیا به شمار می‌آیند. داده‌های محیطی

پروژه کشاورزی هوشمند در مزارع ارگانیک انگلستان: در پروژه‌ای که در چندین مزرعه ارگانیک در انگلستان اجرا شده، گره‌های حسگر مجهز به پنل خورشیدی برای پایش پارامترهایی مانند تابش خورشید، سرعت و جهت باد، بارش باران، دما و رطوبت هوا، گازها، ترکیبات آلی فرار^۱ (VOC)، دمای خاک و رطوبت خاک به کار رفته است (شکل ۷). این گره‌ها داده‌ها را از طریق شبکه بی‌سیم و پروتکل‌های ارتباطی مانند سرویس عمومی بسته رادیویی GPRS^۲ به یک پلتفرم ابری ارسال می‌کنند. هدف این پروژه، فراهم‌کردن اطلاعات کافی برای پیش‌بینی و مدیریت وقایع کشاورزی، بهینه‌سازی عملکرد محصولات و کاهش هزینه و زمان برای کشاورزان و کارشناسان کشاورزی است.

مرور نمونه‌های فوق نشان می‌دهد که اینترنت اشیا در حوزه‌های مختلف محیط زیست و کشاورزی، از جنگل و کوهستان تا شبکه‌های شهری و مزارع، می‌تواند با فراهم کردن پایش بلادرنگ، افزایش دقت و پوشش مکانی، و امکان کنترل و بهینه‌سازی خودکار، نقش مهمی در مدیریت منابع و کاهش مخاطرات ایفا کند. با این حال، موفقیت این سامانه‌ها وابسته به طراحی مناسب شبکه‌های حسگر، تأمین انرژی، امنیت داده‌ها و یکپارچه‌سازی آن‌ها با پلتفرم‌های تحلیلی و تصمیم‌یار است.

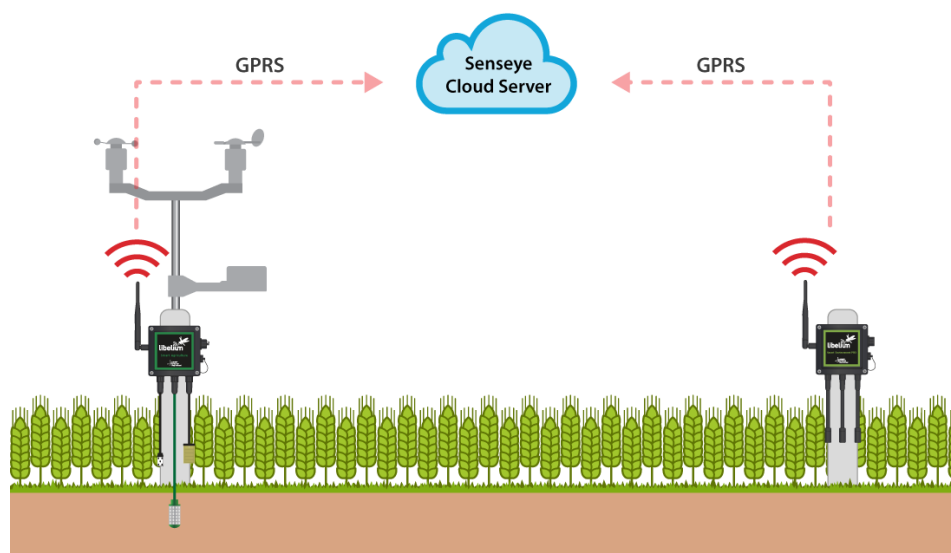
¹ Volatile Organic Compounds (VOC)

² General Packet Radio Service (GPRS)

اشتراک‌گذاری داده، و تلفیق داده‌های محیطی با سایر منابع اطلاعاتی (مانند داده‌های شهری و اجتماعی) از مسائلی است که بر کارایی و پایداری این سامانه‌ها تأثیر می‌گذارد.

در نهایت، هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری، نیاز به نیروی انسانی متخصص، و ملاحظات نهادی و حقوقی نیز بر روند توسعه اینترنت اشیا در محیط زیست اثرگذارند. بسیاری از پروژه‌های موفق گزارش‌شده، در قالب طرح‌های آزمایشی یا پایلوت اجرا شده‌اند و گذار از این مرحله به پیاده‌سازی در مقیاس ملی یا منطقه‌ای، مستلزم برنامه‌ریزی مالی، چارچوب‌های مقرراتی شفاف و سازوکارهای همکاری میان نهادهای مختلف است. رسیدگی به این چالش‌ها می‌تواند مسیر بهره‌برداری پایدارتر و مؤثرتر از اینترنت اشیا در مدیریت محیط زیست را هموار سازد.

اغلب همراه با اطلاعات مکانی و گاهی اطلاعات حساس مربوط به تأسیسات حیاتی، زیرساخت‌ها یا فعالیت کاربران جمع‌آوری می‌شود؛ در نتیجه، احتمال سوءاستفاده، دستکاری یا حملات سایبری وجود دارد. ناهمگونی تجهیزات، محدودیت توان پردازشی گره‌های حسگر و نبود استانداردهای یکپارچه در برخی حوزه‌ها، طراحی و پیاده‌سازی سازوکارهای احراز هویت، رمزنگاری و کنترل دسترسی را پیچیده‌تر می‌کند. چالش دیگر به مدیریت داده و یکپارچه‌سازی آن مربوط است. سامانه‌های اینترنت اشیا در حوزه محیط زیست حجم بسیار زیادی از داده‌های ناهمگون (از نظر قالب، نرخ نمونه‌برداری و کیفیت) تولید می‌کنند که باید در بسترهای ابری یا لبه‌ای ذخیره، پردازش و تحلیل شوند. انتخاب معماری مناسب بین رایانش ابری و لبه‌ای، تعریف سیاست‌های نگهداری و



شکل ۷: نحوه شکل‌گیری گره‌ها در مزارع هوشمند.

Figure 7: How nodes are formed in smart farms.

تأمین پایدار انرژی، توجه به امنیت و حریم خصوصی داده‌ها و استفاده از رویکردهایی مانند اینترنت اشیا سبز، رایانش لبه‌ای و تحلیل هوشمند داده‌ها، می‌تواند نقش مهمی در مدیریت پایدار محیط زیست و کاهش اثرات منفی فعالیت‌های انسانی ایفا کند. با این حال، چالش‌هایی نظیر استانداردسازی، مقیاس‌پذیری، هزینه‌های پیاده‌سازی و کمبود مطالعات بلندمدت همچنان وجود دارد و می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده در این حوزه باشد.

References:

- [1] Machado K, Rosario D, Cerqueira E, et al. A routing protocol based on energy and link quality for Internet of Things applications. 2013; 1942- 64.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با رویکردی مروری، مفاهیم پایه و اجزای اصلی اینترنت اشیا و نقش آن‌ها در کاربردهای محیط‌زیستی بررسی شد. نمونه‌های ارائه‌شده در حوزه‌هایی مانند شهر هوشمند، پایش آتش‌سوزی جنگل، آلودگی هوا، مخاطرات طبیعی، کیفیت آب آشامیدنی و کشاورزی هوشمند نشان می‌دهد که استفاده از شبکه‌های حسگر، پلتفرم‌های ارتباطی و سامانه‌های تحلیلی مبتنی بر اینترنت اشیا می‌تواند امکان پایش بلادرنگ، افزایش دقت و پوشش مکانی و بهینه‌سازی مصرف منابعی همچون آب و انرژی را فراهم کند.

تجربه پروژه‌های اجراشده در کشورهای مختلف حاکی از آن است که اینترنت اشیا، در صورت طراحی درست معماری شبکه،

- [2] Baccelli E, Bartl G, Danilkina A, et al. Area and perimeter surveillance in SAFEST using sensors and the Internet of Things. 2014.
- [3] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Gener Comput Syst.* 2013; 29(7): 1645- 60.
- [4] Corchado JM, Bajo J, De Paz Y, Tapia DI. Intelligent environment for monitoring Alzheimer patients: Agent technology for health care. *Decis Support Syst.* 2008; 44: 382- 96.
- [5] Estrada- Martinez PE, Garcia- Macias JA. Semantic interactions in the Internet of Things. *Int J Ad Hoc Ubiquitous Comput.* 2012; 9(3- 4):139- 49.
- [6] Barnaghi P, Cousin PH, Malatras A, Serrano M, Viho C. *Simpler IoT world(s) of tomorrow, more interoperability challenges to cope today.* River Publishers; 2013.
- [7] Gurbanova L, Abdullayev V. Application of IoT and sensor technologies in environmental monitoring. *Environ Res Ecotoxicol.* 2025; 4:170- 80.
- [8] Rao PV, Khan SA, Paul S, Mitra SP, Deb D, Chaudhuri AK, et al. IoT- enabled environmental monitoring systems: Trends, challenges and future directions. *Int J Res Appl Sci Eng Technol.* 2025;11(17 Suppl):1- 8.
- [9] Memos V, et al. Green Internet of Things (GIoT): Vision, applications and research challenges. *Sustain Comput Inform Syst.* 2020; 28: 100427. [web:50]
- [10] Asadullah MH, Myat A. AI- powered IoT frameworks for real- time environmental monitoring and sustainable urban development in smart cities. *AIP Conf Proc.* 2025; 3327: 020009.
- [11] Hernández- Díaz V, Martínez JF, et al. *Semantic as an interoperability enabler in Internet of Things.* River Publishers; 2013.
- [12] Al- Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, Aledhari M, Ayyash M. Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Commun Surv Tutorials.* 2015; 17(4): 2347- 76.
- [13] Vögler M, Schleicher J, Inzinger C, Nastic S, Sehic S, Dustdar S. LEONORE: Large- scale provisioning of resource- constrained IoT deployments. In: 2015 IEEE Int Conf Pervasive Comput Commun Workshops (PerCom Workshops). 2015 Mar 30–Apr 3.
- [14] Borgohain T, Kumar U, Sanyal S. Survey of operating systems for the IoT environment. *arXiv Prepr.* 2015; arXiv: 1504.07931.
- [15] Whitmore A, Agarwal A, Xu LD. The Internet of Things – A survey of topics and trends. *Inf Syst Front.* 2015; 17(2): 261- 74.