Journal of Urban Management & Environmental Engineering

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.2, No.4; 2025.pp: 41-59

Research paper

(Received 18 Oct., 2024 Accepted 5 Nov., 2024)

Application of Wireless Sensor Networks for Monitoring and Protection of Rangelands and Natural Resources: A Preventive Approach to Natural Hazard Management

Mohammad Ali Bagherzadeh*[1], Ehsan Soleimani-Nasab[2], Farzad Rahimi[3]

[1] *Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*
[2] *Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*
[3] *Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*

Abstract

Monitoring and protecting rangelands and natural resource lands against natural hazards such as wildfires and floods are of paramount importance. Wireless sensor networks (WSNs), as innovative technologies, provide real-time management of these hazards. In this study, a monitoring system based on LoRaWAN technology was designed and evaluated for rangeland surveillance in remote and difficult-to-access areas of Iran. LoRaWAN was chosen as the optimal solution due to its long communication range, low power consumption, and the ability to establish private networks without the need for complex infrastructure. The proposed system consists of sensors that measure temperature, humidity, and smoke, with the collected data being transmitted to a central gateway. These data are then transferred via LoRa modules to a cloud server. One of the main challenges addressed in this study was energy optimization to extend the battery life of the sensors. To overcome this, smart algorithms were implemented to adjust the data transmission intervals based on environmental and seasonal conditions; for instance, during hot seasons and days with higher wildfire risk, shorter data transmission intervals were set, while in stable conditions, longer intervals were used. Field tests demonstrated that the proposed system was able to maintain stable communication over long distances while efficiently managing energy consumption to ensure reliable data transmission. Furthermore, the real-time data transfer to the cloud enables advanced analysis and timely decision-making. This research shows that LoRaWAN technology, with its easy access to equipment and resilience in harsh environmental conditions, offers an effective and efficient solution for monitoring and protecting rangelands and natural resource lands in Iran.

Keywords: Wireless sensor networks, LoRaWAN, Environmental monitoring, Energy management, Sensitive ecosystems.

* Corresponding Author: Mohammad Ali Bagherzadeh
Email:*ma.bagherzadeh@kgut.ac.ir*
Phone: +983431623388

DOI: 10.48306/jumee.2024.484224.1059

نشریه علمی مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال دوم/شماره چهارم/زمستان ۱۴۰۳/صفحه ۴۱-۵۹

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱

کاربرد شبکه‌های سنسوری بی‌سیم در پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی: رویکردی پیشگیرانه برای مدیریت مخاطرات طبیعی

محمدعلی باقرزاده کوهبنانی*[۱]، احسان سلیمانی‌نسب[۲]، فرزاد رحیمی[۳]

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۳] کارشناسی ارشد گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

چکیده

پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی در برابر مخاطرات طبیعی مانند آتش‌سوزی و سیل از اهمیت بالایی برخوردار است. شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به‌عنوان فناوری‌های نوین، امکان مدیریت بلادرنگ این مخاطرات را فراهم می‌کنند. در این پژوهش، یک سیستم پایش مبتنی بر فناوری LoRaWAN برای نظارت بر مراتع در مناطق صعب‌العبور ایران طراحی و ارزیابی شده است. LoRaWAN به‌دلیل برد ارتباطی طولانی، مصرف انرژی بسیار کم و قابلیت ایجاد شبکه‌های اختصاصی بدون نیاز به زیرساخت‌های پیچیده، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب انتخاب شد. سیستم پیشنهادی از حسگرهای دما، رطوبت و دود تشکیل شده است که داده‌های جمع‌آوری‌شده را به درگاه مرکزی ارسال می‌کنند. این داده‌ها سپس از طریق ماژول‌های LoRa به سرور ابری منتقل می‌شوند. یکی از چالش‌های اساسی، مدیریت بهینه انرژی برای افزایش طول عمر باتری‌های حسگرها بود. برای حل این مسئله، الگوریتم‌های هوشمندی جهت تنظیم فواصل زمانی ارسال داده‌ها بر اساس شرایط محیطی و فصلی به‌کار گرفته شد؛ به‌طور مثال، در فصول گرم و روزهایی با احتمال بیشتر آتش‌سوزی، فواصل ارسال داده‌ها کوتاه‌تر و در شرایط پایدار، فواصل طولانی‌تر تنظیم شدند. نتایج آزمون‌های میدانی نشان داد که سیستم پیشنهادی قادر است در فواصل طولانی ارتباط پایداری برقرار کرده و با مصرف انرژی بهینه، داده‌ها را به‌طور مطمئن ارسال نماید. همچنین، امکان ارسال بلادرنگ داده‌ها به فضای ابری فراهم شد که به تحلیل‌های پیشرفته و تصمیم‌گیری‌های به‌موقع کمک می‌کند. این پژوهش نشان می‌دهد که فناوری LoRaWAN، با دسترسی آسان به تجهیزات و پایداری در شرایط سخت محیطی، راهکاری مؤثر و کارآمد برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی در ایران ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: شبکه‌های سنسوری بی‌سیم، LoRaWAN، پایش محیطی، مدیریت انرژی، اکوسیستم‌های حساس.

* نویسنده مسئول: محمدعلی باقرزاده کوهبنانی

ایمیل: *ma.bagherzadeh@kgut.ac.ir*

شماره تماس: ۰۳۴-۳۱۶۲۳۳۸۸

DOI: 10.48306/jumee.2024.484224.1059

۱-مقدمه

پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی یکی از چالش‌های اساسی و حیاتی در مدیریت محیط‌زیست و منابع طبیعی محسوب می‌شود. این مناطق به دلیل گستردگی جغرافیایی، تنوع زیستی بالا و تأثیرپذیری از عوامل متعدد زیست‌محیطی، همواره در معرض مخاطرات طبیعی نظیر آتش‌سوزی، سیل، فرسایش خاک و سایر پدیده‌های مخرب قرار دارند [۱]. در کشور ایران، با توجه به وسعت قابل‌توجه مراتع و اراضی طبیعی، وقوع مکرر این مخاطرات تهدیدات جدی برای محیط‌زیست و منابع طبیعی به همراه دارد. این مخاطرات که به‌واسطه تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های اخیر تشدید شده‌اند، می‌توانند منجر به تخریب وسیع منابع طبیعی، کاهش تنوع زیستی و آسیب‌های جبران‌ناپذیر به اکوسیستم‌ها شوند [۲]. به‌عنوان مثال، آتش‌سوزی‌ها در مدت کوتاهی هکتارها از مراتع و جنگل‌ها را نابود می‌کنند؛ فرسایش خاک با کاهش تدریجی حاصلخیزی، به زیستگاه‌های طبیعی و کشاورزی لطمه می‌زند؛ و سیلاب‌ها با تخریب خاک و پوشش گیاهی، علاوه بر خسارات اقتصادی، تغییرات زیست‌محیطی مخربی را نیز به‌دنبال دارند [3]. همچنین، ورود غیرمجاز به مناطق حفاظت‌شده خطراتی نظیر شکار غیرقانونی و تخریب زیستگاه‌های گونه‌های در معرض خطر را به همراه دارد [۴]. مراتع و اراضی طبیعی کشور، به‌عنوان منابع حیاتی برای تأمین آب، حفظ تنوع زیستی و پایداری اکوسیستم‌ها، نیازمند حفاظت و مدیریت مداوم هستند. با توجه به عدم دسترسی آسان به تمامی نقاط و محدودیت‌های منابع انسانی و مالی، استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند شبکه‌های سنسوری بی‌سیم (WSNs) ضروری به نظر می‌رسد [5].

فناوری‌های نوین، به‌ویژه WSN[۱] ها، نقش حیاتی در مدیریت و پایش اکوسیستم‌های طبیعی ایفا می‌کنند. این فناوری با قابلیت پایش بلادرنگ و گردآوری داده‌های محیطی از سنسورهای مختلف مانند دما، رطوبت، فشار، گازهای زیان‌آور و حتی تصاویر، امکان تشخیص سریع مخاطرات طبیعی مانند آتش‌سوزی، سیل و فرسایش خاک را فراهم می‌کند [6]. سنسورهایی نظیر دما، رطوبت، فشار، گازهای گلخانه‌ای و سنسورهای تصویری می‌توانند اطلاعات حیاتی را از محیط‌های دورافتاده ارسال کنند. استفاده از پروتکل‌های ارتباطی استاندارد مانندIEEE 802.15.4 ، ZigBee و LoRaWAN در این شبکه‌ها، ارتباطات پایدار و کم‌مصرف را تضمین می‌کند [7]. توپولوژی‌های شبکه‌ای متنوعی مانند مش[۲]، ستاره‌ای[۳] و خوشه‌ای[۴] به‌منظور افزایش پوشش‌دهی و کاهش تأخیر در انتقال داده‌ها به‌کار گرفته می‌شوند [8]. همچنین، فناوری‌های نوظهوری مانند NB-IoT و LoWPAN با فراهم‌سازی ارتباطات بلندبرد و کم‌مصرف، امکان افزایش مقیاس‌پذیری و کاهش مصرف انرژی را فراهم کرده‌اند و پایش مناطق وسیع مراتع و اراضی طبیعی را میسر می‌سازند [9]. این فناوری‌ها در مقایسه با فناوری‌های قدیمی‌تر، قادر به پشتیبانی از تعداد زیادی سنسور با مصرف انرژی کم و پوشش‌دهی گسترده هستند. بهره‌گیری از الگوریتم‌های مسیریابی پیشرفته و مدیریت انرژی هوشمند در این شبکه‌ها، پایداری و کارایی سیستم را در شرایط محیطی سخت تضمین می‌کند [10]. با ادغام این فناوری‌ها، می‌توان سیستم‌های هشدار زودهنگام را برای تشخیص سریع مخاطراتی مانند آتش‌سوزی، سیل، فرسایش خاک و حتی ورود غیرمجاز به مناطق حفاظت‌شده پیاده‌سازی کرد؛ امری که نقش بسزایی در مدیریت پیشگیرانه مخاطرات طبیعی و حفاظت از اکوسیستم‌های حساس ایفا می‌کند [11].

تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که WSN می‌تواند در اکوسیستم‌های طبیعی برای تشخیص و پایش پارامترهای محیطی مختلف به‌کار گرفته شود. مطالعه‌ای که در [۱۲] انجام شد، به کارگیری شبکه‌های سنسوری بی‌سیم برای تشخیص زودهنگام آتش‌سوزی‌های جنگلی را بررسی کرد. در این پژوهش، یک گره شبکه سنسوری بی‌سیم مجهز به بینایی را طراحی و پیاده‌سازی کرده‌اند که با استفاده از یک الگوریتم هوشمند شناسایی دود و تصویربرداری کم‌مصرف، توانایی تشخیص به‌موقع آتش‌سوزی‌ها را فراهم می‌کند. آزمایش‌های متعدد در شرایط طبیعی مختلف نشان دادند که این سیستم علاوه بر دقت بالا در تشخیص اولیه، میزان هشدارهای کاذب بسیار پایینی نیز دارد. در حوزه نظارت بر تالاب‌ها نیز استفاده از شبکه‌های سنسوری مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. در این مطالعه از WSN برای نظارت بر سطح آب، بارش، تبخیر و تعرق، دما و مواد محلول اصلی در تالاب استفاده شده است. این مطالعه نشان داد که WSNهای کم‌مصرف می‌توانند با هزینه‌ای نسبتاً پایین در اکوسیستم‌های دورافتاده و تحت تأثیر تالاب‌ها مستقر شده و تأثیرات هیدروشیمیایی ناشی از آب‌وهوا و تغییرات اقلیمی را پایش کنند.

---

[۱] Wireless Sensor Networks

[۲] Mesh

[۳] Star

[۴] Clustered

در مطالعه مارتینز و همکاران [6]، نتایج یک پژوهش گسترده در خصوص کاربردWSN ها در حفاظت از تنوع زیستی و مدیریت مناطق حفاظت‌شده در برزیل ارائه شده است. در این مطالعه، حسگرهای حرکتی و دوربین‌های سنسوری برای شناسایی حرکات حیوانات و همچنین تشخیص ورود غیرمجاز به این مناطق استفاده شد. این سیستم توانست به‌طور مؤثری از شکار غیرمجاز جلوگیری کند و اطلاعات باارزشی را در مورد رفتار حیوانات بومی ارائه دهد. همچنین، در [۱۴] به توسعه سیستمی برای پایش فرسایش خاک بر اساس اینترنت اشیاء (IoT) پرداخته است. در این سیستم، یک گره سنسوری بی‌سیم طراحی شده که بر روی شیب‌های خاکی قرار داده می‌شود تا پارامترهایی مانند تغییر عمق خاک و انحراف سطح را اندازه‌گیری کند. این گره‌ها، اطلاعات سنسورها شامل داده‌های مربوط به عمق فرسایش خاک را جمع‌آوری کرده و از طریق شبکه به یک درگاه مرکزی[۱]ارسال می‌کنند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد که این سیستم علاوه بر پایداری سیگنال و نرخ پایین از دست‌دادن بسته‌های اطلاعاتی، توانایی بالایی در تشخیص تغییرات فرسایش خاک دارد.

در [15] به بررسی تحقیقات گذشته در زمینه کاربرد WSN برای پایش و حفاظت از منابع طبیعی پرداخته شده. در این بررسی، تأکید اصلی بر به‌کارگیری پروتکل‌های LoRaWAN و NB-IoT به دلیل برد بلند و مصرف انرژی پایین است. در این مقاله به مطالعات مختلفی که در حوزه‌های جنگل‌داری، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی از WSN استفاده کرده‌اند، اشاره شده و چالش‌های موجود مانند مدیریت انرژی و مسائل امنیتی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در [16] چارچوبی هوشمند برای تشخیص زودهنگام آتش‌سوزی جنگل‌ها مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) و WSN ارائه شده و با استفاده از الگوریتمTSA[۲] و مکانیزم‌های بهینه‌سازی انرژی مانند مدیریت زمان خواب سنسورها، راهکارهایی برای بهبود کارایی شبکه و طول عمر باتری‌ها ارائه شده است. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده که این چارچوب باعث افزایش پایداری شبکه در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور می‌شود و به تشخیص سریع‌تر آتش‌سوزی‌های جنگلی کمک می‌کند. علاوه بر این [17] به توسعه یک سیستم تشخیص زودهنگام آتش‌سوزی جنگل با استفاده از شبکه‌های سنسوری بی‌سیم پرداخته است. نویسندگان از پروتکل ZigBee و توپولوژی مش برای جمع‌آوری و انتقال داده‌های محیطی استفاده کرده‌اند. داده‌ها از طریق گره‌های حسگر به درگاه مرکزی ارسال شده و سپس برای پردازش بیشتر به سرور مرکزی منتقل می‌شوند. این سیستم قابلیت پایداری بالا در برابر شرایط محیطی سخت را دارد و عملکرد آن در مناطق دورافتاده بهبود یافته است. یکی از دستاوردهای مقاله، مقاومت شبکه در برابر نویز و تداخل‌های محیطی است که به افزایش دقت تشخیص و کاهش هشدارهای کاذب کمک می‌کند. همچنین، مطالعات انجام شده توسط مرادی و همکاران [18] در ایالات متحده یک سیستم تشخیص زودهنگام آتش‌سوزی جنگل را بر پایه گره‌های سنسوری بی‌سیم و الگوریتم‌های یادگیری ماشین معرفی کرده است. این سیستم یک راه‌حل کم‌هزینه و کارآمد برای تشخیص زودهنگام آتش‌سوزی در مناطق وسیع جنگلی ارائه می‌دهد. این سیستم شامل حسگرهای دما، رطوبت و دود است و از چهار الگوریتم مختلف، شامل درخت‌های تصمیم‌گیری، جنگل تصادفی، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) و k-نزدیک‌ترین همسایگان (KNN)، برای پیش‌بینی آتش‌سوزی استفاده می‌کند. نتایج نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی با دقت ۷۷/۹۵ درصد بهترین عملکرد را در تشخیص نمونه‌های آتش و غیرآتش داشته است و توانسته است با استفاده از پروتکل‌های کم‌مصرف ارتباطات پایدار و بلندمدت در مناطق وسیع برای پایش جنگل‌ها و ارائه هشدارهای زودهنگام فراهم کند.

نتایج ارائه شده توسط [19]، [20] و [21] نیز با استفاده از پیکربندی‌ها و فناوری‌های مختلف WSN پایش رطوبت خاک و جریان آب به‌منظور پیشگیری از سیلاب‌های ناگهانی را بررسی کرده‌اند. همچنین، میزان اثربخشی استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی هوشمند برای کاهش تأخیر در انتقال داده‌ها و افزایش طول عمر شبکه WSN در پایش فرسایش خاک مناطق کوهستانی چین نیز بررسی شده که نتایج آن در وانگ و همکاران [22] ارائه شده است. تمامی این مطالعات نشان می‌دهند که شبکه‌های سنسوری بی‌سیم ابزارهای قدرتمندی برای پایش و حفاظت از منابع طبیعی و مدیریت مخاطرات طبیعی محسوب می‌شوند. از پایش مراتع و جنگل‌ها تا مدیریت منابع آبی و مقابله با بلایای طبیعی، این شبکه‌ها در کشورهای مختلف با موفقیت استفاده شده‌اند. پیش‌بینی می‌شود که با پیشرفت‌های حوزه IoT و هوش مصنوعی، این فناوری‌ها نقش مهمی در مدیریت منابع طبیعی و بلایای طبیعی ایفا کنند.[23]

---

[۱] Gateway

[۲] Tree Seed Algorithm

در این مقاله، به‌منظور بهبود کارایی و کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی، فناوری‌های نوین و کم‌مصرف بررسی و تحلیل شده‌اند. با توجه به چالش‌های موجود در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور، از جمله نیاز به مصرف انرژی پایین، برد ارتباطی بلند و اعتمادپذیری بالا، فناوری‌های مناسب انتخاب شده‌اند. در این راستا، شبکه‌های دوربرد کم‌توان گسترده (LPWAN) و به‌ویژه فناوری LoRaWAN به دلیل ویژگی‌هایی مانند برد ارتباطی چند کیلومتری، مصرف انرژی بسیار پایین و قابلیت اتصال تعداد زیادی دستگاه، به‌عنوان بهترین گزینه برای پوشش‌دهی وسیع مراتع انتخاب شده‌اند [24]. طراحی این شبکه بر پایه توپولوژی ستاره‌ای است، که در آن سنسورها داده‌های محیطی از قبیل دما، رطوبت، شاخص‌های آتش‌سوزی و حرکات غیرمجاز را به درگاه‌های مرکزی ارسال می‌کنند و این درگاه‌ها قادر به انتقال داده‌ها از طریق ارتباطات سلولی (GSM/3G/4G) به سرور مرکزی هستند. سیستم مدیریت اطلاعات مبتنی بر رایانش ابری طراحی شده است تا امکان دسترسی امن و بلادرنگ به داده‌ها را برای مدیران و مسئولان فراهم کند. همچنین، با استفاده از پروتکل‌های استاندارد و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی، عمر مفید شبکه افزایش یافته و نیاز به تعویض مکرر باتری‌ها کاهش می‌یابد. به‌علاوه، مکانیزم‌های امنیتی برای حفاظت از داده‌ها در برابر تهدیدات سایبری در نظر گرفته شده است. این راهکار با تمرکز بر تشخیص زودهنگام مخاطرات طبیعی مانند آتش‌سوزی، سیل، فرسایش خاک و ورود غیرمجاز به مناطق حفاظت‌شده، امکان مدیریت پیشگیرانه را فراهم کرده و به کاهش خسارات زیست‌محیطی و اقتصادی کمک می‌کند. ساختار پیشنهادی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت گسترش و ارتقاء را داراست و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار جامع در مدیریت و پایش اکوسیستم‌های طبیعی به کار گرفته شود.

۲-مواد و روش‌ها

در این بخش، به بررسی و تشریح روش‌ها و فناوری‌های به‌کاررفته برای طراحی و پیاده‌سازی شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به‌منظور پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی می‌پردازیم. با توجه به نیاز به مصرف انرژی پایین، برد ارتباطی بلند و پایداری در شرایط محیطی سخت، فناوری‌های نوین و کم‌مصرف انتخاب شده‌اند که امکان جمع‌آوری و انتقال داده‌های محیطی را در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور فراهم می‌کنند. در این بخش، پروتکل‌های ارتباطی، طراحی توپولوژی شبکه، مکانیزم‌های مدیریت انرژی، و نحوه انتقال و پردازش داده‌ها با استفاده از رایانش ابری بررسی شده و راهکارهای امنیتی مورد استفاده برای حفاظت از داده‌ها نیز ارائه می‌شود. این روش‌ها با هدف بهینه‌سازی کارایی شبکه و کاهش مصرف انرژی به‌عنوان راهکاری جامع برای مدیریت و نظارت بلادرنگ در این مناطق به کار گرفته شده‌اند.

۲-۱- شبکه‌های سنسوری بی‌سیم برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی

شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به‌عنوان یک راهکار کارآمد و نوین برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی مطرح شده‌اند. این شبکه‌ها متشکل از مجموعه‌ای از حسگرهای کوچک و هوشمند هستند که به‌صورت مستقل و خودمختار در محیط‌های گسترده و اغلب صعب‌العبور مستقر می‌شوند و وظیفه جمع‌آوری داده‌های محیطی از جمله دما، رطوبت، شاخص‌های آتش‌سوزی و حرکات غیرمجاز را بر عهده دارند [۶]. با توجه به اهمیت حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی و نیاز به نظارت مستمر بر این مناطق، استفاده ازWSN ها امکان پایش بلادرنگ و دقیق را فراهم می‌کند.

فناوری‌های شبکه‌های سنسوری بی‌سیم کم‌مصرف و برد بلند مانند LoRaWAN و NB-IoT به دلیل مصرف انرژی پایین و برد ارتباطی طولانی، انتخاب‌های ایده‌آلی برای چنین کاربردهایی محسوب می‌شوند [۲۵]. این شبکه‌ها امکان ارتباطات پایدار در مناطق وسیع و دورافتاده را فراهم می‌کنند، در حالی که داده‌ها را به‌طور مستقیم یا از طریق حسگرهای واسط به درگاه‌های مرکزی انتقال می‌دهند. درگاه‌های مرکزی این داده‌ها را به سرور مرکزی یا سیستم‌های رایانش ابری منتقل می‌کنند تا پردازش و ذخیره‌سازی انجام شود [۲۶].

یکی از الزامات کلیدی برای استفاده موفقیت‌آمیز از شبکه‌های سنسوری بی‌سیم در چنین محیط‌هایی، مدیریت بهینه انرژی است [۲۷]. حسگرهای مورد استفاده در این شبکه‌ها عموماً دارای منابع انرژی محدود مانند باتری هستند و در محیط‌هایی که دسترسی به

[1] Low-Power Wide-Area Networks

تجهیزات پشتیبانی و نگهداری دشوار است، مدیریت مصرف انرژی حیاتی می‌شود. برای این منظور، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انرژی استفاده می‌شود تا حسگرها در بیشتر زمان‌ها در حالت خواب قرار داشته باشند و تنها در زمان‌های لازم برای جمع‌آوری و ارسال داده فعال شوند [۲۸]. این مکانیزم باعث افزایش قابل‌توجه عمر مفید باتری می‌شود و نیاز به تعویض مکرر باتری‌ها را به حداقل می‌رساند.

انتقال داده‌ها و استفاده از رایانش ابری نقش مهمی در عملکرد این شبکه‌ها ایفا می‌کند [۲۶]. پس از جمع‌آوری داده‌ها، از طریق پروتکل‌های ارتباطی کم‌مصرف مانند LoRaWAN یا NB-IoT، داده‌ها به درگاه‌های مرکزی ارسال می‌شوند و سپس از طریق ارتباطات سلولی یا ماهواره‌ای به سرور مرکزی منتقل می‌گردند [۲۵]. داده‌های محیطی پس از انتقال، در سیستم‌های رایانش ابری ذخیره و پردازش می‌شوند که این امر امکان دسترسی بلادرنگ و تحلیل داده‌ها را برای مدیران و کارشناسان فراهم می‌کند [۲۶]. این فرآیند، با استفاده از رابط‌های کاربری گرافیکی، داده‌های مهم را به‌صورت نمودارها و شاخص‌های محیطی به کاربران ارائه می‌دهد و در صورت بروز شرایط خطرناک، هشدارهای بلادرنگ ارسال می‌شود.

برای اطمینان از امنیت داده‌های جمع‌آوری‌شده، استفاده از مکانیزم‌های امنیتی پیشرفته ضروری است [۲۷]. شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به دلیل تبادل داده‌های حساس محیطی، ممکن است در معرض تهدیدات سایبری قرار گیرند. در این راستا، از رمزگذاری AES-128 و سایر پروتکل‌های امنیتی استاندارد استفاده می‌شود تا داده‌ها در برابر دسترسی‌های غیرمجاز و نفوذهای احتمالی محافظت شوند [۲۷]. همچنین تأیید هویت دستگاه‌ها و کنترل دسترسی به داده‌های جمع‌آوری‌شده از دیگر تدابیری است که برای تضمین امنیت شبکه و داده‌های آن اتخاذ شده است.

در مجموع، شبکه‌های سنسوری بی‌سیم با فراهم کردن راهکاری جامع و قابل اطمینان برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی، به بهینه‌سازی مدیریت این منابع کمک شایانی می‌کنند [۶]. الزامات کلیدی برای موفقیت این شبکه‌ها شامل مصرف انرژی بهینه، امنیت داده‌ها و استفاده از رایانش ابری برای تحلیل و پردازش داده‌ها می‌باشد که به افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی در این مناطق کمک می‌کند [۲۸]. با توسعه فناوری‌های نوین و ادغام آن‌ها در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم، می‌توان انتظار داشت که کارایی و اثربخشی در مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابد [۶].

۲-۲-طراحی شبکه و توپولوژی

طراحی شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به‌منظور پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی با توجه به مقیاس گسترده جغرافیایی، نیاز به مصرف انرژی پایین و پایداری شبکه در شرایط سخت محیطی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بخش، به تشریح انواع توپولوژی‌های شبکه و پروتکل‌های مورد بررسی برای پیاده‌سازی این شبکه‌ها پرداخته می‌شود. هر توپولوژی شبکه ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارد که بسته به نوع محیط، شرایط ارتباطی و محدودیت‌های انرژی، انتخاب می‌شود.

۲-۲-۱-توپولوژی‌های مختلف شبکه سنسوری بیسیم

شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به‌عنوان یک راهکار کارآمد و نوین برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی مطرح شده‌اند. این شبکه‌ها متشکل از مجموعه‌ای از حسگرهای کوچک و هوشمند هستند که به‌صورت مستقل و خودمختار در محیط‌های گسترده و اغلب صعب‌العبور مستقر می‌شوند و وظیفه جمع‌آوری داده‌های محیطی از جمله دما، رطوبت خاک، شاخص‌های آتش‌سوزی و حرکات غیرمجاز را بر عهده دارند. انتخاب توپولوژی مناسب شبکه سنسوری بی‌سیم نقش مهمی در کارایی و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها ایفا می‌کند. در این راستا، سه توپولوژی اصلی که بیشترین کاربرد را در پایش منابع طبیعی دارند شامل توپولوژی ستاره‌ای، توپولوژی مش و توپولوژی خوشه‌ای می‌باشند [۶, ۲۹].

توپولوژی ستاره‌ای یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین طراحی‌ها در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم است. در این توپولوژی، هر حسگر به‌طور مستقیم به یک درگاه مرکزی متصل می‌شود که وظیفه دریافت داده‌های حسگرها و ارسال آن‌ها به سرور مرکزی یا سیستم‌های رایانش ابری را بر عهده دارد. این طراحی به دلیل کاهش تعداد پرش‌های ارتباطی و سادگی مدیریت شبکه، گزینه‌ای مناسب برای مناطق وسیع و دورافتاده مانند مراتع و اراضی منابع طبیعی محسوب می‌شود. با وجود مزایای فراوان این توپولوژی، از جمله سادگی و کاهش

پیچیدگی شبکه، نقطه ضعف آن در وابستگی به درگاه مرکزی به عنوان نقطه‌ای واحد برای جمع‌آوری داده‌ها قرار دارد که می‌تواند منجر به شکست کامل شبکه در صورت خرابی درگاه مرکزی شود.

توپولوژی مش تفاوت قابل توجهی با توپولوژی ستاره‌ای دارد. در این توپولوژی، هر حسگر قادر است به‌طور مستقیم یا از طریق سایر حسگرها با درگاه مرکزی ارتباط برقرار کند. این طراحی امکان ارتباط چندباره بین حسگرها و درگاه مرکزی را فراهم می‌آورد و به حسگرها اجازه می‌دهد داده‌ها را از طریق حسگرهای واسط ارسال کنند. توپولوژی مش برای مناطقی با موانع طبیعی یا ناهمواری‌های جغرافیایی که برد ارتباطی مستقیم محدود است، بسیار مناسب است. این توپولوژی با ارائه مسیرهای متعدد برای انتقال داده‌ها، قابلیت اطمینان و پوشش شبکه را افزایش می‌دهد، اگرچه پیچیدگی بیشتر در مدیریت شبکه و افزایش مصرف انرژی ناشی از ارتباطات متعدد می‌تواند از چالش‌های اصلی آن باشد.

توپولوژی خوشه‌ای با تقسیم شبکه به گروه‌های کوچکتر و اختصاص یک گره سرخوشه[1] به هر گروه، سعی در بهبود کارایی و بهینه‌سازی مصرف انرژی دارد. گره‌های سرخوشه وظیفه جمع‌آوری داده‌های حسگرهای تحت پوشش خود را بر عهده گرفته و آن‌ها را به درگاه مرکزی ارسال می‌کنند. این ساختار هیرارشی به کاهش بار ارتباطی بر روی حسگرهای فردی و توزیع متوازن مصرف انرژی در شبکه کمک می‌کند. توپولوژی خوشه‌ای به ویژه در شبکه‌های بزرگ و پراکنده که نیازمند مقیاس‌پذیری و مدیریت بهینه انرژی هستند، بسیار مؤثر است. با این حال، این توپولوژی نیز وابستگی به گره‌های سرخوشه به عنوان نقاط کلیدی در شبکه را ایجاد می‌کند که ممکن است در صورت خرابی این گره‌ها، عملکرد شبکه تحت تأثیر قرار گیرد.

جدول ۱- مقایسه توپولوژی‌های مختلف در پیکربندی شبکه‌های سنسوری بیسیم

توپولوژی	مزایا	معایب
ستاره‌ای	تأخیر کم در ارتباطات، پیاده‌سازی و نگهداری ساده، مصرف انرژی کم به دلیل ارتباط مستقیم با Gateway	وابستگی به درگاه مرکزی، برد ارتباطی محدود، نیاز به چندین Gateway برای پوشش مناطق وسیع
مش	پایداری بالا، برد ارتباطی گسترده، پوشش کامل حتی در مناطق ناهموار	مصرف انرژی زیاد، الگوریتم‌های پیچیده مسیریابی، مدیریت دشوار
خوشه‌ای	مصرف انرژی بهینه، مدیریت پهنای باند کارآمد، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری بالا	وابستگی به گره‌های سرخوشه، مدیریت پیچیده خوشه‌ها، نیاز به الگوریتم‌های هوشمند برای انتخاب سرخوشه

انتخاب توپولوژی مناسب برای شبکه‌های سنسوری بی‌سیم بستگی به نیازها و شرایط محیطی خاص دارد. توپولوژی ستاره‌ای با سادگی و کاهش پیچیدگی شبکه، گزینه‌ای مناسب برای محیط‌های گسترده و دورافتاده است، در حالی که توپولوژی مش با ارائه مسیرهای متعدد ارتباطی، قابلیت اطمینان و پوشش گسترده‌تری را فراهم می‌آورد. توپولوژی خوشه‌ای نیز با بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش مقیاس‌پذیری، برای شبکه‌های بزرگ و پراکنده ایده‌آل می‌باشد. بنابراین، در طراحی شبکه‌های سنسوری بی‌سیم برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی، تحلیل دقیق نیازها و شرایط محیطی و انتخاب توپولوژی مناسب می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک شایانی نماید.

۲-۲-۲-معرفی و مقایسه فناوری‌های قابل استفاده در پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی

فناوری‌های ارتباطی LPWAN نقش کلیدی در توسعه IoT و به‌ویژه در کاربردهای مرتبط با پایش و حفاظت از منابع طبیعی ایفا می‌کنند. از میان فناوری‌های LPWAN، سه فناوری برجسته عبارت‌اند از: LoRaWAN، SIGFOX و NB-IoT. این

[1] Cluster Head

فناوری‌ها با ارائه ارتباطات کم‌مصرف و برد بلند، امکان اتصال تعداد زیادی از دستگاه‌های سنسوری را در مناطق گسترده و دورافتاده فراهم می‌کنند [۳۰]. در ادامه به معرفی و مقایسه این سه فناوری می‌پردازیم.

- **فناوری LoRaWAN[۱]**

LoRaWAN یک پروتکل شبکه‌ای است که بر پایه فناوری مدولاسیون LoRa عمل می‌کند و توسط LoRa Alliance توسعه یافته است؛ این فناوری یک استاندارد باز محسوب می‌شود. LoRaWAN به دلیل برد طولانی، مصرف انرژی بسیار پایین و قابلیت ارسال داده‌ها به تعداد زیادی دستگاه، برای پوشش‌دهی مناطق وسیع و دورافتاده مانند مراتع بسیار مناسب است [۳۱]. برد ارتباطی این فناوری در مناطق شهری تا چندین کیلومتر و در مناطق روستایی تا ۱۵ کیلومتر یا بیشتر می‌رسد. استفاده از باندهای فرکانسی بدون مجوز (ISM) مانند ۸۶۸ مگاهرتز در اروپا، ۹۱۵ مگاهرتز در آمریکای شمالی و ۴۳۳ مگاهرتز در برخی مناطق آسیا، امکان ارتباط در گستره وسیعی را بدون نیاز به مجوز فراهم می‌کند [۳۰]. توپولوژی شبکه در LoRaWAN به صورت ستاره‌ای یا ستاره‌ای در ستاره است که به سادگی ساختار شبکه کمک می‌کند [۳۱].

این پروتکل از رمزنگاری سرتاسری با استاندارد AES-128 برای حفظ امنیت داده‌ها استفاده می‌کند، که امنیت بالایی را در سرتاسر شبکه تضمین می‌نماید [۹]. انعطاف‌پذیری LoRaWAN با امکان تنظیم پارامترهایی مانند فاکتور گسترش[۲]و پهنای باند برای بهینه‌سازی بین برد و سرعت داده، افزایش یافته است. همچنین، پشتیبانی از پروتکل‌های لایه فیزیکی IEEE 802.15.4 باعث افزایش تطبیق‌پذیری آن با دیگر تجهیزات می‌شود [۳۱].

مزایای استفاده از LoRaWAN شامل برد طولانی و مصرف توان پایین است که آن را برای پایش مناطق گسترده با حداقل مصرف انرژی مناسب می‌سازد. امنیت بالای آن به دلیل استفاده از رمزنگاری قوی، از دیگر مزایای مهم این فناوری است [۹]. تکنیک مدولاسیون LoRa سیگنال‌ها را در برابر نویز و تداخل مقاوم می‌کند، که این امر قابلیت اطمینان ارتباطات را افزایش می‌دهد [۳۰]. علاوه بر این، استفاده از باندهای فرکانسی بدون مجوز موانع ورود به بازار را کاهش داده و تسهیل در پیاده‌سازی را به همراه دارد [۳۱].

در عین حال، LoRaWAN دارای معایبی نیز است. پهنای باند محدود آن مناسب برای انتقال داده‌های کم‌حجم بوده و برای داده‌های حجیم یا نیازمند سرعت‌های بالا مناسب نیست. تأخیر در ارتباطات ممکن است برای کاربردهای حساس به زمان واقعی نامناسب باشد. ظرفیت شبکه نیز محدود است و تعداد دستگاه‌های کمتری را نسبت به شبکه‌های سلولی پشتیبانی می‌کند. همچنین، نیاز به راه‌اندازی شبکه اختصاصی ممکن است هزینه‌های نصب و نگهداری را افزایش دهد [۹, ۳۱].

کاربردهای LoRaWAN در پایش منابع طبیعی گسترده است. در کشاورزی هوشمند، از این فناوری برای نظارت بر رطوبت خاک، دما، سطح pH و سایر پارامترهای محیطی استفاده می‌شود که به بهینه‌سازی فرآیندهای کشاورزی کمک می‌کند. در مدیریت آب و فاضلاب، امکان پایش کیفیت و مصرف آب و نظارت بر شبکه‌های آبرسانی فراهم می‌شود. نظارت زیست‌محیطی نیز از دیگر کاربردهای مهم LoRaWAN است که شامل جمع‌آوری داده‌های مربوط به شرایط جوی، سطح آب رودخانه‌ها و حیات‌وحش می‌باشد [۳۲]. این اطلاعات می‌توانند در مدیریت بهتر منابع طبیعی و حفاظت از محیط‌زیست مورد استفاده قرار گیرند.

- **فناوری SIGFOX**

SIGFOX یک فناوری اختصاصی است که توسط شرکت فرانسوی SIGFOX در سال ۲۰۰۹ توسعه یافته است. این شرکت به‌عنوان اولین ارائه‌دهنده خدمات ارتباطی صرفاً برای IoT شناخته می‌شود. SIGFOX با برد بلند تا ۵۰ کیلومتر در مناطق روستایی و بین ۳ تا ۱۰ کیلومتر در مناطق شهری، امکان ارتباط در فواصل طولانی را فراهم می‌کند. مصرف انرژی بسیار پایین این فناوری، آن را برای دستگاه‌هایی با باتری محدود و نیاز به عمر طولانی مناسب می‌سازد. توپولوژی شبکه SIGFOX شامل دستگاه‌ها، ایستگاه‌های پایه و ابر SIGFOX است که ساختاری ساده و کارآمد را ایجاد می‌کند. ظرفیت داده در SIGFOX محدود بوده و حداکثر ۱۲ بایت برای هر پیام و حداکثر ۱۴۰ پیام در روز (محدود به ۷ پیام در ساعت) را پشتیبانی می‌کند. این فناوری از روش‌های ارتباطی Uplink

[۱] Long Range Wide Area Network

[۲] Spreading Factor

(ارسال داده از دستگاه به ابر) و Downlink (ارسال داده از ابر به دستگاه) استفاده می‌کند. پروتکل‌های SIGFOX شامل لایه فیزیکی، MAC، Frame و لایه کاربردی هستند که هر یک نقش مشخصی در انتقال و مدیریت داده‌ها ایفا می‌کنند [۳۱].

از مزایای مهم SIGFOX می‌توان به مصرف انرژی بسیار پایین اشاره کرد که منجر به افزایش عمر باتری دستگاه‌ها می‌شود. هزینه پایین تجهیزات و اشتراک، این فناوری را به گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه تبدیل کرده است. پوشش وسیع SIGFOX، آن را برای مقیاس‌های استانی، ملی و بین‌المللی مناسب می‌سازد. علاوه بر این، نصب آسان و عدم نیاز به پیکربندی پیچیده، فرایند پیاده‌سازی را تسهیل می‌کند. در مقابل، SIGFOX دارای معایبی نیز هست. پهنای باند و ظرفیت داده محدود، این فناوری را مناسب برای انتقال داده‌های کم‌حجم و دوره‌ای می‌کند و برای کاربردهایی که نیاز به انتقال داده‌های حجیم دارند، مناسب نیست. تأخیر ارتباطی ممکن است برای کاربردهای حساس به زمان واقعی مشکل‌ساز باشد. همچنین، ارتباط دوطرفه محدود به دلیل عدم پشتیبانی از ارتباطات دوطرفه پیوسته، می‌تواند برخی محدودیت‌ها را ایجاد کند [۳۱].

در زمینه پایش منابع طبیعی، SIGFOX کاربردهای متعددی دارد. در کشاورزی هوشمند، این فناوری برای نظارت بر شرایط زیست‌محیطی به منظور بهینه‌سازی کشت استفاده می‌شود [۳۲]. سنسورها و تجهیزات نظارتی مبتنی بر SIGFOX قادر به شناسایی دود و مانیتورینگ کیفیت هوا و آب هستند. در تجزیه‌وتحلیل محیط‌زیست، SIGFOX با جمع‌آوری داده‌ها به پایش تغییرات زیست‌محیطی کمک می‌کند [۳۱]. این ویژگی‌ها SIGFOX را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای مختلف IOT تبدیل کرده است.

- **فناوری NB-IoT**

NB-IoT یکی از فناوری‌های پیشرفته در حوزه IoT است که به عنوان یک استاندارد مبتنی بر شبکه‌های سلولی توسط 3GPP توسعه یافته است. این فناوری به منظور بهبود پوشش، افزایش عمر باتری و کاهش هزینه‌های کلی دستگاه‌های IoT طراحی شده است. NB-IoT از باند فرکانسی باریک ۲۰۰ کیلوهرتز استفاده می‌کند که بهینه‌سازی شده برای مصرف انرژی پایین است و معمولاً در باندهای فرکانسی کم تراکم مانند باندهای مستقل، گاردباندهای LTE یا کنار باندهای LTE موجود به کار گرفته می‌شود. این فناوری با بهره‌گیری از سیگنال‌های با توان بسیار کم، امکان انتقال داده‌ها را در مسافت‌های طولانی و در محیط‌هایی با شرایط سخت فراهم می‌کند که این امر منجر به بهبود قابلیت نفوذ و پوشش گسترده‌تری می‌شود. همچنین، NB-IoT با استفاده از حالت‌های صرفه‌جویی انرژی مانند PSM و eDRX[۲]، اجازه می‌دهد تا دستگاه‌ها برای مدت طولانی در حالت خواب باقی بمانند و تنها در زمان‌های ضروری برای ارسال و دریافت داده‌ها فعال شوند. این ویژگی به حداکثر کردن عمر باتری دستگاه‌های IoT کمک می‌کند [۳۰].

یکی از ویژگی‌های برجسته NB-IoT، پشتیبانی از تعداد بسیار زیادی دستگاه در یک سلول شبکه است که این ویژگی آن را برای کاربردهایی که نیازمند اتصال ده‌ها یا صدها دستگاه در یک ناحیه محدود هستند، ایده‌آل می‌سازد. علاوه بر این، NB-IoT توانایی بهبود پوشش داخلی را داراست و می‌تواند به محیط‌های دشواری مانند زیرزمین‌ها یا ساختمان‌های با ساختار فلزی که معمولاً سیگنال‌های سلولی در آنها دچار اختلال می‌شوند، نفوذ کند. امنیت بالای این فناوری نیز از دیگر مزایای آن است که با استفاده از استانداردهای امنیتی پیشرفته شبکه‌های سلولی، اطمینان از حریم خصوصی و امنیت داده‌ها را فراهم می‌کند [۳۰].

مزایای اصلی NB-IoT شامل مصرف انرژی کم، پوشش گسترده و نفوذ بالا، هزینه کم، امنیت بالا و پشتیبانی از تعداد زیاد دستگاه است. مصرف انرژی پایین امکان عمر باتری طولانی را برای دستگاه‌های IoT فراهم می‌آورد که این ویژگی به‌ویژه برای کاربردهایی که در مکان‌های دورافتاده قرار دارند، بسیار مفید است. استفاده از زیرساخت‌های موبایل موجود باعث کاهش هزینه‌های نصب و بهره‌برداری می‌شود و امنیت بالا به دلیل بهره‌گیری از تکنولوژی‌های امنیتی پیشرفته، از دیگر مزایای این فناوری محسوب می‌گردد. همچنین، پشتیبانی از تعداد زیادی دستگاه در یک شبکه، آن را برای شهرهای هوشمند و کاربردهای صنعتی که نیازمند اتصال تعداد زیادی دستگاه هستند، مناسب می‌سازد. با این حال، NB-IoT دارای معایبی نیز می‌باشد. تأخیر در ارتباطات ممکن است برای کاربردهای حساس به زمان واقعی مناسب نباشد و محدودیت‌های داده‌ای آن، این فناوری را برای انتقال داده‌های حجیم غیرمناسب می‌کند. پوشش

---

[۱] Power Saving Mode

[۲] extended Discontinuous Reception

محدود در مناطق دورافتاده نیز یکی از چالش‌های اصلی این فناوری است که به پوشش اپراتورهای موبایل وابسته بوده و ممکن است در مناطق روستایی یا دور از شهر محدودیت‌هایی ایجاد کند. علاوه بر این، پیچیدگی و هزینه‌های بیشتر نسبت به فناوری‌های غیرسلولی، به دلیل نیاز به سیم‌کارت و اشتراک‌های اپراتوری، می‌تواند مانع از پذیرش گسترده‌تر آن شود [۳۰].

در زمینه پایش و حفاظت از منابع طبیعی، NB-IoT کاربردهای متنوعی دارد. در کنترل و مدیریت تجهیزات صنعتی، این فناوری امکان نظارت بر ماشین‌آلات و فرآیندهای تولیدی را فراهم می‌آورد که به بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. در کشاورزی هوشمند، NB-IoT برای نظارت بر شرایط محیطی مانند دما، رطوبت و سطح PH استفاده می‌شود که به بهینه‌سازی کشت و افزایش بهره‌وری کشاورزان کمک می‌کند. همچنین، در مدیریت منابع آب، این فناوری برای خواندن اتوماتیک کنتورها و نظارت بر شبکه‌های آبرسانی به کار گرفته می‌شود که به مدیریت بهتر منابع آبی و جلوگیری از هدررفت آب کمک می‌کند. این کاربردها نشان‌دهنده توانمندی NB-IoT در ارائه راه‌حل‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای پایش و حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی هستند [۹].

در مجموع، NB-IoT با ویژگی‌ها و مزایای منحصر به فرد خود، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای پیشرفته و صنعتی در حوزه اینترنت اشیا و پایش منابع طبیعی محسوب می‌شود. با این حال، انتخاب این فناوری باید بر اساس نیازمندی‌های خاص پروژه، پوشش‌دهی مورد نیاز، حجم داده‌ها، مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط انجام گیرد تا بهترین نتیجه حاصل شود [۳۰].

۲-۳-مدیریت داده‌ها و بهینه‌سازی انرژی

در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم که برای پایش مراتع و اراضی منابع طبیعی به‌کار می‌روند، مدیریت مؤثر داده‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است [۳۳, ۳۴]. این شبکه‌ها شامل حسگرهایی هستند که به‌صورت مستمر داده‌های محیطی مانند دما، رطوبت خاک، شاخص‌های آتش‌سوزی و حرکات غیرمجاز را جمع‌آوری می‌کنند [۳۲]. انتقال این داده‌ها به درگاه‌های مرکزی از طریق پروتکل‌های کم‌مصرفی مانند LoRaWAN یا NB-IoT انجام می‌شود [۳۰, ۳۵]. پس از تجمیع داده‌ها در درگاه‌های مرکزی، انتقال به سرور مرکزی از طریق ارتباطات سلولی مانند LTE یا 3G، یا ارتباطات ماهواره‌ای صورت می‌پذیرد [۲۷]. در سرور مرکزی، داده‌ها با استفاده از سیستم‌های رایانش ابری مدیریت و ذخیره می‌شوند که امکان دسترسی بلادرنگ و از راه دور را برای مدیران و تصمیم‌گیران فراهم می‌آورد [۲۶]. استفاده از رایانش ابری علاوه بر مقیاس‌پذیری بالا و مدیریت داده‌های حجیم، به کاربران اجازه می‌دهد داده‌ها را از چندین منبع و در زمان‌های مختلف جمع‌آوری و تحلیل کنند [۳۶]. در این سیستم‌ها، رابط‌های کاربری تحت وب طراحی می‌شوند که داده‌های جمع‌آوری‌شده را به‌صورت نمودارهای بلادرنگ و شاخص‌های محیطی نمایش می‌دهند و امکان دریافت هشدارهای خودکار در صورت بروز شرایط غیرمعمول مانند افزایش دما یا کاهش رطوبت خاک را فراهم می‌کنند [۳۷].

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در این شبکه‌ها، مدیریت مصرف انرژی و افزایش عمر باتری حسگرها به‌ویژه در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور است [۲۸]. برای مواجهه با این چالش، از الگوریتم‌ها و مکانیزم‌های بهینه‌سازی انرژی استفاده می‌شود که عملکرد حسگرها را با توجه به شرایط محیطی و نیاز به ارسال داده‌ها تنظیم می‌کنند [۳۸]. حسگرها در اغلب زمان‌ها در حالت خواب قرار دارند تا مصرف انرژی به حداقل برسد و تنها در زمان‌های ضروری برای جمع‌آوری و ارسال داده‌ها فعال می‌شوند [۳۹]. این روش به‌طور قابل‌توجهی عمر باتری حسگرها را افزایش می‌دهد [۴۰]. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های کم‌مصرفی مانند LoRaWAN یا NB-IoTبه دلیل مصرف انرژی پایین و برد ارتباطی بلند، امکان کارکرد حسگرها را در مناطق وسیع بدون نیاز به تعویض مکرر باتری فراهم می‌کند [۹, ۴۰]. به‌کارگیری باتری‌های با ظرفیت بالا و یا پنل‌های خورشیدی کوچک به‌عنوان منابع انرژی جایگزین نیز می‌تواند عمر مفید سیستم را افزایش داده و نیاز به نگهداری و تعویض باتری‌ها را کاهش دهد [۴۱, ۴۲].

مکانیزم‌های هوشمند مدیریت انرژی نیز نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا می‌کنند [۲۸]. این مکانیزم‌ها با تحلیل شرایط محیطی و پیش‌بینی نیازهای ارتباطی، حسگرها را تنها در مواقع ضروری فعال کرده و داده‌ها را با فواصل زمانی متغیر جمع‌آوری می‌کنند تا از مصرف انرژی بیش از حد جلوگیری شود [۴۳]. برای مثال، در روزهایی که خطر آتش‌سوزی بالا است، داده‌ها با فواصل زمانی کوتاه‌تر ارسال می‌شوند تا امکان واکنش سریع فراهم شود؛ در حالی که در شرایط پایدار و بدون خطر، فواصل ارسال داده‌ها افزایش می‌یابد. این استراتژی‌ها باعث می‌شوند تا شبکه‌های سنسوری بی‌سیم بتوانند برای مدت زمان طولانی بدون نیاز به مداخلات فنی مکرر عمل کنند و داده‌های حیاتی را برای مدیریت و پایش مؤثر مراتع و اراضی منابع طبیعی فراهم آورند [۳۳].

تلفیق مدیریت داده‌ها با بهینه‌سازی انرژی در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم، نه تنها به افزایش کارایی و پایداری سیستم منجر می‌شود، بلکه امکان ارائه اطلاعات دقیق و بلادرنگ را برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و حفاظتی فراهم می‌کند [۴۴]. این رویکرد جامع، به حفظ منابع طبیعی و کاهش خسارات زیست‌محیطی کمک شایانی می‌نماید و بهره‌وری را در مدیریت اکوسیستم‌های حساس افزایش می‌دهد [۴۵]. با توسعه فناوری‌های نوین و ادغام آن‌ها با راهکارهای بهینه‌سازی انرژی، می‌توان انتظار داشت که کارایی شبکه‌های سنسوری در پایش محیطی به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابد [۴۶, ۴۷].

۳-نتایج تحقیق

در این بخش به تحلیل و ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی برای پایش مراتع و اراضی صعب‌العبور با استفاده از فناوری‌های ارتباطی بی‌سیم می‌پردازد. ابتدا انتخاب بهترین فناوری ارتباطی بر اساس معیارهایی همچون برد ارتباطی، مصرف انرژی و در دسترس بودن زیرساخت‌ها و هزینه پیاده‌سازی بررسی می‌شود. سپس، طراحی شبکه مبتنی بر این فناوری و تحلیل عملکرد آن در شرایط مختلف محیطی مورد بحث قرار می‌گیرد. علاوه بر این، مدیریت بهینه انرژی به‌منظور افزایش طول عمر شبکه سنسوری و بهبود کارایی سیستم مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت، ارزیابی امنیت و قابلیت اطمینان شبکه در مواجهه با چالش‌های امنیتی و پایداری در شرایط سخت محیطی ارائه می‌شود.

۳-۱-انتخاب بهترین فناوری ارتباطی برای پایش مراتع

در پایش و حفاظت از مراتع و اراضی طبیعی صعب‌العبور، انتخاب فناوری ارتباطی مناسب یکی از مهم‌ترین تصمیمات است. در این تحقیق، سه فناوری LoRaWAN، SIGFOX و NB-IoT مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که هر کدام ویژگی‌ها و مزایا و معایب خاص خود را دارند. جدول ۲، مقایسه‌ای جامع بین LoRaWAN، SIGFOX و NB-IoT از دیدگاه کاربرد در پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی ارائه می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه بین فناوری‌های LoRaWAN، SIGFOX وNB-IoT جهت استفاده در پایش مراتع و اراضی منابع طبیعی

ویژگی	LoRaWAN	SIGFOX	NB-IoT
نوع فناوری	استاندارد باز، غیرسلولی	فناوری اختصاصی، غیرسلولی	استاندارد 3GPP، سلولی
برد ارتباطی	تا ۱۵ کیلومتر	تا ۵۰ کیلومتر	تا ۳۵ کیلومتر
مصرف انرژی	بسیار پایین	بسیار پایین	بسیار پایین
ظرفیت داده	حداکثر ۲۴۳ بایت در هر پیام	حداکثر ۱۲ بایت در هر پیام	تا ۱۶۰۰ بایت در هر پیام
تعداد پیام در روز	نامحدود	حداکثر ۷ پیام در ساعت	نامحدود
امنیت	رمزنگاری سرتاسری AES-128	رمزنگاری ساده	امنیت مبتنی بر استانداردهایLTE
زیرساخت شبکه	نیاز به ایجاد شبکه توسط اپراتور	مدیریت‌شده توسطSIGFOX	ارائه‌شده توسط اپراتورهای مخابراتی
هزینه پیاده‌سازی	متوسط (نیاز به درگاه‌ها و سرورها)	پایین (استفاده از SIGFOX)	بالا (هزینه‌های اپراتوری)
مقیاس‌پذیری	بالا	بالا	بسیار بالا
مناسب برای	پایش محیطی، کشاورزی هوشمند، شهر هوشمند	کاربردهای ساده با داده‌های کم‌حجم	کاربردهای صنعتی، حمل‌ونقل، پایش پیشرفته
محدودیت‌ها	پهنای باند محدود، تأخیر ارتباطی	پهنای باند و ظرفیت داده محدود، ارتباط دوطرفه محدود	وابستگی به پوشش اپراتور، هزینه بالاتر
فرکانس عملیاتی	باندهای ISM (۴۳۳/۹۱۵/۸۶۸ مگاهرتز)	باندهای ISM (۹۱۵/۸۶۸ مگاهرتز)	باندهای سلولی(LTE)
توپولوژی شبکه	ستاره‌ای، ستاره‌ای در ستاره	ستاره‌ای	ستاره‌ای
ارتباط دوطرفه	پشتیبانی می‌شود	محدودیت در ارتباط دوطرفه پیوسته	پشتیبانی می‌شود
نصب و راه‌اندازی	نیاز به زیرساخت‌های اختصاصی یا اشتراکی	نصب آسان با استفاده از زیرساخت SIGFOX	وابسته به اپراتور، نیاز به سیم‌کارت

LoRaWAN به دلیل برد بلند، مصرف انرژی بسیار پایین، انعطاف‌پذیری در تنظیمات و امنیت بالا به‌عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای پایش و حفاظت از مراتع مطرح می‌شود. امکان ایجاد شبکه‌های اختصاصی یا استفاده از شبکه‌های اشتراکی این فناوری را بسیار کارآمد و منعطف برای مناطق دورافتاده کرده است. علاوه بر این، LoRaWAN یک فناوری باز است و نیازی به اخذ مجوز از شبکه‌های اختصاصی ندارد، که این امر به گستردگی استفاده از آن در ایران کمک می‌کند. به دلیل دسترسی گسترده به تجهیزات و ماژول‌های LoRa در ایران، پیاده‌سازی این فناوری ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است.

SIGFOX به دلیل سادگی در پیاده‌سازی، هزینه پایین و مصرف انرژی کم، برای انتقال داده‌های کم‌حجم و دوره‌ای مناسب است. با این حال، محدودیت‌های آن در حجم و تعداد پیام‌ها و عدم پشتیبانی از ارتباطات دوطرفه پیوسته باعث می‌شود که برای کاربردهایی که نیاز به انتقال داده‌های مداوم و با حجم بالاتر دارند، مناسب نباشد. همچنین، زیرساخت‌های SIGFOX در ایران محدود است و به اندازه LoRaWAN در دسترس نیست.

NB-IoT به دلیل امنیت بالا، پوشش گسترده و قابلیت پشتیبانی از تعداد زیادی دستگاه، گزینه مناسبی برای کاربردهای صنعتی و پیشرفته است. با این حال، این فناوری به زیرساخت‌های اپراتورهای مخابراتی وابسته است و هزینه‌های پیاده‌سازی و نگهداری آن بالاست. در ایران، برخی از اپراتورهای مخابراتی از NB-IoT پشتیبانی می‌کنند، اما زیرساخت‌های گسترده و کاملی برای آن هنوز فراهم نشده و دسترسی به تجهیزات آن محدودتر است.

با توجه به نیازهای خاص پروژه‌های پایش مراتع و اراضی منابع طبیعی در ایران، که شامل گستردگی جغرافیایی، نیاز به برد طولانی، پایداری بالا و هزینه پایین پیاده‌سازی است، LoRaWAN به‌عنوان بهترین انتخاب برای این کاربرد مطرح می‌شود. علاوه بر مزایای فنی، دسترسی به تجهیزات این فناوری در ایران و امکان پیاده‌سازی شبکه‌های اختصاصی بدون وابستگی به زیرساخت‌های خاص، از دیگر دلایلی است که LoRaWAN را به گزینه‌ای مناسب و کارآمد برای حفاظت و پایش محیط‌های طبیعی ایران تبدیل کرده است.

۳-۲-طراحی شبکه مبتنی بر LoRaWAN و تحلیل عملکرد آن

در این تحقیق، شبکه سنسوری بی‌سیم مبتنی بر فناوری LoRaWAN برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. LoRaWAN به‌عنوان یک پروتکل ارتباطی کم‌مصرف و با برد بلند، گزینه‌ای ایده‌آل برای پایش مناطق صعب‌العبور و گسترده به شمار می‌آید. این فناوری با استفاده از تکنیک‌های مدولاسیون طیف گسترده مبتنی بر Chirp Spread Spectrum (CSS)، امکان انتقال داده‌ها را در بردهای بالاتر با مصرف انرژی بسیار پایین فراهم می‌کند.

شبکه طراحی‌شده بر اساس توپولوژی ستاره‌ای است. در این توپولوژی، حسگرهای بی‌سیم در نقاط مختلف مراتع نصب شده و داده‌های جمع‌آوری‌شده را به درگاه مرکزی ارسال می‌کنند. درگاه مرکزی وظیفه انتقال داده‌ها به سرور ابری را از طریق ارتباطات اینترنتی بر عهده دارد. این توپولوژی به دلیل کاهش پیچیدگی شبکه و بهینه‌سازی مصرف انرژی، برای پایش مناطق وسیع و کم‌جمعیت مناسب است. طراحی توپولوژی ستاره‌ای، علاوه بر سادگی پیاده‌سازی، امکان مدیریت آسان شبکه را فراهم کرده و نقاط ضعف ناشی از اتصال‌های متعدد را کاهش می‌دهد [۳۰].

در این پروژه، از ماژول‌های LoRa بر پایه تراشه SX1278 با فرکانس کاری ۴۳۳ مگاهرتز استفاده شده است. این ماژول‌ها که توسط شرکت AI-Thinker توسعه یافته‌اند، امکان ارتباط بی‌سیم بین دستگاه‌های کم‌توان و دور از هم را فراهم می‌کنند. ماژول‌های مورد استفاده شامل لایه رادیویی LoRa، GPIO، UART، SPI و I2C هستند که امکان ارتباط با میکروکنترلر را فراهم می‌کنند. برای کنترل و مدیریت ماژول‌های LoRa، از میکروکنترلر ESP32 استفاده شده است. این میکروکنترلر با قابلیت‌های بالا و انعطاف‌پذیری در برنامه‌نویسی، امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیچیده و مدیریت انرژی را فراهم می‌کند. ارتباط بین میکروکنترلر و ماژول LoRa از طریق پروتکل SPI برقرار می‌شود. ماژول‌های LoRa از طریق بردهای کمکی به بردهای Arduino یا Raspberry Pi متصل می‌شوند. در شکل ۱ پیکربندی ماژول‌های LoRa و نمایی از ایستگاه‌های نصب حسگرها ارائه شده است. مشخصات ماژول LoRa استفاده شده در این پژوهش در جدول ۳ نشان داده شده است.

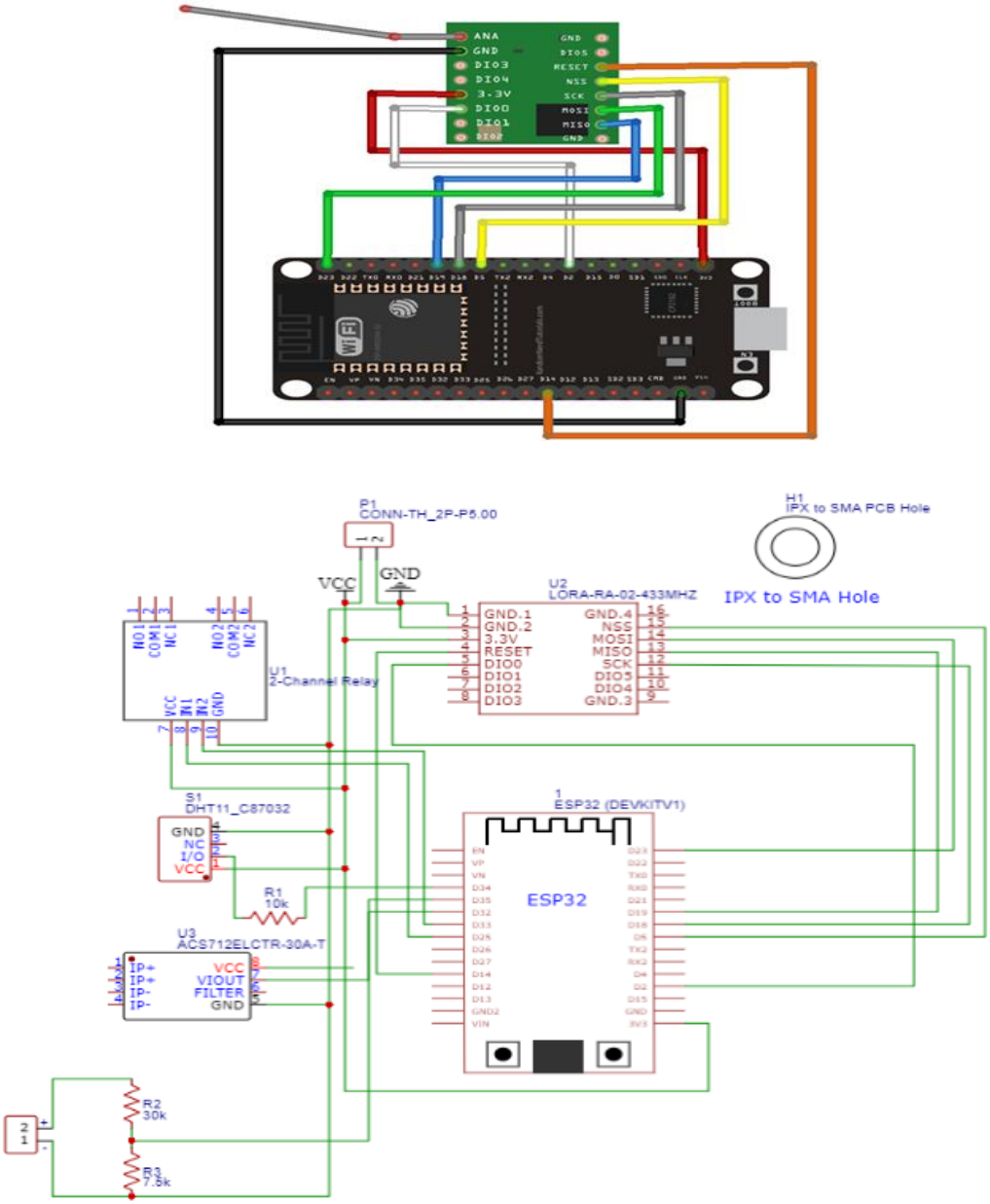
شکل ۱: نمونه اولیه سیستم پایش محیطی پیاده‌سازی شده بر روی بردبورد

سیستم پیشنهادی در این پژوهش متشکل از حسگرهای دما و رطوبت مانند DHT11 برای اندازه‌گیری پارامترهای محیطی است. سنسور DHT11 یک سنسور دیجیتال کالیبره‌شده و مقرون‌به‌صرفه است که محدوده اندازه‌گیری رطوبت بین ۲۰٪ تا ۹۰٪ رطوبت نسبی و دما از ۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد را پوشش می‌دهد. ولتاژ کاری این ماژول بین ۳,۳ تا ۵ ولت DC است و دارای سه پایه VCC، GND و Signal می‌باشد. با توجه به خروجی دیجیتال این سنسور، به‌راحتی می‌تواند به میکروکنترلر ESP32 متصل شود و نیازی به تبدیل آنالوگ به دیجیتال نیست.

جدول ۳: جدول مشخصات ماژول LORA

مدل ماژول	RA-02
بسته	SMD-16
رابط کاربری	SPI
نرخ بیت قابل‌برنامه‌ریزی	تا ۳۰۰ کیلوبایت بر ثانیه
محدوده فرکانس	410-525MHZ
پایه خروجی آنتن	IPEX
حداکثر توان انتقال	18~19dbm
توان مصرفی	433MHz: TX:93mA, RX:12.15mA Standby:1.6mA 470MHZ: TX:97mA, RX:12.15mA Standby:1.5mA
ولتاژ کاری	2.5~3.7v
دمای کارکرد	-30 ℃ ~ 85℃

این سیستم کاملاً قابل‌انعطاف بوده و با توجه به تعداد قابل‌قبول پایه‌های ADC ماژول ESP32، می‌توان حسگرهای دیگری را نیز بر اساس نیاز به آن متصل کرد. به‌عنوان مثال، حسگرهای رطوبت خاک، تشخیص دود و آتش، یا سنسورهای اندازه‌گیری شدت نور می‌توانند به سیستم اضافه شوند. این ویژگی امکان سفارشی‌سازی شبکه را برای کاربردهای مختلف در پایش منابع طبیعی فراهم می‌کند. ارتباط میان ماژول LoRa و ESP32 از طریق رابط SPI انجام شده که در شماتیک شکل ۲ نشان داده شده است. ماژول‌های LoRa مورد استفاده بر پایه تراشه SX1278 با فرکانس کاری ۴۳۳ مگاهرتز هستند که توسط شرکت AI-Thinker توسعه یافته‌اند. این ماژول‌ها امکان ارتباط بی‌سیم بین دستگاه‌های کم‌مصرف و دور از هم را فراهم می‌کنند.



شکل ۲: شماتیک اتصال ماژول LORA به ESP32

جدول ۴: جدول اتصال پایه به پایه ماژولLORA به ESP32

LORA	ESP32
ANA	ANTENA
GND	GND
3.3V	3.3V
RESET	GPIO14
NSS	GPIO5
SCK	GPIO18
MOSI	GPIO23
MISO	GPIO19
DIO0	GPIO2

ماژول‌های LoRa به‌تنهایی قابل برنامه‌نویسی نیستند و برای راه‌اندازی و کنترل نیاز به یک میکروکنترلر کمکی دارند. در این پروژه، از ESP32 استفاده شده که با محیط‌های توسعه متعددی قابل برنامه‌نویسی است. در اینجا، از محیط توسعه Arduino IDE استفاده شده و برنامه‌ها به زبان C نوشته شده‌اند.

LoRa یکی از روش‌های مدولاسیون دیجیتال است که برای انتقال داده‌ها در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم با پهنای باند بسیار باریک و مصرف انرژی پایین استفاده می‌شود. این روش بر اساس تکنیک Spread Spectrum بنا شده است. در این روش، اطلاعات دیجیتال به‌صورت دودویی و بیت به بیت ارسال می‌شوند. این بیت‌ها به چندین نمونه تقسیم شده و با استفاده از الگوریتم Chirp Spreading، هر بیت به یک دنباله سیگنال پهن‌باند با فرکانس پایین تبدیل می‌شود.

برای ارسال اطلاعات، یک ماژول به‌عنوان فرستنده و دیگری به‌عنوان گیرنده تعریف و برنامه‌نویسی شده است. در ماژول فرستنده، پس از فراخوانی کتابخانه‌های مربوط به LoRa در محیط Arduino IDE، پین‌های ارتباطی LoRa تنظیم می‌شوند و ماژول با فرکانس مشخص (۴۳۳ مگاهرتز) مقداردهی اولیه می‌شود. سپس، بسته‌های داده با استفاده از روش‌های مناسب ارسال می‌شوند. به‌منظور اطمینان از دریافت داده‌ها توسط گیرنده مورد نظر، از کلمه همگام‌سازی (Sync Word) استفاده شده است؛ به‌طوری‌که هم فرستنده و هم گیرنده از یک کد مشترک استفاده می‌کنند. در ماژول گیرنده، فرآیند مشابهی انجام می‌شود و داده‌های دریافت‌شده پردازش و نمایش داده می‌شوند. همچنین، برای ارتباط چندین ماژول LoRa، از یک ماژول به‌عنوان رله استفاده شده است. بدین ترتیب که ماژول اول اطلاعات حسگرها را به ماژول دوم (رله) ارسال می‌کند و ماژول دوم پس از دریافت، آن را به ماژول سوم انتقال می‌دهد. این ساختار امکان پوشش‌دهی مناطق دورافتاده را بدون نیاز به تقویت‌کننده‌های سیگنال فراهم می‌کند.

برای افزایش طول عمر باتری‌ها، در فصولی که احتمال آتش‌سوزی یا سیلاب بیشتر است، حسگرها با فواصل زمانی کوتاه‌تری فعال شده و داده‌های محیطی را ارسال می‌کنند تا واکنش سریع به حوادث ممکن شود. در مقابل، در شرایط پایدار و بدون خطر، فواصل ارسال داده‌ها افزایش یافته و مصرف انرژی بهینه‌سازی می‌شود. این استراتژی‌های هوشمند مدیریت انرژی باعث شده‌اند تا شبکه بتواند به طور مؤثر در شرایط بحرانی عمل کرده و همچنین در شرایط پایدار به صورت بهینه انرژی مصرف نماید. برای تنظیم فواصل زمانی عملکرد سنسورها و زمان خواب آن‌ها، این کار می‌تواند از طریق ارسال دستورات کنترلی از راه دور انجام شود. با استفاده از قابلیت Downlink در پروتکل LoRaWAN، می‌توان تنظیمات مورد نظر را به حسگرها ارسال کرد. این امکان به مدیران شبکه اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به دسترسی فیزیکی به حسگرها، تنظیمات آن‌ها را بر اساس شرایط محیطی و نیازهای پایش تغییر دهند [۴۸]. این ویژگی نه تنها به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند، بلکه انعطاف‌پذیری و کارایی شبکه را نیز افزایش می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و مزایای قابل توجه LoRaWAN، از جمله مصرف انرژی کم، برد طولانی و انعطاف‌پذیری در طراحی شبکه، این فناوری بهترین گزینه برای پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی در ایران به شمار می‌آید. همچنین، دسترسی گسترده به تجهیزات LoRaWAN در ایران، هزینه‌های اجرایی را به حداقل رسانده و امکان پیاده‌سازی شبکه‌ای پایدار و مطمئن را فراهم می‌کند. این استراتژی ترکیبی از پایش بلادرنگ در شرایط حساس و مدیریت هوشمند انرژی در شرایط پایدار، به LoRaWAN امکان می‌دهد تا در مناطق وسیع و دورافتاده به طور مؤثر عمل کند و همچنان قابلیت ارائه داده‌های دقیق و به موقع را داشته باشد. استفاده از ماژول‌های مبتنی بر SX1278 و میکروکنترلر ESP32، امکان پیاده‌سازی شبکه‌ای پایدار، کارآمد و قابل‌اعتماد را فراهم کرده است.

۳-۳-سیستم توسعه‌یافته و آزمون‌های میدانی

پس از تکمیل مراحل برنامه‌نویسی و اتصالات سیستم طراحی‌شده، آزمون‌های میدانی برای ارزیابی عملکرد و کارایی سیستم انجام شد. نمونه اولیه سیستم بر روی بردبورد پیاده‌سازی شده و اطلاعات از سنسورها توسط پایه‌های میکروکنترلر ESP32 برداشت شد. این اطلاعات به‌وسیله ماژول‌های LoRa بین دو برد ارسال و دریافت گردید. برنامه‌ها به زبان C در محیط توسعه Arduino IDE نوشته شدند و پس از پیکربندی، از طریق کابل USB به میکروکنترلر منتقل شدند. در فضای باز، مدار فرستنده که توسط باتری تغذیه می‌شد، در حال حرکت بود و با افزایش فاصله بین فرستنده و گیرنده، کیفیت سیگنال دریافتی (RSSI) تغییر می‌کرد. با وجود این، ارسال اطلاعات به‌طور پایدار انجام می‌شد. پس از دریافت بسته‌ها توسط ماژول گیرنده، اطلاعات در Serial Monitor نمایش داده شد و نمودار کیفیت سیگنال دریافتی به رنگ قرمز و نسبت سیگنال به نویز که تحت تأثیر فاصله بود، نیز تغییر می‌کرد.

با موفقیت ارتباط بین دو ماژول، ضرورت ارتباط میان سه ماژول یا بیشتر در فواصل طولانی‌تر احساس شد. برای این منظور، ماژول اول به‌عنوان فرستنده اصلی، ماژول دوم به‌عنوان رله (واسط) و ماژول سوم به‌عنوان گیرنده اصلی تنظیم شدند. تمامی ماژول‌ها روی یک فرکانس واحد پیکربندی شدند و بسته ارسالی از ماژول اول مجهز به یک کد شناسایی بود که باید توسط ماژول دوم نیز شناخته شود. در صورت عدم تطابق کدهای شناسایی، ماژول دوم بسته دریافتی را نادیده می‌گرفت. این امر به‌طور قابل‌توجهی امنیت سیستم را افزایش می‌داد. در این آزمون مشخص شد که در صورت افزایش فاصله، گیرنده اصلی تنها بسته ارسالی از رله را دریافت می‌کند، که نشان‌دهنده کارایی موثر ماژول رله در افزایش برد ارتباطی است.

در مرحله بعد، نیاز به ارسال داده‌های دریافتی از ماژول LoRa به فضای ذخیره‌سازی پروژه احساس شد. برای این منظور، از قابلیت‌های نیمه‌دوطرفه ماژول ESP32 استفاده شد تا میکروکنترلر پس از دریافت بسته‌ها، به عنوان رابط اینترنت عمل کند. پس از اتصال به شبکه Wi-Fi، بسته‌های دریافتی به فضای ذخیره‌سازی پروژه ارسال شدند. این داده‌ها از طریق رابط گرافیکی وب‌سایت به‌صورت بلادرنگ نمایش داده شدند و امکان دسترسی آسان برای مدیران و کارشناسان فراهم شد. سیستم توسعه‌یافته با موفقیت داده‌های سنسورها را از طریق شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به مراکز داده منتقل کرده و با ارائه اطلاعات دقیق و به‌موقع، مدیریت و حفاظت از مراتع و اراضی طبیعی را بهبود بخشید.

آزمون‌های میدانی نشان داد که این سیستم از نظر پایداری ارتباطات، مدیریت انرژی، امنیت داده‌ها و انعطاف‌پذیری در شرایط محیطی مختلف عملکرد بسیار مطلوبی دارد. استفاده از ماژول‌های LoRa و میکروکنترلر ESP32 به همراه پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی انرژی و امنیت، باعث شد سیستم بتواند ارتباطات پایدار و مطمئنی در فواصل طولانی و با مصرف انرژی کم برقرار کند. همچنین، امکان ارسال داده‌ها به فضای ابری از طریق اینترنت، فرصت‌های متعددی برای تحلیل‌های پیشرفته و تصمیم‌گیری‌های به‌موقع فراهم ساخت.

نتایج این آزمون‌های میدانی نشان می‌دهد که سیستم توسعه‌یافته می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در پایش و حفاظت از منابع طبیعی به‌کار گرفته شود. این نتایج به خوبی بیانگر توانمندی فناوری‌های نوین در بهبود مدیریت منابع و حفاظت از محیط زیست هستند و نشان می‌دهند که این سیستم می‌تواند با کارایی بالا در شرایط محیطی مختلف، به‌طور موثر عمل کرده و اطلاعات مفیدی را در اختیار کاربران قرار دهد.

۴-نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی و ارزیابی کاربرد فناوری LoRaWAN در پایش و حفاظت از مراتع و اراضی منابع طبیعی پرداخته است. LoRaWAN به عنوان فناوری ارتباطی کم‌مصرف با برد طولانی، به دلیل ویژگی‌هایی چون مصرف انرژی پایین، امنیت بالا، و امکان ایجاد شبکه‌های اختصاصی در مناطق صعب‌العبور، به عنوان بهترین گزینه برای پایش و مدیریت این مناطق انتخاب شد. شبکه پیشنهادی با توپولوژی ستاره‌ای طراحی شده که در آن حسگرها به یک درگاه مرکزی متصل می‌شوند و داده‌های محیطی همچون دما، رطوبت، و شاخص‌های خطر مانند دود را به سرورهای ابری منتقل می‌کنند. این ساختار نه‌تنها باعث بهینه‌سازی مصرف انرژی شد، بلکه با قابلیت ذخیره‌سازی داده‌ها در فضای ابری، امکان پایش بلادرنگ و انجام تحلیل‌های پیشرفته را فراهم کرد.

نتایج آزمون‌های میدانی نشان داد که این سیستم از لحاظ پایداری ارتباطات، مدیریت مصرف انرژی، امنیت داده‌ها و تطبیق‌پذیری با شرایط مختلف محیطی عملکردی بسیار مطلوب دارد. در سناریوهای آزمایشی، سیستم توانست تا فواصل طولانی، ارتباط پایدار و مطمئن خود را حفظ کند. همچنین، با استفاده از ماژول‌های رله‌ای، محدوده پوشش‌دهی شبکه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. این ویژگی‌ها در محیط‌های دورافتاده و سخت‌گذر، که نیاز به تجهیزات ارتباطی محدود و پایش گسترده است، اهمیت ویژه‌ای دارد و نشان داد که سیستم می‌تواند داده‌ها را با اطمینان بالا و مصرف انرژی کم در مسافت‌های طولانی انتقال دهد. این مزایا به‌طور خاص برای مناطقی که نیاز به تعویض مکرر باتری ندارند، بسیار حائز اهمیت است.

در مجموع، این تحقیق نشان داد که LoRaWAN به دلیل دسترسی گسترده به تجهیزات، هزینه‌های پایین پیاده‌سازی و پایداری در شرایط دشوار محیطی، راهکاری کارآمد و قابل اعتماد برای پایش و حفاظت از منابع طبیعی در ایران ارائه می‌دهد. این سیستم نه‌تنها به بهبود مدیریت منابع طبیعی کمک می‌کند، بلکه با ارائه اطلاعات بلادرنگ از وضعیت محیط، در کاهش خسارات ناشی از مخاطرات طبیعی مانند آتش‌سوزی، سیل و فرسایش خاک مؤثر است. توصیه می‌شود در تحقیقات آینده، به توسعه و ارزیابی سیستم

در مقیاس‌های بزرگ‌تر و با استفاده از حسگرهای متنوع‌تر پرداخته شود تا کارایی و قابلیت اطمینان آن در شرایط مختلف به‌طور جامع‌تری مورد بررسی قرار گیرد.

۵-مراجع

1. FAO, *Global Forest Resources Assessment 2020*. 2020, Rome, Italy ;: FAO. 184.
2. on Climate Change , I.P., *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2023: Cambridge University Press.
3. *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. 2019: Cambridge University Press.
4. (IUCN), I.U.f.C.o.N., *World Conservation Report 2020: Overcoming Barriers to Protecting Nature. Gland, Switzerland: IUCN*. 2020.
5. Akyildiz, I.F., et al., *Wireless sensor networks: a survey*. Computer Networks, 2002. **38**(4): p. 393-422.
6. Hart, J.K. and K. Martinez, *Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science?* Earth-Science Reviews, 2006. **78**(3–4): p. 177-191.
7. Buratti, C., et al., *An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution.* Sensors, 2009. **9**(9): p. 6869-6896.
8. Yick, J., B. Mukherjee, and D. Ghosal, *Wireless sensor network survey.* Computer Networks, 20 :(۱۲)۵۲ .۰۸p. 2292-2330.
9. Raza, U., P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, *Low Power Wide Area Networks: An Overview.* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017. **19**(2): p. 855-873.
10. Zhang, Y., *Energy Efficiency Management and Route Optimization for Wireless Sensor Network under the Ubiquitous Power Internet of Things.* European Journal of Electrical Engineering, 2019. **21**(2): p. 217-222.
11. Chang, F.-C. and H.-C. Huang, *A Survey on Intelligent Sensor Network and Its Applications.* J. Netw. Intell :(۱)۱ .۲۰۱۶ ,.p. 1-15.
12. Fernández-Berni, J., et al., *Early forest fire detection by vision-enabled wireless sensor networks.* International Journal of Wildland Fire, 2012. **21**(8): p. 938-949.
13. Watras, C.J., et al., *Evaluation of wireless sensor networks (WSNs) for remote wetland monitoring: design and initial results.* Environmental monitoring and assessment, 2014. **186**: p. 919-934.
14. Lin, T.-H., et al. *Development of Smart Stick for Soil Erosion Monitoring*. in *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2019. IEEE.
15. Mohapatra, A. and T. Trinh, *Early Wildfire Detection Technologies in Practice—A Review.* Sustainability, 2022. **14**(19): p. 12270.
16. Verma, S., et al., *Intelligent Framework Using IoT-Based WSNs for Wildfire Detection.* IEEE Access, 2021. **9**: p. 48185-48196.

17. Chernetskyi, B., V. Kharchenko, and A. Orehov, *Wireless Sensor Network based Forest Fire Early Detection Systems: Development and Implementation.* International Journal of Computing, 2022: p. 92-99.
18. Moradi, S., et al., *Early Wildfire Detection using Different Machine Learning Algorithms.* Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2024: p. 101346.
19. Pasi, A.A. and U. Bhave, *Flood detection system using wireless sensor network.* International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 2015. **5**.(۲)
20. Thekkil, T.M. and N. Prabakaran. *Real-time WSN based early flood detection and control monitoring system*. in *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*. 2017.
21. Ahmed, D.T., M. Siddique, and M.S. Husain, *Flood Monitoring and Early Warning Systems – An IoT Based Perspective.* EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, 2023. **9**.(۲)
22. Wang ,X., et al., *Convergence of Edge Computing and Deep Learning: A Comprehensive Survey.* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020. **22**(2): p. 869-904.
23. Atzori, L., A. Iera, and G. Morabito, *The Internet of Things: A survey*. Computer Networks, 2010 :(۱۵)۵۴ .p. 2787-2805.
24. Sanchez-Iborra, R. and M.-D. Cano, *State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services.* Sensors, 2016. **16**(5): p. 708.
25. Alagarsamy, G., J. Shanthini, and G. Naveen Balaji, *A Survey on Technologies and Challenges of LPWA for Narrowband IoT*, in *Trends in Cloud-based IoT*. 2020, Springer International Publishing. p. 73-84.
26. Botta, A., et al., *Integration of Cloud computing and Internet of Things: A survey.* Future Generation Computer Systems, 2016. **56**: p. 684-700.
27. Khan, M.A. and K. Salah, *IoT security: Review, blockchain solutions, and open challenges.* Future Generation Computer Systems, 2018. **82**: p. 395-411.
28. Anastasi, G., et al., *Energy conservation in wireless sensor networks: A survey.* Ad Hoc Networks, 2 :(۳)۷ .۰۰۹p. 537-568.
29. Centelles, R.P., et al., *Beyond the Star of Stars: An Introduction to Multihop and Mesh for LoRa and LoRaWAN.* IEEE Pervasive Computing, 2021. **20**(2): p. 63-72.
30. Sinha, R.S., Y. Wei, and S.-H. Hwang, *A survey on LPWA technology :LoRa and NB-IoT.* ICT Express, 2017. **3**(1): p. 14-21.
31. Almuhaya, M.A.M., et al., *A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions.* Electronics, 2022. **11**(1): p. 164.
32. Villa-Henriksen, A., et al., *Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential.* Biosystems Engineering, 2020. **191**: p. 60-84.
33. Li, S., L.D. Xu, and S. Zhao, *5G Internet of Things: A survey.* Journal of Industrial Information Integration, 2018 :۱۰ .p. 1-9.
34. Abbasian Dehkordi, S., et al., *A survey on data aggregation techniques in IoT sensor networks.* Wireless Networks, 2019. **26**(2): p. 1243-1263.

35. Mekki, K., et al., *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment* . ICT Express, 2019. **5**(1): p. 1-7.
36. Tsai, C.-W., et al., *Data Mining for Internet of Things: A Survey.* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014. **16**(1): p. 77-97.
37. Wu, M., et al. *Research on the architecture of Internet of Things*. in *2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICACTE)*. 2010. IEEE.
38. Ashween, R., B. Ramakrishnan, and M. Milton Joe, *Energy Efficient Data Gathering Technique Based on Optimal Mobile Sink Node Selection for Improved Network Life Time in Wireless Sensor Network (WSN).* Wireless Personal Communications, 2020. **113**(4): p. 2107-2126.
39. Tchuani Tchakonté, D., E. Simeu, and M. Tchuente, *Lifetime optimization of wireless sensor networks with sleep mode energy consumption of sensor nodes.* Wireless Networks, 2018. **26**(1): p. 91-100.
40. Sarmasti, Z., et al., *FDCD: Fault Detection Method in Clustered WSN Based on Distributed Mode.* AdHoc \& Sensor Wireless Networks, 2022. **52**.
41. Sudevalayam, S. and P. Kulkarni, *Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications.* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011. **13**(3): p. 443-461.
42. Yakine, F. and A. Kenzi, *Energy Harvesting in wireless communication: A survey.* E3S Web of Conferences, 2022. **336**: p. 00074.
43. Behera, T.M., et al., *Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: Architectures, Strategies, and Performance.* Electronics, 2022. **11**(15): p. 2282.
44. Wang, K., et al., *Green Industrial Internet of Things Architecture: An Energy-Efficient Perspective.* IEEE Communications Magazine, 2016. **54**(12): p. 48-54.
45. Palattella, M.R., et al., *Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models.* IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016. **34**(3): p. 510-527.
46. Farahzadi, A., et al., *Middleware technologies for cloud of things: a survey.* Digital Communications and Networks, 2018. **4**(3): p. 176-188.
47. Akbas, A., et al., *Joint Optimization of Transmission Power Level and Packet Size for WSN Lifetime Maximization.* IEEE Sensors Journal, 2016. **16**(12): p. 5084-5094.
48. Centenaro, M., et al., *Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios.* IEEE Wireless Communications, 2016. **23**(5): p. 60-67.