

بررسی نقش فناوری ارتباطی در انرژی مصرفی و کارایی دستگاه های متصل در سامانه های سایبر-فیزیکی

امیر مهدی حسینی منزه^۱

^۱ استادیار، دانشکده ی مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران تهران، ایران
monazzah@iust.ac.ir

چکیده

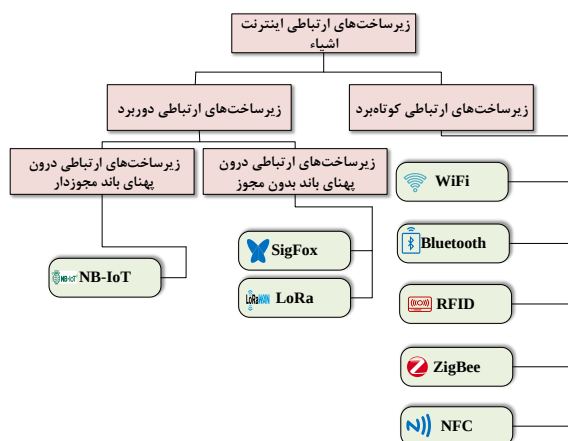
سامانه های سایبر-فیزیکی، فناوری کلیدی در انقلاب صنعتی ۴.۰ هستند که امکان ارتباط بین فضاهای مجازی و واقعیت فیزیکی را ایجاد می کنند. این سامانه ها، از شبکه های ارتباطی و زیرساخت های محاسباتی برای ادغام دنیای مجازی و فیزیکی استفاده می کنند. از چالش های مهم در این فناوری مدیریت مصرف انرژی و کارایی است. بسیاری از دستگاه های مورد استفاده در سامانه های سایبر-فیزیکی با باتری کار می کنند. از آن جایی که انرژی باتری محدود است، مصرف انرژی این دستگاه ها باید به حداقل رسانده شود. زیرساخت ها و پروتکل های ارتباطی متنوعی در این سامانه ها برای ارتباط دستگاه ها و برنامه ها مورد استفاده قرار می گیرند که بهبود مصرف انرژی و توزیع بهتر اطلاعات را فراهم می کنند اما انتخاب این زیرساخت ها و پروتکل ها خود نیز به دلیل تنوع نیاز ها و سامانه ها در حوزه های گوناگون به یک چالش تبدیل شده است بنابراین انتخاب بهترین زیرساخت ها و پروتکل های مناسب برای هر سناریو مهم است. در این پژوهش انواع زیرساخت ها، پروتکل های ارتباطی و معماری آن ها معرفی شده و به پژوهش هایی که انرژی، کارایی زیرساخت ها و پروتکل های ارتباطی را از جنبه های متفاوت با هم مقایسه کرده اند پرداخته شده است. در انتها نیز، مصرف انرژی و نرخ از دست رفتن بسته ها در چند نمونه از زیرساخت ها مانند، BLE، WiFi، LoRa و پروتکل ارتباطی MQTT به عنوان مشاهدات این پژوهش ارزیابی شده است.

کلمات کلیدی: مصرف انرژی، پروتکل های ارتباطی، زیرساخت های ارتباطی، سامانه های سایبر-فیزیکی

۱ مقدمه

صنعتی ۴.۰ است [۱]. بنابراین، این سامانه ها شامل یک واحد کنترلی هستند که قادر به کنترل حسگر^۴ ها و محرک^۵ ها بوده و با دنیای فیزیکی تعامل دارند، داده های به دست آمده را پردازش می کنند و آن ها را از طریق یک رابط با سایر سامانه ها و یا خدمات ابری تبادل می کنند. به عبارت دیگر، سامانه های سایبر-فیزیکی قابلیت ارسال و دریافت داده از دستگاه ها از طریق یک شبکه را دارند و این داده ها به وسیله آن ها منتقل می شوند. یک ویژگی مهم در سامانه های سایبر-فیزیکی، قابلیت به دست آوردن اطلاعات و خدمات به صورت بی درنگ بدون توجه به مکان آن است. از سامانه های سایبر-فیزیکی می توان در صنایع مختلفی مانند صنعت، سلامت، حمل و نقل، کشاورزی و شبکه های کامپیوتری

به عنوان یکی از فناوری های اساسی در انقلاب صنعتی ۴.۰، سامانه های سایبر-فیزیکی^۲ در سال ۲۰۰۶ توسط دانشمند آمریکایی Hellen Gi در پروژه بنیاد علوم ملی معرفی شد [۱]. این فناوری مسئول ایجاد ارتباط بین فضاهای مجازی و واقعیت فیزیکی است که از طریق ادغام شبکه سازی، محاسبات و ذخیره سازی، محیط تعاملی را ممکن می سازد. سامانه های سایبر-فیزیکی سامانه های توزیعی خودکار هستند که واقعیت فیزیکی را با شبکه های ارتباطی و زیرساخت های^۳ محاسباتی یکپارچه می کنند. بر خلاف سامانه های تعبیه شده سنتی، تمرکز اصلی آن ها بر روی اتصال دستگاه های مختلف برای انقلاب



شکل ۱: زیرساخت‌های ارتباطی اینترنت اشیا

طول عمر باتری یک دستگاه سایبر-فیزیکی، ظرفیت شبکه و کیفیت سرویس‌دهی دارد [۴]. در این پژوهش سعی بر آن است تا با بررسی نقش فناوری ارتباطی در میزان انرژی مصرفی و کارایی دستگاه‌های متصل در کاربردهای سایبر-فیزیکی چالش‌ها و فرصت‌های موجود برای ارائه روش‌های نوین را ارزیابی نماییم. در همین راستا، در بخش دوم انواع زیرساخت‌های ارتباطی سامانه‌های سایبر-فیزیکی را معرفی و بررسی می‌کنیم. در بخش سوم به بررسی انواع پروتکل‌های ارتباطی سامانه‌های سایبر-فیزیکی می‌پردازیم. سپس، در بخش چهارم، به توضیح مختصر درباره پژوهش‌های پیشین و بررسی چالش‌های موجود در راهکارهای ارائه شده می‌پردازیم. در بخش پنجم، به بررسی انرژی مصرفی و نرخ از دست رفتن داده‌ها در زیرساخت‌های ارتباطی LoRa، WiFi، BLE و پروتکل ارتباطی MQTT به عنوان مشاهدات این پژوهش می‌پردازیم.

۲ انواع زیرساخت‌های ارتباطی سامانه‌های سایبر-فیزیکی

زیرساخت‌های ارتباطی سامانه‌های سایبر-فیزیکی، اشیاء متفاوت را برای ارائه خدمات هوشمند خاص در شبکه به یکدیگر متصل می‌کنند. این دستگاه‌های متنوع معمولاً با باتری کار می‌کنند بنابراین چالش مصرف انرژی در این دستگاه‌ها بسیار مهم است. تاکنون زیرساخت‌های ارتباطی فراوانی برای سامانه‌های سایبر-فیزیکی ارائه شده است که این زیرساخت‌ها براساس گستره پوشش مطابق شکل ۱ به دو دسته مهم زیرساخت‌های ارتباطی کوتاه‌برد و زیرساخت‌های ارتباطی دوربرد تقسیم می‌شوند که در ادامه به توضیح هر یک پرداخته خواهد شد.

استفاده کرد [۱]. در سامانه‌های سایبر-فیزیکی، دستگاه‌ها عموماً با باتری کار می‌کنند و باید مصرف توان را در این سامانه‌ها به حداقل رسانند. اما محدودکردن مصرف انرژی دستگاه‌های سایبر-فیزیکی و ارائه رویکردهای جدید برای مقابله با آن، به چالشی بسیار مهم در این حوزه تبدیل شده است [۲]. به‌علاوه، مدیریت مؤثر مصرف انرژی در طول عملکرد سامانه نیز بسیار مهم است تا بتوان مصرف کلی انرژی را کاهش داد [۳].

پیش از ظهور فناوری اینترنت اشیا^۶، از پروتکل‌های سنتی مانند SOAP^۷ برای ارتباط میان سامانه‌های سایبر-فیزیکی استفاده می‌شد. SOAP یک پروتکل پیام‌رسانی است که برای ارتباط بین برنامه‌های با زبان‌های مختلف ایجاد شده و می‌تواند از طریق پروتکل‌های استاندارد مانند HTTP^۸ منتقل شود. این پروتکل امکان ارتباط بین عناصر توزیع شده را فراهم می‌کند و برای توسعه واسط‌های برنامه‌نویسی^۹ (API) در زبان‌های مختلف با امکان افزودن ویژگی‌ها و قابلیت‌ها به آن‌ها انعطاف می‌دهد اما این پروتکل‌ها دارای نواقصی از جمله اشغال فضای زیاد، مصرف بالای واحد پردازش مرکزی، مصرف حافظه فراوان و مصرف انرژی بالا بودند. برای پاسخ به این چالش‌های موجود با توسعه فناوری اینترنت اشیا زیرساخت‌ها و پروتکل‌های ارتباطی معرفی شدند [۴].

یکی از راه‌های مقابله با این چالش‌ها، زیرساخت‌های ارتباطی سامانه‌های سایبر-فیزیکی هستند که بر اساس گستره پوشش به دو دسته کوتاه‌برد^{۱۰} و دوربرد^{۱۱} تقسیم می‌شوند. به‌صورت کلی، زیرساخت‌های ارتباطی کوتاه‌برد برای کاربردهایی با محدوده کوچک مناسب هستند، درحالی‌که زیرساخت‌های ارتباطی دوربرد معمولاً در کاربردهایی با محدوده وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرساخت‌های ارتباطی دوربرد نرخ داده کمتری دارند برای همین سطح پوشش‌دهی بالایی را شامل می‌شوند [۵]. زیرساخت‌های ارتباطی کوتاه‌برد در باند‌های فرکانسی آزاد بدون نیاز به مجوز به کار گرفته می‌شوند. همچنین نرخ داده ارسالی در این زیرساخت‌ها معمولاً بیشتر از زیرساخت‌های دوربرد است. زیرساخت‌های ارتباطی دوربرد به دو دسته درون پهنای باند مجوزدار و درون پهنای باند بدون مجوز تقسیم می‌شوند. زیرساخت‌هایی که درون پهنای باند مجوزدار هستند تداخل ندارند اما استفاده از آن‌ها تحت نظر سازمان‌های تنظیم مقررات رادیویی است. در مقابل امکان تداخل در زیرساخت‌های درون پهنای باند بدون مجوز زیاد است [۶].

چندین پروتکل لایه کاربردی مانند CoAP^{۱۲}، MQTT^{۱۳}، AMQP^{۱۴} و MQTT-SN^{۱۵} برای اتصال دستگاه‌ها و برنامه‌ها به سامانه‌های سایبر-فیزیکی استفاده می‌شوند. ویژگی مشترک این پروتکل‌ها مصرف حافظه کم، مصرف انرژی کم، توزیع مناسب اطلاعات به گیرندگان و سرویس خدمات^{۱۶} اختصاصی است و معماری آن‌ها بر مبنای انتشار/اشتراک^{۱۷} طراحی شده که مانند زیرساخت‌های ارتباطی باعث کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های سایبر-فیزیکی می‌شوند.

به‌صورت کلی فناوری و معماری شبکه بیشترین تأثیر را در تعیین

۱-۲ زیرساخت‌های ارتباطی کوتاه‌برد

مهم‌ترین و پرکاربردترین زیرساخت‌های ارتباطی کوتاه‌برد عبارت‌اند از:

- Bluetooth •
- RFID^{۱۸} •
- ZigBee •
- NFC^{۱۹} •
- WiFi •

این زیرساخت‌ها معمولاً محدوده‌های کوچکی در حدود چند سانتی‌متر تا چند متر را تحت پوشش خود قرار می‌دهند و در فضاهایی مانند خودروها، خانه‌ها، اداره‌ها برای ارتباط بین تلفن‌های همراه، تلویزیون‌های هوشمند و مواردی از این قبیل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷][۸][۹]. برای مثال NFC در باند فرکانس بالا کار می‌کند و از سرعت داده تا ۴۲۴ کیلوبیت بر ثانیه پشتیبانی می‌کند و محدوده قابل اجرا آن تا ۱۰ سانتی‌متر است. WiFi که یکی دیگر از زیرساخت‌های ارتباطی است از امواج رادیویی برای تبادل داده بین اشیاء در محدوده ۱۰۰ متری استفاده می‌کند. هر یک از این زیرساخت‌ها معمولاً از روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی شبکه استفاده می‌کنند. به عنوان مثال Bluetooth و WiFi از همبندی^{۲۰} ستاره‌ای برای شبکه‌سازی استفاده می‌کنند [۱۰]. در همبندی ستاره‌ای، یک دستگاه مرکزی (همانند رایانه یا مودم) به عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود و دستگاه‌های دیگر مانند تلفن‌های همراه به عنوان دستگاه‌های انتهایی^{۲۱} به آن وصل می‌شوند. در این حالت، تمام ارتباطات از طریق نقطه مرکزی صورت می‌گیرد و دستگاه‌های انتهایی مستقیماً با یکدیگر ارتباط برقرار نمی‌کنند. این نوع همبندی برای مواقعی مناسب است که یک دستگاه مرکزی می‌تواند اطلاعات را جمع‌آوری و مدیریت کند و دستگاه‌های انتهایی نیاز به ارتباط مستقیم با یکدیگر ندارند. این نوع همبندی به ویژه در محیط‌های خانگی و محیط‌های کاری کوچک کاربرد دارد. زیرساخت‌های ارتباطی کوتاه‌برد عمده‌تر در باندهای فرکانسی آزاد عمل می‌کنند و به دستگاه‌ها اجازه می‌دهند که بدون نیاز به مجوز خاصی از سازمان‌ها یا مراجع مخصوص، از این باندهای فرکانسی برای ارتباطات خود استفاده کنند. یکی از ویژگی‌های مهم زیرساخت‌های ارتباطی کوتاه‌برد، نرخ داده ارسالی بالا است که این زیرساخت‌ها معمولاً دارای نرخ انتقال داده بیشتری نسبت به فناوری‌های دوربرد هستند. این نرخ انتقال داده بالا برای دستگاه‌ها امکان انتقال سریع و بزرگ حجمی از اطلاعات را فراهم می‌کند [۷][۸][۹].

۲-۲ زیرساخت‌های ارتباطی دوربرد

این زیرساخت‌های ارتباطی برای محدوده‌های وسیعی مانند شهر و کشور مناسب هستند و از مزایای مصرف توان پایین، پوشش بالا و نرخ داده ارسالی کم برخوردارند. زیرساخت‌های ارتباطی دوربرد می‌توانند به دو دسته تقسیم شوند:

۱) زیرساخت‌های ارتباطی درون پهنای باند مجوزدار

۲) زیرساخت‌های ارتباطی درون پهنای باند بدون مجوز

زیرساخت‌های ارتباطی که درون پهنای باند مجوزدار هستند، اغلب تداخل ندارند و تحت نظر اپراتورهای تلفن همراه دولتی یا مراجع مربوطه فعالیت می‌کنند. در مقابل، زیرساخت‌های ارتباطی درون پهنای باند بدون مجوز معمولاً به افراد و شرکت‌ها اجازه می‌دهند که بدون نیاز به مجوزهای دولتی یا مراجع مربوطه، تجهیزات خود را نصب کرده و استفاده کنند. این فناوری‌ها ممکن است در مقابل تداخل‌های بیشتری قرار داشته باشند، زیرا کنترل و مدیریت کمتری از طرف مراجع نظارتی وجود دارد [۷][۸][۹].

۱-۲-۲ زیرساخت‌های ارتباطی درون پهنای باند مجوزدار

3GPP^{۲۲} یک انجمن است که استانداردهای مرتبط با ارتباطات تلفن همراه بین‌المللی را تعیین می‌کند. زیرساخت‌های ارتباطی درون پهنای باند مجوزدار توسط 3GPP استانداردسازی می‌شوند. این استانداردها برای توسعه و استفاده از فناوری‌های مختلف مرتبط با تلفن همراه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱]. نمونه‌های مهم استفاده از استانداردهای 3GPP عبارت‌اند از [۶]:

- NB-IoT^{۲۳} •
- LTE-M^{۲۴} •
- EC-GSM^{۲۵} •

NB-IoT که به آن اینترنت اشیاء باندباریک گفته می‌شود یک پروتکل اینترنت بی‌سیم برای اشیاء هوشمند است که از فناوری شبکه گسترده کم‌توان^{۲۶} بهره می‌برد. این پروتکل توسط پروژه مشارکت نسل سوم 3GPP برای ارتباطات بی‌سیم سلولی توسعه یافته است تا بتواند یک طیف گسترده از دستگاه‌ها و خدمات جدید اینترنت اشیاء را پشتیبانی کند. اینترنت اشیاء باندباریک یکی از سه استاندارد اصلی شبکه گسترده کم‌توان معرفی شده توسط 3GPP است که برای ارتباطات با مصرف انرژی پایین، عمر بالای باتری، پوشش گسترده، پیچیدگی سخت‌افزاری کم و تعداد بالای اتصالات مورد استفاده قرار می‌گیرد اما نرخ داده این شبکه نسبت به سایر فناوری‌های 3GPP بسیار پایین‌تر است [۱۲][۱۳]. LTE-M نیز یک زیرساخت ارتباطی با مصرف انرژی کم و پوشش گسترده است که برای کاربردهای ماشین به ماشین^{۲۷} و اینترنت اشیاء توسعه یافته است. این زیرساخت شامل eMTC^{۲۸} یا LTE Cat-M1 نیز است. مزیت LTE-M نسبت به فناوری رقیب اینترنت اشیاء باندباریک شامل نرخ داده بالاتر، تحرک^{۲۹} در شبکه و پشتیبانی از مکالمه صوتی است، اما نیاز به پهنای باند و هزینه بیشتری دارد. تاکنون بیش از ۱۰۰ اپراتور، شبکه‌های اینترنت اشیاء باندباریک یا LTE-M را پیاده‌سازی کرده‌اند. EC-GSM یک زیرساخت ارتباطی با مصرف انرژی کم برای اینترنت اشیاء است که بر اساس استاندارد GSM گسترده‌تر شده است. این زیرساخت بر اساس eGPRS^{۳۰} ساخته شده است. EC-GSM مزایایی مانند برد بلند، مصرف انرژی پایین و پشتیبانی از عمر باتری تا ۱۰ سال را ارائه می‌دهد. این زیرساخت در سال ۲۰۱۷ با همکاری تولیدکنندگان تجهیزات موبایل و شبکه‌های GSM موجود به بازار عرضه شده و از ویژگی‌های امنیتی شبکه‌های

موبایل نیز بهره‌مند می‌شود. این شبکه‌ها در باندهای فرکانسی دارای مجوز مورد استفاده قرار می‌گیرند به همین دلیل با تداخل مواجه نخواهند شد [۱۴][۱۵].

۲-۲-۲ زیرساخت‌های ارتباطی درون پهنای باند بدون مجوز

Sigfox و LoRa دو نمونه از زیرساخت‌های ارتباطی دوربرد هستند که از پهنای باند بدون نیاز به مجوز استفاده می‌کنند. این نوع زیرساخت‌ها از ویژگی‌هایی از قبیل پوشش گسترده، مصرف انرژی پایین و هزینه کم برخوردارند [۱۶][۹][۱۷]. این ویژگی‌ها باعث شده تا این زیرساخت‌ها بتوانند به بازار وارد شوند. Sigfox از طریق مدولاسیون BPSK^{۳۱} داده‌ها را انتقال می‌دهد. از مزایای این زیرساخت انتقال داده در پهنای وسیع با مقاومت بالا در برابر تداخل است. زیرساخت LoRa از مدولاسیون CSS^{۳۲} استفاده می‌کند تا بتواند محدوده پوشش گسترده‌تری را فراهم کند. در این زیرساخت، اطلاعات بر روی کانال‌های فرکانسی متنوعی منتقل می‌شوند. زیرساخت LoRa در پهنای باند کمتر از یک گیگاهرتز عمل می‌کند و به سیگنال‌ها اجازه می‌دهد تا حتی در حضور تداخل‌های پایین‌تر نیز انتقال یابند و قابل بازیابی باشند. این به این معناست که اطلاعات با کیفیت بالا، در مسافت‌ها و مناطق گسترده حتی در محیط‌های با تداخل فراوان انتقال می‌یابند. شبکه LoRa به صورت همبندی ستاره‌ای است، به این معنا که در این شبکه یک سرور مرکزی یا سرور شبکه وجود دارد و دستگاه‌های انتهایی اطلاعات خود را به این سرور ارسال می‌کنند. این ارتباط از طریق شبکه‌ای به نام LoRaWAN انجام می‌شود. دستگاه‌های انتهایی که معمولاً حسگرها یا دستگاه‌های اینترنت اشیا هستند، اطلاعات خود را به دروازه^{۳۳}‌ها ارسال می‌کنند. دروازه‌ها، اطلاعات را دریافت و به سرور شبکه ارسال می‌کنند. سپس سرور شبکه اطلاعات را دریافت و پردازش می‌کند. سرور شبکه مسئول مدیریت و توزیع اطلاعات به نرم‌افزارهای کاربردی مختلف است [۱۶][۹][۱۷][۱۸].

۳ انواع پروتکل‌های ارتباطی سامانه‌های سایر-فیزیکی

استفاده از فناوری ارتباطی استاندارد و بی‌درنگ^{۳۴} برای توسعه سامانه‌های سایر-فیزیکی بسیار ضروری است اما انتخاب پروتکل مناسب برای ارتباط در این حوزه به دلیل تنوع نیازها و سامانه‌ها چالش‌برانگیز است. در گذشته پروتکل‌های مختلفی توسط سازمان‌ها توسعه و استفاده شده‌اند، اما هیچ کدام از آن‌ها نمی‌توانند تمام نیازهای انواع مختلفی از سامانه‌های اینترنت اشیا را پشتیبانی کنند. بنابراین انتخاب پروتکل مناسب برای هر سناریو مهم است [۱۹].

برخی از پروتکل‌های لایه کاربردی در دستگاه‌های اینترنت اشیا HTTP2، HTTP، AMQP، MQTT-SN، MQTT، CoAP است که پروتکل‌های AMQP، MQTT-SN، CoAP و MQTT در این لایه مبتنی بر ساختار انتشار/اشتراک است. معماری انتشار/اشتراک یک الگوی معماری نرم‌افزاری است که در اینترنت اشیا و سامانه‌های

توزیع شده به کار می‌رود. این معماری به سادگی، مدلی برای ارتباط بین اشیاء مختلف فراهم می‌کند و به طور خاص برای اتصال و مدیریت دستگاه‌های اینترنت اشیا مناسب است. در این معماری، دستگاه‌ها به عنوان اشتراک گیرنده‌ها^{۳۵} و مواردی که اطلاعات را منتشر می‌کنند به عنوان منتشرکنندگان^{۳۶} شناخته می‌شوند [۱۹].

منتشرکننده‌ها دستگاه‌ها یا سامانه‌هایی هستند که اطلاعات یا رویدادهای مرتبط با داده‌هایی که می‌خواهند به اشتراک بگذارند را منتشر می‌کنند. این اطلاعات معمولاً به عنوان موضوع^{۳۷} شناخته می‌شوند. برای مثال، یک حسگر دما می‌تواند داده‌های دمایی فعلی اتاق را به عنوان یک موضوع منتشر کند [۲۰].

موضوع‌ها مشخصه‌هایی هستند که توسط منتشرکننده‌ها برای تعیین نوع اطلاعاتی که منتشر می‌شود، استفاده می‌شوند [۲۰]. اشتراک گیرنده‌ها نیز می‌توانند با موضوع‌های خاصی اشتراک بگیرند تا اطلاعات مرتبط با آن موضوع را دریافت کنند [۲۰].

اشتراک گیرنده‌ها دستگاه‌ها یا سامانه‌هایی هستند که به منتشرکننده‌ها متصل می‌شوند و از آن‌ها اطلاعات می‌گیرند. در نهایت واسط پیام^{۳۸} وظیفه مدیریت انتقال پیام‌ها بین منتشرکننده‌ها و اشتراک گیرنده‌ها را دارد. واسط پیام برای مسیریابی و توزیع پیام‌ها به اشتراک گیرنده‌ها بر اساس موضوع‌ها استفاده می‌شود [۲۰].

مزایای اصلی معماری انتشار/اشتراک در اینترنت اشیا شامل موارد زیر است:

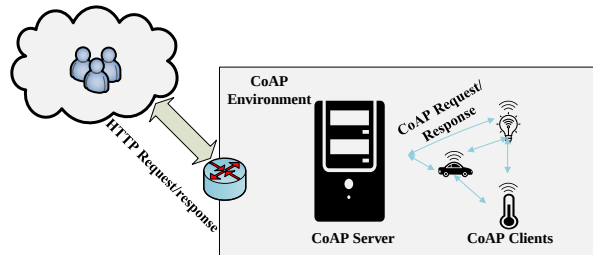
- مقیاس‌پذیری^{۳۹}: این معماری به راحتی قابل توسعه است و می‌تواند با افزایش تعداد دستگاه‌ها و اشتراک گیرنده‌ها به آسانی به کار خود ادامه دهد و هر تعداد منتشرکننده می‌تواند با هر تعداد اشتراک گیرنده ارتباط برقرار کند یا به عبارتی این معماری می‌تواند به تغییرات در نیازهای شبکه اینترنت اشیا پاسخ دهد [۲۰].
- انعطاف‌پذیری: اتصال ضعیف بین مؤلفه^{۴۰}‌ها، سامانه ما را مستقل و انعطاف‌پذیر می‌کند. اتصال ضعیف به این معنی است که مؤلفه‌های سامانه ما تا حد زیادی به یکدیگر وابسته نیستند. هر مؤلفه می‌تواند به طور مستقل توسعه داده شود، این امر باعث می‌شود که سامانه ما منعطف‌تر باشد، به راحتی مؤلفه‌های جدید را اضافه یا حذف کنیم، بدون اینکه بر سایر بخش‌های سامانه تأثیر بگذارد [۲۰].
- عدم وابستگی به زبان و پروتکل: این ویژگی این امکان را فراهم می‌کند که ادغام سامانه انتشار/اشتراک را به سرعت و به سادگی در فناوری‌های خود انجام دهیم [۲۰].

پروتکل‌های مختلف لایه کاربردی اینترنت اشیا مزایای متفاوتی دارند اما دارای معایبی نیز هستند. روز به روز دستگاه‌های اینترنت اشیا با باتری و منابع محدود بیشتری در سراسر جهان به کار گرفته می‌شوند بنابراین مصرف انرژی به یک عامل بسیار مهم تبدیل شده است [۲۱].

۳-۱ CoAP

CoAP یک پروتکل تخصصی انتقال وب برای استفاده با گره‌ها و شبکه‌های محدود (به عنوان مثال، کم مصرف، با تلفات^{۴۱}) است که

اشتراک گیرنده و واسط پیام تشکیل شده است. اگر منتظرکننده پیام هایی را در مورد یک موضوع منتشر کند اشتراک گیرنده باید برای مشاهده پیام در آن موضوع مشترک شود. MQTT یک پروتکل دودویی است که عمدتاً از سرآیند ثابت ۲ بیتی استفاده می کند و اجازه ارسال متن های پیام با اندازه های کوچک تا حداکثر ۲۵۶ مگابایت را می دهد. این پروتکل از TCP به عنوان پروتکل انتقال و از TLS/SSL^{۵۸} به عنوان مکانیزم امنیتی برای ارتباط های خود استفاده می کند. این پروتکل برای تضمین تحویل یک پیام واحد، سه سطح از کیفیت خدمات را تعریف می کند که به ترتیب شامل موارد زیر است:



شکل ۲: معماری پروتکل ارتباطی CoAP

کیفیت خدمات "۵۹" (حداکثر یک بار): در این سطح، یک پیام حداکثر یک بار ارسال می شود و هیچ تضمینی برای تحویل پیام وجود ندارد. پیام از سوی فرستنده ارسال می شود، اما دریافت کردن پیام توسط گیرنده تأیید نمی شود. اگر پیام در حین انتقال گم شود، مجدداً ارسال نخواهد شد. این سطح کیفیت خدمات کمترین قابلیت اطمینان^{۶۰} را دارد اما کمترین سربار را نیز دارد. کیفیت خدمات "۵" ساده ترین سطح کیفیت خدمات است همچنین به عنوان "آتش و فراموش کردن"^{۶۱} شناخته می شود.

کیفیت خدمات "۶۲" (حداقل یک بار): این سطح این اطمینان را ایجاد می کند که پیام حداقل یک بار تحویل داده شود. فرستنده پیام را ارسال کرده و منتظر تأیید (PUBACK) از سوی گیرنده می ماند. اگر گیرنده تأیید را ارسال نکند، فرستنده مجدداً پیام را ارسال می کند. به این ترتیب، پیام ممکن است چندین بار تحویل داده شود، اما تضمین می شود که پیام در حین انتقال از دست نمی رود.

کیفیت خدمات "۶۳" (حداقل یک بار): این سطح اطمینان حاصل می کند که پیام دقیقاً یک بار تحویل داده می شود. این مرحله شامل یک روند چهار مرحله ای بین فرستنده و گیرنده است. فرستنده پیام را ارسال می کند و منتظر تأیید (PUBREC) از سوی گیرنده می ماند. گیرنده با ارسال یک پیام PUBREL تأیید دریافت پیام را نشان می دهد و فرستنده در نهایت با ارسال پیام PUBCOMP تحویل را تأیید می کند. این سطح کیفیت خدمات تضمین می کند که پیام گم نمی شود و همچنین هیچ تکراری ندارد. این سطح ممکن است به عنوان مثال در سامانه های مالی مورد استفاده قرار گیرد که نمی توان اشتباه یا از دست رفتن پیام ها را تحمل کرد. کیفیت خدماتی که MQTT به طور پیش فرض از آن استفاده می کند کیفیت خدمات "۵" است [۱۹][۲۳][۲۴][۲۵].

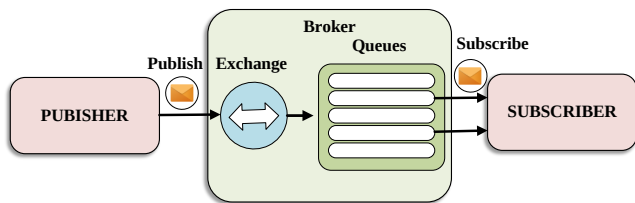
۳-۳ AMQP

پروتکل صف پیام پیشرفته (AMQP) یک پروتکل اینترنتی برای پیام رسانی تجاری است که توسط John O'Hara در سال ۲۰۰۳ توسعه یافته است. AMQP یک پروتکل دودویی است که معمولاً نیاز به سرآیند ثابت به اندازه ۸ بایت دارد. AMQP مطابق شکل ۴ از معماری درخواست/پاسخ و انتشار/اشتراک پشتیبانی می کند. مشهورترین واسط پیام AMQP، RabbitMQ است و سرور RabbitMQ در آزمایش برای پروتکل AMQP استفاده می شود. AMQP دارای صف است و

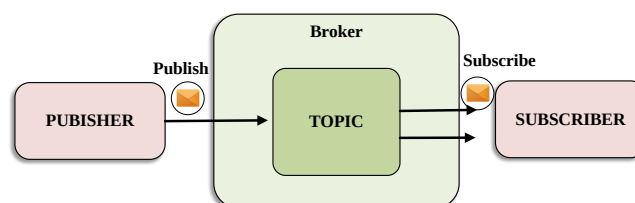
توسط IETF^{۴۲} معرفی شده است. گره ها اغلب دارای میکروکنترلرهای ۸ بیتی با مقدار کمی ROM و RAM هستند [۲۲]. CoAP برای ارتباطات ماشین به ماشین طراحی شده است و مطابق شکل ۲ از مدل تعامل درخواست/پاسخ^{۴۳} و منبع/مشاهده^{۴۴} (نوعی از انتشار/اشتراک) پشتیبانی می کند و برخلاف MQTT، از URI^{۴۵} به جای موضوع ها استفاده می کند. این پروتکل به آسانی با HTTP ادغام می شود و در عین حال نیازهای ویژه ای مانند پشتیبانی از چندبخشی^{۴۶}، هزینه پایین و سادگی برای محیط های محدود را برآورده می کند. CoAP از UDP^{۴۷} برای انتقال داده ها استفاده می کند تا تمام سربار TCP^{۴۹} را حذف کند، پهنای باند مورد نیاز را کاهش دهد، سادگی بیشتری را فراهم کند و آن را برای برنامه های اینترنت اشیا مناسب تر کند و از DTLS^{۵۰} برای امنیت استفاده می کند تا محرمانگی، یکپارچگی و تأیید هویت ایجاد کند با این حال، استفاده از DTLS سربار، پهنای باند و مصرف انرژی بیشتری را در ارتباطات فراهم آورد. در CoAP، منتشرکننده داده، اطلاعات را به یک URI منتشر می کند، و اشتراک گیرنده ها می توانند از طریق URI مشخص شده به این اطلاعات دسترسی پیدا کنند و زمانی که منتشرکننده داده، اطلاعات را به یک URI منتشر می کند، همه اشتراک گیرنده ها در مورد مقدار جدید همانطور که توسط URI نشان داده شده است مطلع می شوند. CoAP پروتکل دودویی است و معمولاً نیاز به سرآیند^{۵۱} ثابت به اندازه ۴ بایت دارد و از پیام های "قابل تأیید"^{۵۲} و "غیرقابل تأیید"^{۵۳} شبیه به "حداکثر یک بار"^{۵۴} و "حداقل یک بار"^{۵۵} در MQTT استفاده می کند. پیام های قابل تأیید باید توسط گیرنده با یک بسته ACK^{۵۶} تأیید شوند، در حالی که پیام های غیرقابل تأیید اینگونه نیستند. این ویژگی به این پروتکل امکان ارائه دو سطح مختلف از کیفیت خدمات را می دهد [۱۹].

۲-۳ MQTT

یکی از قدیمی ترین پروتکل های ماشین به ماشین که در سال ۱۹۹۹ توسط Andy Stanford-Clark از شرکت IBM و Arlen Nipper از Arcom Control Systems Ltd معرفی شد MQTT است [۱۹]. این پروتکل علاوه بر ارتباطات ماشین به ماشین برای شبکه های حسگر بی سیم^{۵۷} هم مناسب است. MQTT یک پروتکل پیام رسانی مبتنی بر انتشار/اشتراک است که مطابق شکل ۳ از یک منتشرکننده،



شکل ۴: معماری پروتکل ارتباطی AMQP [۲۴]



شکل ۳: معماری پروتکل ارتباطی MQTT [۲۴]

می‌تواند با زیرساخت مشابه MQTT کار کند. تنها تفاوت در معماری این است که MQTT-SN به یک موجودیت^{۶۵} جدید در سامانه به نام دروازه نیاز دارد که باید تمام پیام‌های MQTT-SN را از طریق UDP به پیام‌های MQTT از طریق TCP ترجمه کند. همچنین MQTT-SN برای دستگاه‌های با منابع پردازشی و ذخیره‌سازی محدود، قیمت مناسب و قابل اجرا با باتری بهینه‌سازی شده است. می‌توان MQTT-SN را یک نسخه از MQTT در نظر گرفت. در این رابطه MQTT-SN معمولاً قبل از ارسال و دریافت پیام، نیاز به اتصال به واسط پیام دارد. این ارتباط در واقع یک اتصال مجازی است. تفاوت‌های اصلی میان MQTT-SN و MQTT شامل موارد زیر هستند:

۱- کاهش حجم اطلاعات پیام

۲- عدم نیاز به اتصال دائمی به دلیل استفاده از پروتکل UDP

۳- در مقایسه با MQTT، MQTT-SN دارای مزیتی است که از روش جدیدی برای تضمین اتصال در حالت برون خط^{۶۶} استفاده می‌کند که برای پشتیبانی از "کاربران خوابیده" (sleeping clients) تعریف شده است. با استفاده از این روش، دستگاه‌هایی که با باتری کار می‌کنند می‌توانند به حالت خواب بروند در همین حین، تمام پیام‌های مخصوص به آن‌ها در سرور/دروازه ذخیره می‌شوند و در زمان بیدار شدن دستگاه‌ها به آن‌ها تحویل داده می‌شوند.

۴- MQTT-SN از DTLS به دلیل این که حجم اطلاعات پیام ها محدود است برای امنیت استفاده نمی‌کند با این حال، از "کاربران خوابیده" برای بهره‌وری انرژی پشتیبانی می‌کند.

۳-۴-۱ معماری MQTT-SN

MQTT-SN مطابق شکل ۵ شامل سه مؤلفه کاربر MQTT-SN، دروازه MQTT-SN و فرستنده MQTT-SN است:

کاربران MQTT-SN خود را، از طریق یک دروازه MQTT-SN با استفاده از پروتکل MQTT-SN به یک سرور MQTT متصل می‌کنند. پروتکل MQTT بین سرور MQTT و دروازه MQTT-SN استفاده می‌شود. عملکرد اصلی آن ترجمه بین MQTT و MQTT-SN است. کاربران MQTT-SN همچنین می‌توانند در صورتی که دروازه مستقیماً به شبکه آن‌ها متصل نباشد، از طریق یک فرستنده به دروازه دسترسی داشته باشند. فرستنده MQTT-SN به سادگی بسته‌های MQTT-SN را که در سمت بی سیم دریافت می‌کند کپسوله می‌کند و آن‌ها را بدون

هر صف برای یک اشتراک‌گیرنده استفاده می‌شود. تفاوت اصلی بین MQTT و AMQP زمانی است که منتشرکننده پیام‌هایی را برای واسط پیام منتشر می‌کند، پیام‌ها مانند واسط پیام MQTT مستقیماً به سمت اشتراک‌گیرنده منتقل نمی‌شوند. در عوض، آن‌ها به یک Exchange منتقل خواهند شد. که وظیفه Exchange، مسیریابی پیام‌ها به صف‌ها است. AMQP پیام‌ها را به صورت مستقیم، به صورت fanout، بر اساس موضوع یا بر اساس سرآیند انتقال می‌دهد. پیام‌ها تا زمانی که توسط اشتراک‌گیرنده برداشته نشوند در صف خواهند ماند. یکی از ویژگی‌های اصلی AMQP، قابلیت اطمینان در تحویل پیام‌ها است. این به معنای این است که AMQP تلاش می‌کند تا از دست رفتن پیام‌ها در مسیر تبادل بین اجزای سامانه جلوگیری کند و از تحویل آن‌ها به مقصد اطمینان حاصل کند. در AMQP، دو سطح اصلی از کیفیت خدمات برای تحویل پیام‌ها وجود دارد:

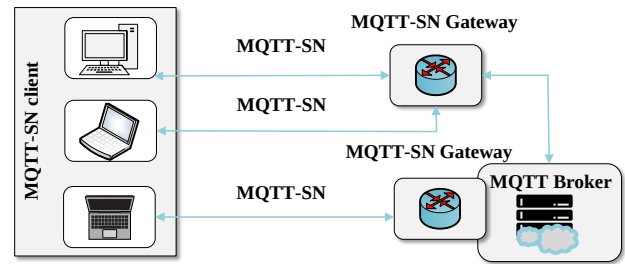
Unsettle Format (غیر قابل اعتماد): شبیه به "حداکثر یک‌بار" در MQTT است در این حالت، پیام‌ها بدون تضمین تحویل به مقصد ارسال می‌شوند. این بدان معناست که اگر پیامی در مسیر از بین برود یا به مقصد نرسد، هیچ اطمینانی از اینکه اتفاقی افتاده است، وجود ندارد. settle Format (قابل اعتماد): در این حالت، AMQP تلاش می‌کند تا از تحویل پیام‌ها به مقصد اطمینان حاصل کند. این به معنای این است که سامانه AMQP از مکانیزم‌هایی مانند تأیید (acknowledgment) و رد (nack) برای اطمینان از تحویل یا عدم تحویل پیام‌ها به مقصد استفاده می‌کند. همچنین، AMQP از TCP به عنوان پروتکل انتقال پیش‌فرض برای برقراری ارتباط استفاده می‌کند. برای افزایش امنیت ارتباطات، AMQP می‌تواند از TLS/SSL و SASL^{۶۴} استفاده کند. این پروتکل‌ها برای رمزنگاری ارتباطات بین مخاطبان AMQP و جلوگیری از نفوذ افراد ناخواسته به پیام‌ها استفاده می‌شوند [۱۹][۲۴].

۳-۴ MQTT-SN

MQTT-SN برای شبکه‌های حسگر به طور ویژه برای شبکه‌های بی سیم طراحی شده است و همانند MQTT از مدل انتشار/اشتراک استفاده می‌کند و اگرچه MQTT-SN از UDP به جای TCP به عنوان پروتکل لایه انتقال استفاده می‌کند، اما تا آنجا که ممکن است به گونه‌ای طراحی شده است تا به همان روش MQTT کار کند به این معنی که

مقایسه با پژوهش موجود با عنوان "بهینه‌سازی با محدودیت انرژی برای تخصیص عامل انتشار در شبکه گسترده کم‌توان" انجام شده توسط [۲۹]، کاهش مصرف انرژی شبکه LoRa به میزان ۶۰٪ محاسبه شد. در آزمایش سوم وقتی چندین پارامتر LoRa مورد آزمایش قرار گرفتند به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی از نظر بازده توان بهتر از سایر مدل‌ها عمل می‌کند. نتایج کار پیشنهادی نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تخصیص مناسب عامل انتشار در شبکه اینترنت اشیاء منجر به مصرف انرژی کمتر می‌شود. این نشان می‌دهد که این الگوریتم برای به دست آوردن تنظیم مناسب عامل انتشاری که مصرف انرژی را کمینه می‌کند، کارایی دارد و کارایی انرژی نقش مهمی در افزایش عمر باتری دستگاه‌های تغذیه کننده از باتری و کاهش هزینه‌های عملیاتی ایفا می‌کند.

اینترنت اشیاء قابلیت ارتباط بین اشیاء را به وجود آورده و برنامه‌های گسترده‌ای را از جمله عملیات جستجو و نجات^{۶۹} (SAR) فراهم می‌کند. برنامه‌های جستجو و نجات نیازمند برقراری ارتباط در فواصل دور هستند و از شبکه‌های گسترده کم‌توان بهره می‌برند. همان‌طور که قبلاً گفته شد یکی از فناوری‌های شبکه‌های گسترده کم‌توان LoRa است. در پژوهش [۳۰] پروژه WeSAR سامانه‌ای برای یافتن و نجات افراد، به ویژه افرادی که احتمال زیادی برای گم شدن آن‌ها وجود دارد ایجاد شده است. مصرف انرژی دستگاه‌های پوشیدنی عامل مهمی در عملیات جستجو و نجات است زیرا باتری آن‌ها باید بیش از ۵۰ ساعت دوام آورد. به همین دلیل، سامانه پیشنهادی بر پایه فناوری LoRa است و مکان‌یابی کاربر بر اساس LoRa با استفاده از تفاوت زمان ورود^{۷۰} (TDoA) به جای سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) که مصرف انرژی را افزایش می‌دهد انجام می‌شود. یک مکانیزم کارآمد انرژی برای شبکه‌های LoRa ارائه شده است که بر اساس وضعیت کاربر و سطح باتری دستگاه پوشیدنی است. شبیه‌سازی‌های واقع‌گرایانه برای ارزیابی عملکرد سامانه با یک دستگاه پوشیدنی و چند دستگاه پوشیدنی تحت مدل‌های مختلف حرکت انجام شده است. چهار وضعیت متمایز برای دستگاه‌های پوشیدنی در نظر گرفته شده است: خاموش، هایلرنت، نرمال و اضطراری. هر کدام دارای تنظیمات خاصی برای حسگرها و رفتارهای انتقال داده هستند. سرور برنامه با توجه به عواملی چون وضعیت کاربر و سخت‌افزار دستگاه به ترتیب وضعیت‌ها را اجرا و فعال‌سازی حسگرها را انجام می‌دهد. علاوه بر این، پژوهش [۳۰] به بررسی اهمیت نرخ جمع‌آوری داده‌های حسگر و تنظیم آن‌ها بر اساس وضعیت کاربر و وضعیت دستگاه پوشیدنی می‌پردازد. تأثیر سطح باتری بر روی فرکانس انتقال داده نیز قابل توجه است و نیاز به توازن بین جمع‌آوری داده و صرفه‌جویی در انرژی را بیان می‌کند. نتایج نشان می‌دهد کاهش مصرف انرژی در مدل‌های متنوعی از حرکت گره‌ها بهبود ایجاد کرده است، بدون اینکه نسبت تحویل بسته در شبکه را به خطر بیاندازد به این دلیل که بسته‌های ارسالی با فناوری LoRa جستجو و نجات افراد گمشده استفاده می‌شود و این موضوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



شکل ۵: معماری پروتکل ارتباطی MQTT-SN [۲۷]

تغییر به دروازه ارسال می‌کند. در جهت مخالف، بسته‌هایی را که از دروازه دریافت می‌کند، کپسوله می‌کند و آن‌ها را بدون تغییر برای کاربران ارسال می‌کند [۲۶][۲۷].

۴ پژوهش‌های پیشین

در این بخش قصد داریم تا به بررسی پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در حوزه خاصی از سامانه‌های سایبر-فیزیکی بپردازیم. ما در این بخش ابتدا پژوهش‌هایی که به مصرف انرژی و کارایی زیرساخت‌های ارتباطی پرداخته‌اند را بررسی می‌کنیم سپس پژوهش‌هایی که به مصرف انرژی و کارایی پروتکل‌های ارتباطی پرداخته‌اند را بیان می‌کنیم.

در مناطقی که تراکم کمی وجود دارد و برای دستگاه‌هایی که مقدار کمی انرژی مصرف می‌کنند شبکه‌های گسترده کم‌توان می‌توانند اتصال قابل اطمینانی را ارائه دهند. با افزایش ترافیک در شبکه اینترنت اشیاء، مصرف باتری دستگاه‌ها نیز افزایش می‌یابد. دستگاه‌های انتهایی اینترنت اشیاء در آینده، نزدیک به میلیارد‌ها واحد خواهند بود بنابراین نیاز به شبکه‌های گسترده کم‌توان با مصرف انرژی بهینه و قابل اعتماد دارند.

در پژوهش [۲۸] آزمایش مصرف انرژی باتری در سه مرحله مختلف انجام شده است. در مرحله اول، یک شبکه حسگر بی‌سیم به صورت تصادفی در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است سپس در مرحله دوم از تکنیک بهینه‌سازی به نام الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۶۷} (PSO) برای تخصیص عامل انتشار^{۶۸} به دستگاه‌های انتهایی در دروازه LoRa استفاده شده است. در مرحله آخر چندین پارامتر LoRa مانند گذردهی، چگالی شبکه، نرخ از دست رفتن بسته، تأخیر، نرخ انتقال داده و اندازه بافر در شبکه برای ارزیابی مدل و کارایی مصرف انرژی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش به شرح زیر است:

در سناریو آزمایش ۱، مصرف انرژی شبکه بدون بهینه‌سازی با حفظ مقادیر ثابت برای تأخیر، نرخ از دست رفتن بسته و نرخ انتقال داده در طول آزمایش^{۱۷} 6.3999×10^{-1} به دست آمد.

در آزمایش ۲، کاهش مصرف انرژی شبکه با بهینه‌سازی به وسیله اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تخصیص عامل انتشار در سراسر شبکه حسگر بی‌سیم به میزان^{۱۷} 2.523×10^{-1} ژول بود. در

انتظار می‌رود با اتصال مردم به صورت گسترده به دستگاه‌های دیجیتال، شبکه 5G فرآیند دیجیتالی‌سازی صنعت و جامعه را تسریع دهد. یکی از ویژگی‌های مهم در مسیر توسعه 5G ارائه خدمات گسترده اینترنت اشیاء با استفاده از فناوری اینترنت اشیاء باندباریک است. پژوهش [۱۲] به معرفی این فناوری اصلی اینترنت اشیاء تلفن همراه می‌پردازد و عملکرد آن را در یک محیط آزمایشی عملی ارزیابی می‌کند. در پژوهش [۱۲]، نصب ماژول‌های اینترنت اشیاء باندباریک به صورت تجربی انجام گرفته است تا مصرف واقعی انرژی ماژول اینترنت اشیاء باندباریک و پوشش آن در فضای باز بررسی شود. این تحقیق نشان می‌دهد که اینترنت اشیاء باندباریک پوشش قوی‌تری در فاصله تقریباً ۹۰ متری از ایستگاه پایه اینترنت اشیاء باندباریک دارد و با افزایش فاصله از ایستگاه پایه، قدرت سیگنال اینترنت اشیاء باندباریک کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که تا فاصله ۷۵۰ متری بین ایستگاه پایه و مکان نصب، دستگاه‌های انتهایی می‌توانند از یک سیگنال قابل قبول برای ارسال پیام استفاده کنند. در طول مراحل مختلف عملکرد اینترنت اشیاء باندباریک، مصرف انرژی مورد آزمایش قرار گرفته است سپس از طریق محاسبات ریاضی، اهمیت حالت عمیق خواب اینترنت اشیاء باندباریک بیان شده است و به این نتیجه رسیده‌اند که عملکرد پوششی اینترنت اشیاء باندباریک برای هر نوع برنامه اینترنت اشیاء باندباریک در محیط بیرونی مناسب است. با این حال، برای آزمایش عملکرد کامل اینترنت اشیاء باندباریک، تحلیل تجربی اضافی مرتبط با امنیت، ظرفیت سلول، مصرف انرژی در حالت eDRX^۱ و مقایسه با سایر فناوری‌های شبکه‌های گسترده کم‌توان پیشنهاد می‌شود که انجام شود که در پژوهش [۱۲] صورت نگرفته است.

در بحث بررسی کارایی زیرساخت‌های ارتباطی، پژوهشگران در پژوهش [۳۱] با اپراتور ارتباطات Vodafone جمهوری چک با هدف طراحی نمونه اولیه‌ای از فناوری اینترنت اشیاء باندباریک برای خدماتی در جمهوری چک که تأخیر در انتقال داده‌ها را تحمل می‌کنند همکاری کرده‌اند. در ابتدا، طراحی ماژول اینترنت اشیاء برای اندازه‌گیری‌های دقیق انجام شده است سپس انتقال داده با توجه به مجموعه گسترده‌ای از پارامترها به صورت دقیق ارزیابی شده است. در ادامه عملکرد اینترنت اشیاء باندباریک برای خدماتی که قادر به تحمل تأخیر در صنعت اینترنت اشیاء هستند مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که زمان ثبت دستگاه در شبکه با سطح سیگنال کمتر از ۱۱۵- دسی‌بل متر به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. همچنین، تغییر در روش‌های کدگذاری و مدولاسیون برای سطوح سیگنال کمتر از ۱۲۰- دسی‌بل متر باعث افزایش تأخیر در انتقال پیام می‌شود. به عبارت دیگر، برای سطوح سیگنال بالاتر از ۱۲۰- دسی‌بل متر تأخیر بیشتر وابسته به اندازه پیام می‌شود. افزایش زمان همراه با افزایش سربار مشاهده شده است. این وضعیت به دلیل نیاز به ارسال مجدد در مورد سطوح سیگنال کمتر از ۱۱۵- دسی‌بل متر ایجاد شده است. با وجود اینکه اکثر آزمایش‌ها در سطح سیگنال کمتر از ۱۱۵- دسی‌بل متر انجام شدند، انتقال داده‌ها در تمام موارد با موفقیت انجام شده است. بنابراین شبکه

اینترنت اشیاء باندباریک تحویل داده‌ها را تضمین می‌کند. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اینترنت اشیاء باندباریک هنوز هم در سناریوهایی با سطح سیگنال زیر ۱۰۰- دسی‌بل متر به طور قابل توجهی خوب عمل می‌کند. تأخیر انتقال در این موارد افزایش می‌یابد و تقریباً به تأخیر ۷ ثانیه می‌رسد. بدون شک، این موضوع می‌تواند یکی از مهم‌ترین موانع اینترنت اشیاء باندباریک در موارد کاربردی حساس به تأخیر باشد. به عبارت دیگر، برنامه‌های هدف برای فناوری سلولی اینترنت اشیاء باندباریک، سناریوهایی هستند که داده‌ها را چندین بار در روز یا حتی با فاصله‌های کمتر ارسال می‌کنند و بنابراین تأخیر از نظر حیاتی مهم نیست.

پژوهش [۳۲] به معرفی و تجزیه و تحلیل عملکرد زیرساخت LoRa برای اینترنت اشیاء می‌پردازد. پژوهش [۳۲] عملکرد این زیرساخت را با استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده از نصب LoRa در یک شهر و همچنین از شبیه‌سازی‌های مبتنی بر این داده‌ها، بررسی کرده است و به پارامترهایی از جمله گذردهی، پوشش شبکه و قابلیت مقیاس‌پذیری این زیرساخت اشاره شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که دستگاه‌های انتهایی LoRa می‌توانند گذردهی مناسبی را برای برنامه‌های اینترنت اشیاء با نرخ ترافیک پایین ارائه دهند، همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که کیفیت پوشش در فضای باز و در داخل ساختمان‌ها متفاوت است و مانع اصلی در محیط شهری موانع ساختمانی با چگالی بالا است بنابراین تنها سه دروازه کافی است تا یک منطقه شهری چگال با شعاع تقریبی ۱۵ کیلومتر را پوشش دهد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که شبکه‌های LoRa قابلیت مقیاس‌پذیری بالایی دارند و یک دروازه توانایی پشتیبانی از صدها هزار دستگاه انتهایی را دارد، اگر بار ترافیک هر دستگاه کم باشد. یک دروازه تا ۱۰^۵ دستگاه انتهایی را پشتیبانی کرده و هر کدام از آن‌ها می‌تواند هر ساعت ۵۰ بایت داده را ارسال کند، در حالی که تعداد بسته‌های از دست داده شده ناچیز است. از دیدگاه منفی در حالی که گذردهی روی یک کانال ۱۲۵ کیلوهرتز در لایه فیزیکی تا ۵.۵ کیلو بیت بر ثانیه قابل دستیابی است، گذردهی که در لایه برنامه به دست می‌آید به دلیل هزینه‌های پروتکل شبکه به طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر است و کمتر از ۱ کیلو بیت بر ثانیه می‌باشد.

در بخش انرژی پروتکل‌های ارتباطی همانطور که در بخش سوم گفته شد پروتکل MQTT سه سطح مختلف از کیفیت خدمات را فراهم می‌کند که در انتقال داده‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند. در پژوهش [۳۳] تأکید بر روی پروتکل MQTT و سه سطح مختلف کیفیت خدمات آن در زمان انتقال داده قرار دارد. برای انجام آزمایش‌ها، یک ساختار کاربر-سرور به کار گرفته شده است و از پروتکل MQTT برای انتقال اطلاعات بین انواع گره‌ها استفاده می‌شود. هدف اصلی پژوهش تخمین مصرف انرژی در این فرآیند انتقال داده با توجه به سه سطح مختلف کیفیت خدمات است. کیفیت خدمات به عناصر عملکرد شبکه مانند تأخیر، نرخ خطا و زمان فعال بودن مرتبط می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد در کیفیت خدمات “۰”، تحویل پیام تأیید نمی‌شود، به این

معنا که ممکن است پیام‌ها بدون تضمین تحویل ارسال شوند. در کیفیت خدمات "۱"، پس از دریافت پیام، تأیید ارسال می‌شود، اما این عمل باعث افزایش تأخیر در انتقال پیام در کیفیت خدمات "۱" می‌شود. در کیفیت خدمات "۲"، همیشه تضمین می‌شود که پیام به صورت دقیق یک‌بار تحویل داده شود، اما این حالت از نظر ایمنی بهترین حالت است ولی از لحاظ سرعت انتقال کندترین حالت ممکن است بنابراین نتایج پژوهش [۳۳] نشان می‌دهد که انرژی مصرفی در سه سطح مختلف کیفیت خدمات با هم متفاوت است. کیفیت خدمات "۱"، ۲۹٪ مصرف انرژی بیشتری نسبت به کیفیت خدمات "۰" دارد. کیفیت خدمات "۲"، ۸۷٪ مصرف انرژی بیشتری نسبت به کیفیت خدمات "۰" دارد و کیفیت خدمات "۲"، ۴۵٪ مصرف انرژی بیشتری نسبت به کیفیت خدمات "۱" دارد.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیز یکی از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با اینترنت اشیاء به شمار می‌آیند. این شبکه‌ها از دستگاه‌هایی تشکیل شده‌اند که توان پردازشی، حافظه و انرژی محدودی دارند. پروتکل‌های محدودی برای کار در این محیط‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهش [۲۷] یک مطالعه در مورد مصرف انرژی و ترافیک شبکه در پروتکل‌های لایه برنامه اصلی اینترنت اشیاء، شامل CoAP و MQTT-SN ارائه شده است. زمانی که مصرف کلی انرژی انتقال در نظر گرفته می‌شود عملکرد این دو پروتکل بسیار مشابه است. با این حال، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد از آن جایی که گره‌های کاربر MQTT-SN پیچیدگی کمتری نسبت به گره‌های کاربر CoAP دارند و MQTT-SN به زیرساختی نیاز دارد که سامانه واسط پیام را می‌طلبد و زمانی با مشکل مواجه می‌شویم که شبکه از پیش راه‌اندازی شده است و توانایی فراهم کردن چنین الزاماتی وجود ندارد در نتیجه MQTT-SN مؤثرتر از CoAP است با این حال، پیاده‌سازی CoAP از نظر زیرساخت ساده‌تر است چرا که بدون نیاز به این الزامات کار می‌کند و این می‌تواند یک مزیت باشد. با توجه به نیاز کاربر و برنامه از یکی از پروتکل‌های MQTT-SN یا CoAP استفاده می‌کنیم. اگر در برنامه‌ای که باید توسعه داده شود هدف کاهش مصرف انرژی باشد و به هیچ مکانیزم امنیتی یا کیفیت خدمات نیاز نداشته باشد بهتر است از MQTT-SN استفاده کرد. در غیر این صورت، CoAP نیز یک گزینه مناسب است.

در پژوهش [۲۱] پروتکل‌های مختلف لایه کاربردی اینترنت اشیاء یعنی CoAP، MQTT و AMQP از نظر مصرف انرژی و ترافیک شبکه با هم مقایسه شده‌اند و اندازه‌گیری‌ها روی سخت‌افزار واقعی و با اندازه‌ی مختلف بسته‌ها و با توجه به سطوح کیفیت خدماتی که آن پروتکل‌ها پشتیبانی می‌کنند انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که از نظر مصرف انرژی و ترافیک شبکه CoAP به دلیل استفاده از UDP به عنوان لایه انتقال اصلی به طور کلی بهترین پروتکل است و هر بسته CoAP به یک بسته UDP برای ارسال از کاربر به سرور نیاز دارد و دو پروتکل دیگر از TCP استفاده می‌کنند. MQTT بعد از CoAP مناسب‌ترین پروتکل است و با افزایش سطح کیفیت خدمات کمترین مصرف انرژی را دارد و در نهایت AMQP یک پروتکل مبتنی بر متن

است و مصرف انرژی بالایی نسبت به دو پروتکل دیگر دارد و بیش‌ترین ترافیک را نیز ایجاد می‌کند. بنابراین فقط باید برای دستگاه‌هایی با الزامات بسیار خاصی مورد استفاده قرار گیرد.

درباره‌ی کارایی پروتکل‌های ارتباطی در پژوهش [۳۴]، یک سامانه خوشه‌بندی واسط پیام MQTT با قابلیت مقیاس‌پذیری و هزینه کم پیشنهاد شده است. سامانه پیشنهادی شامل دو بخش اصلی load balancer frontend و چند واسط پیام MQTT در بخش back-end است. از طریق Docker Swarm این سامانه به راحتی قابل مقیاس‌پذیری است و NGINX برای توزیع ارتباطات MQTT به واسط‌های پیام MQTT در بخش backend استفاده می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که سامانه پیشنهادی قابلیت مقیاس‌پذیری بسیار خوبی دارد و گذرده‌ی آن در مقایسه با سامانه‌ای که یک واسط پیام دارد ۸ برابر افزایش می‌یابد. همچنین، مصرف واحد پردازش مرکزی در این سامانه نیز به ۱/۶ مصرف سامانه با یک واسط پیام کاهش می‌یابد. اما یکی از مسائلی که در این مقاله به آن پرداخته نشده است تحمل‌پذیری سامانه پیشنهادی در مقابل خطا است. در پیاده‌سازی فعلی، سامانه پیشنهادی هیچ مکانیزمی برای ارسال دوباره‌ی اطلاعات یا پیام‌ها ندارد و در صورتی که گره backend خراب شود، می‌تواند منجر به از دست رفتن اطلاعات شود.

موتور قوانین اینترنت اشیاء یک سامانه نرم افزاری است که از قوانین از پیش تعریف شده برای تصمیم‌گیری یا انجام اقدامات بر اساس داده‌های ورودی استفاده می‌کند. در پژوهش [۴] با استفاده از پلتفرم ابری HUAWEI هزینه و تأخیر پروتکل MQTT با استفاده از سطوح کیفیت خدمات مختلف تحت موتور قوانین اینترنت برای کمک به کارکنان سامانه اشیاء برای انتخاب بهترین سطوح کیفیت خدمات درخصوص تجهیزات مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که دستگاه‌ها از MQTT برای ارتباط با یکدیگر استفاده می‌کنند، میزان سرباری که این پروتکل به پیام‌ها اضافه می‌کند، در سطوح مختلف کیفیت خدمات، به ترتیب به این صورت است:

کیفیت خدمات "۰" > کیفیت خدمات "۱" > کیفیت خدمات "۲"
در مورد تأخیر ارسال و دریافت پیام‌ها با استفاده از پروتکل MQTT، نتایج نشان می‌دهد که در سه بازه زمانی مختلف صبح، ظهر و غروب کیفیت خدمات "۲" دارای تأخیر بیشتری نسبت به کیفیت خدمات "۱" و کیفیت خدمات "۰" است. تأخیر ارتباط MQTT به دلیل انتقال اطلاعات از زیرساخت TCP ناچیز است (در حدود میلی‌ثانیه‌ای)، اما در کیفیت خدمات "۲"، تأخیر بیش از دو برابر زمان مورد نیاز برای ارسال پیام و دریافت تأییدیه نسبت به کیفیت خدمات دیگر است. به علاوه، پژوهش [۴] اشاره دارد که پروتکل MQTT-SN به عنوان یک روش حفاظتی در آینده ممکن است مشکلات استفاده از TCP به جای UDP در برنامه‌های اینترنت اشیاء را حل کند، اما همچنان تحقیقات صورت گرفته موجود در این زمینه ناکافی هستند.

در سامانه‌های اینترنت اشیاء، لایه ابر و لایه داده‌ی بین دستگاه‌ها با استفاده از پروتکل‌های مختلف انتقال پیدا می‌کند. در پژوهش

[۲۴] دو پروتکل MQTT و AMQP در شرایط مختلف تأخیر و از دست رفتن بسته آزمایش شده است و نتایج ارزیابی این دو پروتکل بر اساس آزمایش‌ها ارائه شده است و در نهایت، بر اساس شرایط محیطی مختلف، پروتکل مناسبی توصیه شده است. نتایج پژوهش [۲۴] نشان می‌دهد زمانی که نرخ تلفات داده کمتر از ۱۰-۵ درصد باشد و داده‌ها به صورت پیوسته ارسال نشوند MQTT به منظور ارائه بهترین تأخیر در زمان انتقال توصیه می‌شود. پروتکل AMQP در مقایسه با MQTT پیشرفته‌تر و قابل اعتمادتر است و دارای امنیت بهتری می‌باشد. این پروتکل ویژگی‌هایی نظیر مسیریابی انعطاف‌پذیر، صف‌های دائمی و پیوسته، خوشه‌بندی، ارتباطات و صف‌های با دسترسی بالا را دارد. AMQP به عنوان ویژگی مهم خود قابلیت ذخیره پیام‌ها در صف‌ها را دارا است و این امکان را فراهم می‌کند که داده‌ها در صورت خرابی سامانه نگه‌داری شوند و به مصرف‌کننده کمک می‌کند که هر بار نیازی به اتصال مجدد به واسط پیام نداشته باشد. همچنین AMQP زمانی که بسته‌های داده به صورت پیوسته با و بدون تأخیر و بدون تلفات داده یا با نرخ تلفات بالا ارسال می‌شوند و همچنین در مواردی که بسته‌های داده به صورت پیوسته ارسال نمی‌شوند ولی نرخ تلفات داده بسیار پایین یا بسیار بالا است توصیه می‌شود.

در پژوهش [۱۹]، سه پروتکل CoAP، MQTT و AMQP برای سامانه‌های اینترنت اشیاء مورد ارزیابی قرار گرفته است. این ارزیابی بر اساس مؤلفه‌های ثابت و برخی شواهد تجربی انجام شده است. بالین‌حال، این ارزیابی شرایط شبکه پویا و هزینه‌های سربار مرتبط با بازفرستادن بسته‌ها را که ممکن است نتایج مقایسه را تغییر دهد، در نظر نگرفته است. در ارزیابی مقایسه‌ای از پروتکل‌های پیام‌رسانی بر اساس اندازه پیام و هزینه سربار، پروتکل CoAP که بر روی UDP اجرا می‌شود، هزینه اتصال را کاهش داده و در نتیجه هزینه سربار کلی را کاهش می‌دهد بنابراین از بین این سه پروتکل کمترین سربار را دارد. پروتکل‌های MQTT و AMQP که بر روی TCP اجرا می‌شوند، هزینه سرباری به علت برقراری و بستن اتصال TCP تحمیل می‌کنند. اما پشتیبانی AMQP از امنیت، قابلیت اطمینان و قابلیت همکاری^{۷۲} یا تعامل‌پذیری باعث افزایش سربار و اندازه پیام می‌شود و منجر به این می‌شود که اندازه و سربار پیام آن نسبت به MQTT و CoAP بیشتر شود. بر اساس مصرف انرژی و نیاز به منابع، نتایج الگوهای مشابه به مقایسه‌ی قبلی را نشان می‌دهد که در آن CoAP به طور کلی مصرف کمتری از نظر انرژی و منابع نسبت به MQTT در شرایط مختلف دارد، از جمله در شرایطی که نرخ از دست رفتن بسته‌ها اهمیت دارد. از سوی دیگر، AMQP به دلیل برقراری قابلیت اطمینان نسبت به دو پروتکل دیگر کمی بیشتر نیاز به انرژی و منابع دارد. بر اساس میانگین پهنای باند و تأخیر، CoAP با استفاده از تراکنش UDP زمان پاسخ شبکه را کاهش می‌دهد بنابراین کمترین پهنای باند و تأخیر را نسبت به دو پروتکل دیگر دارد. استفاده از TCP در MQTT و AMQP تأثیر زیادی بر روی تأخیر و پهنای باند دارد. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که MQTT در انتقال همان مقدار داده تحت شرایط شبکه یکسان، به

ویژه در حالت‌های MQTT با کیفیت خدمات "۱" یا "۲" در مقایسه با CoAP، CON پهنای باند بیشتری مصرف می‌کند. علاوه‌براین، مصرف پهنای باند MQTT در مقایسه با CoAP در مواردی مانند MQTT با کیفیت خدمات "۲" و CoAP، CON به دلیل مکانیزم چهار مرحله‌ای کیفیت خدمات "۲" تقریباً دو برابر است. سرویس‌های اضافی AMQP نیاز بیشتری به پهنای باند نسبت به دو پروتکل دیگر دارند بنابراین دارای تأخیر بیشتری هم هستند. از نظر تعامل‌پذیری هم این سه پروتکل مقایسه شده‌اند. MQTT و AMQP در کیفیت خدمات برتری دارند اما تعامل‌پذیری محدودی نسبت به CoAP دارند. از نظر امنیت نیز AMQP نسبت به دو پروتکل دیگر برتری دارد، در حالی که MQTT تقریباً یک پروتکل پیام‌رسانی است و کمترین سطح امنیت را ارائه می‌دهد. CoAP برای احراز هویت^{۷۳} و رمزنگاری^{۷۴} از دوروش DTLS و IPsec استفاده می‌کند.

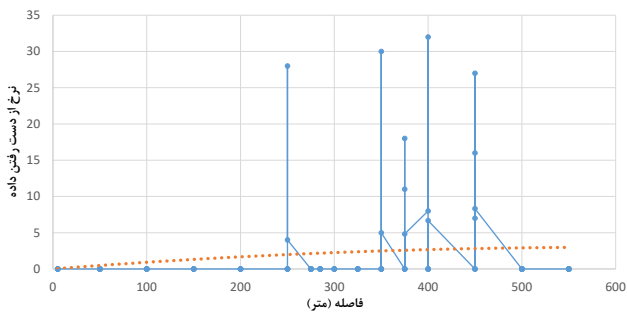
۵ مشاهدات

در این پژوهش، زیرساخت‌های ارتباطی LoRa، BLE، WiFi و پروتکل ارتباطی MQTT با هدف بررسی انرژی مصرفی و نرخ از دست رفتن داده‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

در این آزمایش از برد توسعه ESP32 به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی همچون قیمت مناسب و انرژی کم استفاده شده است همچنین این برد، دارای ماژول WiFi داخلی و پشتیبانی از پشته پروتکلی TCP/IP است.

۱-۵ LoRa

در ابتدا انرژی و نرخ از دست رفتن داده‌ها برای زیرساخت ارتباطی LoRa آزمایش شده است. برای زیرساخت ارتباطی LoRa دستگاهی توسعه داده شده که شامل یک دروازه و یک فرستنده است که فرستنده بسته‌ها را می‌فرستد و دروازه آن‌ها را دریافت می‌کند. دروازه مشکل از یک مودم LoRa، یک پردازنده ESP32 و مدارات مرتبط است. فرستنده ما شامل یک STM32L03، مودم LoRa و باتری سکه‌ای است که هر ۱۰ ثانیه یکبار بسته ارسال می‌کند. برای دیدن انرژی مصرفی، فرستنده به دستگاهی به نام اسیلوسکوپ که تصویر آن در شکل ۶ آمده متصل شده است. در اسیلوسکوپ دامنه سیگنال در نموداری دوبعدی نمایش داده می‌شود که محور افقی، زمان و محور عمودی، مقدار ولتاژ است. از اسیلوسکوپ برای نمایش دقیق شکل موج استفاده می‌شود. عرض نمودارها به دلیل این که نویز کمی در اندازه‌گیری وجود داشت پهنای دارد. برای اندازه‌گیری دستگاه از مقاومتی با مقدار بسیار پایین با اندازه ۰.۱ اهم به نام شنت استفاده شده و زمانی که جریان از آن عبور می‌کند ولتاژ دو سر مقاومت شنت اندازه گرفته شده و در اسیلوسکوپ مقدار آن قابل مشاهده است. برای محاسبه انرژی یک بسته ارسالی از روی نمودار LoRa، مطابق شکل ۷ ولتاژ و زمان بخش Idle، به ترتیب ۲ میلی‌ولت و ۸ ثانیه است و ولتاژ و زمان ارسال یک بسته، به ترتیب ۸ میلی‌ولت و ۲ ثانیه است طبق فرمول $V = R \cdot I$ با داشتن V و R که به ترتیب ولتاژ و مقاومت هستند می‌توان جریان که با



شکل ۸: نمودار از دست رفتن بسته‌های ارسالی در LoRa

Bluetooth که همیشه فعال است، BLE فقط در زمان برقراری اتصال یک دستگاه به دستگاه دیگر فعال باقی می‌ماند در غیر این صورت به صورت پیوسته در حالت خواب باقی می‌ماند. برای این آزمایش از دو عدد ESP32 استفاده شده است که یکی از آن‌ها به عنوان فرستنده و دیگری به عنوان گیرنده است که این باعث می‌شود مصرف انرژی بسیار کمی داشته باشد. BLE تقریباً ۱۰۰ برابر کمتر از Bluetooth انرژی مصرف می‌کند. در این آزمایش مطابق شکل ۹ یکی از بردهای ESP32 به عنوان فرستنده وجود خود را اعلام می‌کند، بنابراین می‌تواند توسط دستگاه‌های دیگر شناسایی شود و حاوی داده‌هایی است که گیرنده می‌تواند بخواند. گیرنده دستگاه‌های نزدیک را اسکن می‌کند و وقتی فرستنده مورد نظر خود را شناسایی کرد، اتصال برقرار می‌کند و به داده‌های ورودی گوش می‌دهد. برای دیدن انرژی مصرفی بسته ارسالی، فرستنده به اسیلوسکوپ متصل شده و شکل ۱۰ نشان‌دهنده بخش Idle و بخش ارسال بسته‌ها است انرژی مصرفی محاسبه شده برای ارسال یک بسته توسط فرستنده BLE، ۰.۰۱۳۹۲۶ ژول است.

برای محاسبه نرخ از دست رفتن بسته‌ها این آزمایش در محیط دانشگاه علم و صنعت، در شرایط بدون تداخل و با گام ۵ متر تا محدوده ۱۲۰ متر انجام شده و در هر گام ۶۰ بسته ارسال شده است. محدوده پوشش دهی BLE کمتر از ۱۰۰ متر است که مطابق شکل ۱۱ تا محدوده ۶۰ متری بسته‌ای از دست نرفته ولی بعد از این محدوده نرخ از دست دادن بسته‌ها افزایش یافته و در صورت وجود تداخل این نرخ بدتر می‌شود.

۳-۵ WiFi

برای محاسبه انرژی و نرخ از دست رفتن داده در زیرساخت ارتباطی WiFi، به یک ESP32 و یک تلفن همراه نیاز است. بسته‌های UDP به برنامه‌ای به نام Hercules که بر روی رایانه ما نصب است ارسال می‌شوند. نرم افزار Hercules یک ترمینال UDP IP و ترمینال TCP IP (کاربر و سرور) است.

از طریق کد نوشته شده، دستگاه ما به شبکه WiFi متصل شده و بسته‌ها را با استفاده از پروتکل UDP به صورت همه‌پخشی ارسال می‌کند و سرور پیام ارسالی را دریافت می‌کند. شکل ۱۲ و ۱۳ نتایج به دست آمده را نشان می‌دهند و انرژی مصرفی محاسبه شده برای ارسال



شکل ۶: دستگاه اسیلوسکوپ



شکل ۷: انرژی مصرفی بسته‌های ارسالی در LoRa

نماد I نشان داده شده است را محاسبه کرد که با انجام این محاسبات جریان ارسالی برای بخش Idle و بخش ارسال بسته به ترتیب ۲۰ و ۸۰ میلی‌آمپر به دست می‌آید و در نهایت با داشتن جریان، طبق فرمول $E = V.I.T$ انرژی این دو بخش را محاسبه و انرژی کل از جمع این دو بخش به دست می‌آید که مقدار آن ۰.۰۵۲۸ ژول است و انرژی سایر زیرساخت‌های ارتباطی هم با استفاده از روش ذکر شده محاسبه شده است.

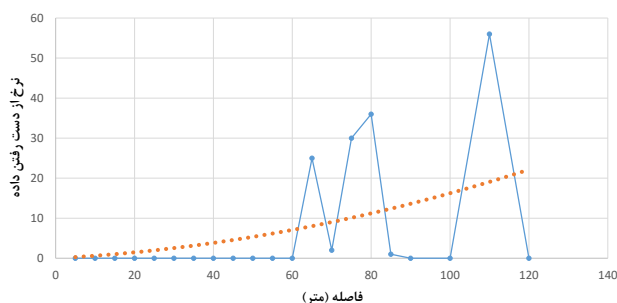
برای محاسبه نرخ از دست رفتن بسته‌ها، این آزمایش در مسافت‌های مختلف و در محیط بدون تداخل انجام گرفته است و در هر موقعیت ۶ بسته دریافت شده که نرخ از دست رفتن بسته‌ها را در شکل ۸ می‌توانید مشاهده کنید. مطابق شکل ۸ بیش از ۲۵۰ متر با توجه محدودیت پوشش دهی آنتن دستگاه توسعه داده شده، PDR ممکن است کاهش پیدا کند و زیر ۲۵۰ متر مشکلی در ارتباط وجود ندارد.

۲-۵ BLE

Bluetooth با مصرف انرژی پایین یا به اختصار BLE، نسخه‌ای از صرفه‌جویی در انرژی از Bluetooth است. کاربرد اصلی BLE انتقال داده‌های کم حجم به فواصل کوتاه (پهنای باند کم) است. برخلاف



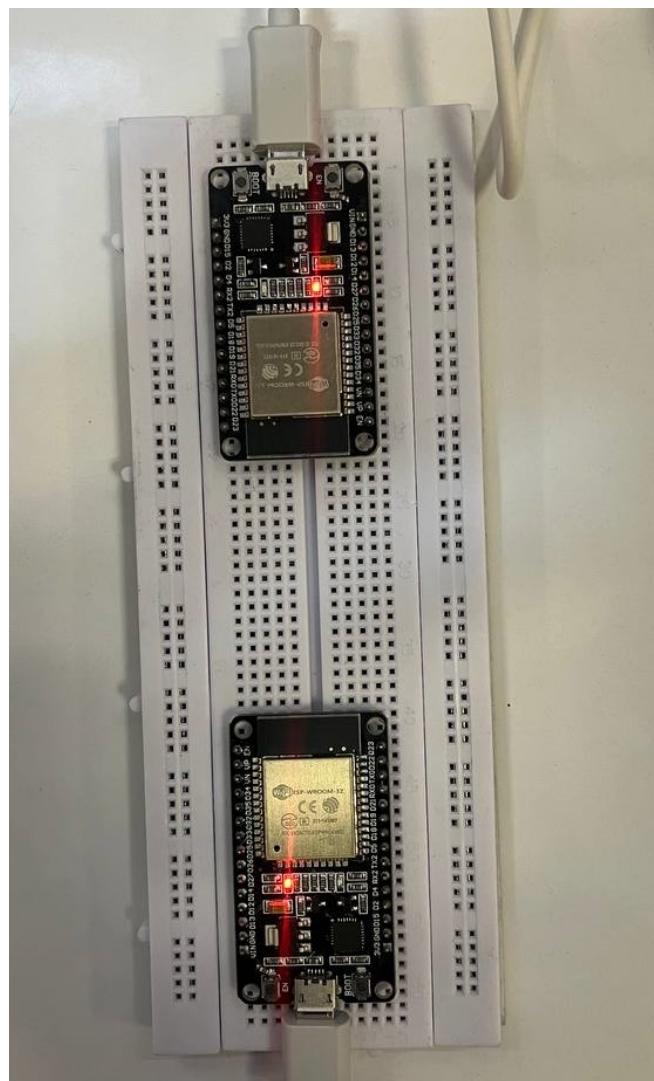
شکل ۱۰: انرژی مصرفی بسته‌های ارسالی در BLE



شکل ۱۱: نمودار از دست رفتن بسته‌های ارسالی در BLE

۴-۵ MQTT

در بخش پروتکل‌های ارتباطی ابتدا قصد بر این بود که دو پروتکل MQTT و CoAP از نظر مصرف انرژی با هم مقایسه شوند اما به دلیل محدودیت زمانی فقط پروتکل MQTT ارزیابی شده است. برای محاسبه انرژی مصرفی انتشار/اشتراک در MQTT از دو عدد ESP32 استفاده شده است که یکی از آن دو به عنوان منتشرکننده و دیگری اشتراک‌گیرنده عمل می‌کند. مطابق جدول ۲ سناریو اول ۱۰۰۰ عدد بسته ۱۰۰ بایتی، سناریو دوم ۱۰۰۰ عدد بسته ۵۰۰ بایتی و سناریو سوم ۱۰۰۰ عدد بسته ۱۰۲۴ بایتی یکسان ارسال شده و در هر ثانیه یک بسته ارسال می‌شود و برای این که انرژی زیادی مصرف نشود پیام به صورت تصادفی تولید نشده است. انرژی مصرفی فقط به انتشار مربوط می‌شود که آن نیز با اسیلوسکوپ اندازه گرفته شده است. برای محاسبه انرژی اشتراک از دو ماژول استفاده شده که روی یکی از آن‌ها که به رایانه ما متصل است داده ارسال شده و ماژول بعدی به عنوان اشتراک‌گیرنده به اسیلوسکوپ متصل است و این سه بسته ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۲۴ بایتی توسط انتشارگیرنده دریافت می‌شود. برای محاسبه انرژی مصرفی اشتراک‌گیرنده نیز این مراحل باید تکرار شود که نتایج طبق شکل‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ در جدول ۳ نشان می‌دهد که هر چقدر مساحت سطح زیر نمودار



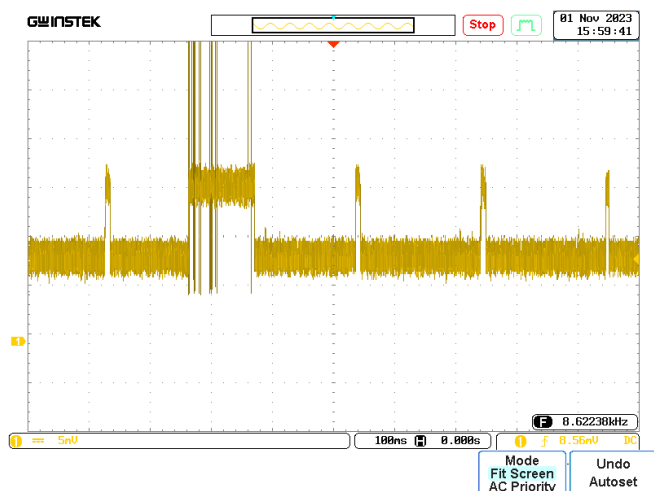
شکل ۹: فرستنده-گیرنده در BLE

یک بسته توسط WiFi، ۰.۰۶۱۵۴۵ ژول است. تعداد بسته‌های ارسالی در این آزمایش ۶۰ بوده است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که برای WiFi تا محدوده تقریباً ۳۰ متری بسته‌ها به درستی به مقصد رسیده‌اند اما بعد از این محدوده نرخ از دست رفتن بسته‌ها افزایش یافته است اما طبق خط روند رسم شده در شکل ۱۳ چون شیب آن در مقایسه با دو زیرساخت LoRa و BLE مطابق شکل‌های ۸ و ۱۱ بیشتر است و از آن جایی که هر چقدر پهنای باند بیشتر باشد برد کمتر می‌شود و پهنای باند WiFi در مقایسه با BLE بیشتر است در نتیجه در محدوده بالای ۳۰ متری تعدادی از بسته‌ها از دست رفتند درحالی که در BLE تا محدوده ۶۰ متری هیچ کدام از بسته‌ها از دست نرفتند.

نتیجه به دست آمده از این مشاهدات از نظر انرژی مصرفی نیز در جدول ۱ آمده است. مطابق جدول ۱ انرژی مصرفی زیرساخت ارتباطی BLE نسبت به LoRa و WiFi کمتر است.

جدول ۲: سناریو ارسال بسته‌ها

سناریو	تعداد بسته	اندازه پیام
۱	۱۰۰۰	۱۰۰
۲	۱۰۰۰	۵۰۰
۳	۱۰۰۰	۱۰۲۴

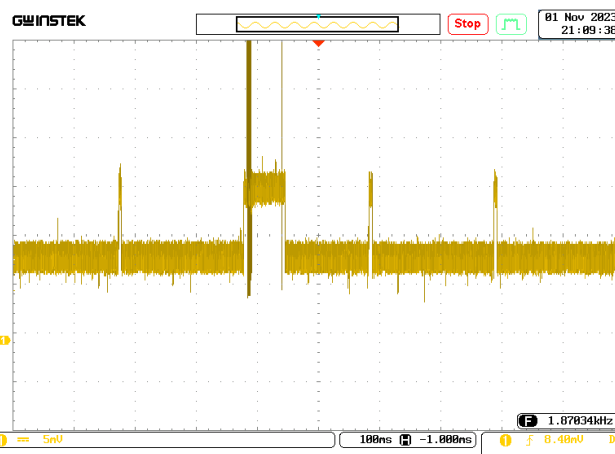


شکل ۱۴: انرژی مصرفی برای انتشار بسته ۱۰۰ بایتی

بیشتر باشد انرژی مصرفی بیشتر است بنابراین بسته ۱۰۲۴ بایتی انرژی بیشتری نسبت به بسته ۵۰۰ و ۱۰۰ بایتی مصرف می‌کند به عبارتی برای ارسال بسته‌های با طول پیام بیش‌تر باید انرژی بیشتری مصرف کنیم و همچنین نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد انرژی که برای انتشار مصرف می‌کنیم از اشتراک بیشتر است.

جدول ۳: انرژی محاسبه شده برای ارسال هر بسته در پروتکل MQTT

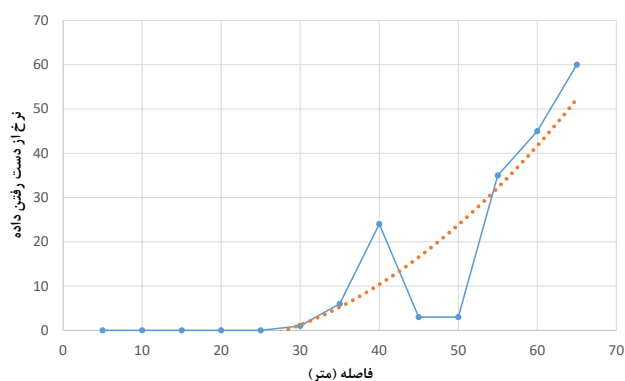
انرژی محاسبه شده برحسب ژول برای ارسال هر بسته		
انرژی	اندازه پیام (بایت)	ارسال/دریافت
۰/۱۴۲۵۶	۱۰۰	انتشار
۰/۱۹۱۸۹۵	۵۰۰	
۰/۲۴۰۴۳۸	۱۰۲۴	
۰/۰۹۷۰۲	۱۰۰	اشتراک
۰/۱۷۴۰۷۵	۵۰۰	
۰/۲۰۷۴۰۵	۱۰۲۴	



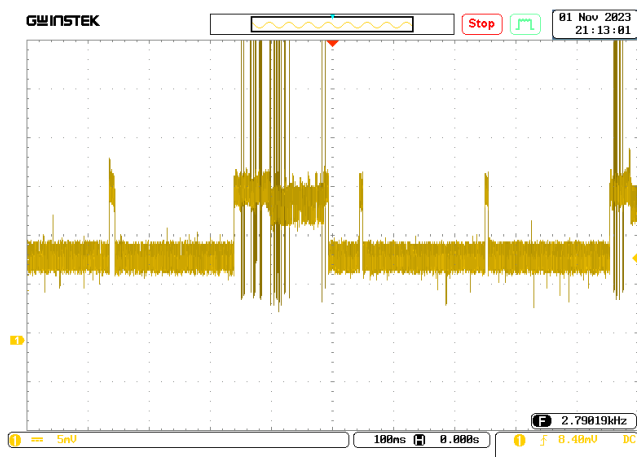
شکل ۱۵: انرژی مصرفی بسته‌های ارسالی WiFi تحت پروتکل UDP

جدول ۱: انرژی محاسبه شده برای سه زیرساخت ارتباطی

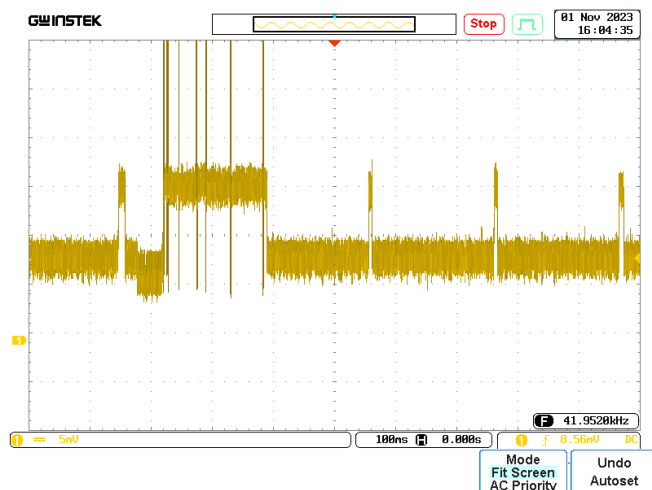
انرژی محاسبه شده برحسب ژول برای ارسال هر بسته	
انرژی	زیرساخت‌های ارتباطی
۰/۰۵۲۸	LoRa
۰/۰۱۳۹۲۶	BLE
۰/۶۱۵۴۵	WiFi



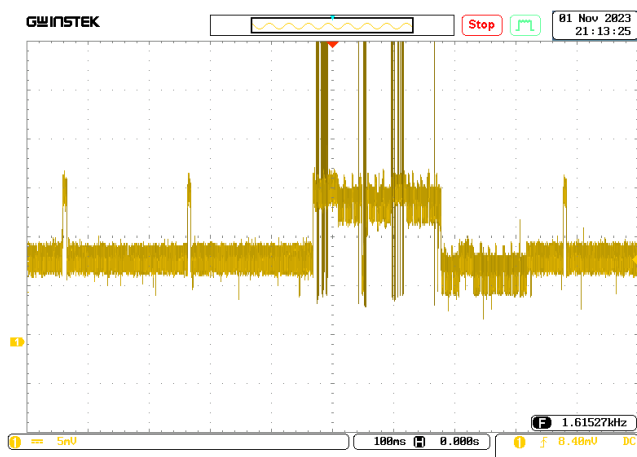
شکل ۱۶: نمودار از دست رفتن بسته‌های ارسالی در WiFi



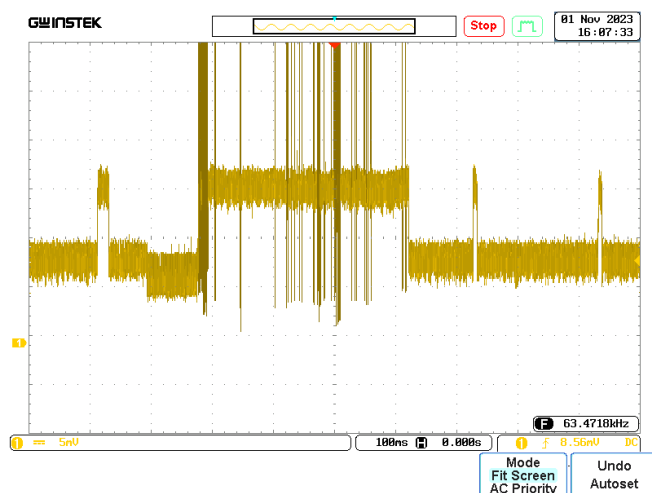
شکل ۱۸: انرژی مصرفی برای اشتراک بسته ۵۰۰ بیتی



شکل ۱۵: انرژی مصرفی برای انتشار بسته ۵۰۰ بیتی

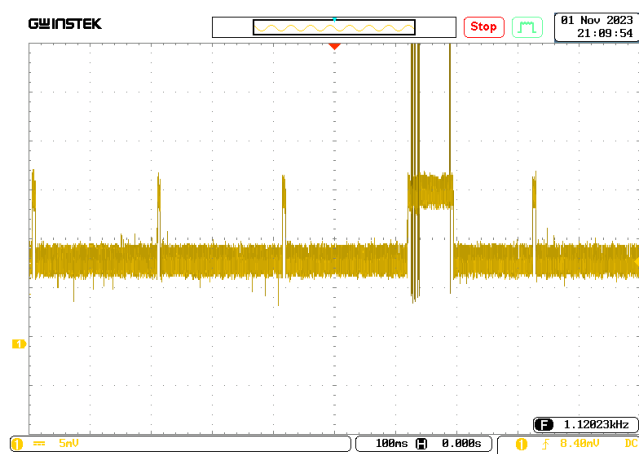


شکل ۱۹: انرژی مصرفی برای اشتراک بسته ۱۰۰۰ بیتی



شکل ۱۶: انرژی مصرفی برای انتشار بسته ۱۰۰۰ بیتی

در بخش آخر آزمایش MQTT، هدف محاسبه Packet Delivery Ratio یا به اختصار PDR برای دو واسطه پیام رایگان است. فرمول (۱) نشان می‌دهد چه تعداد از بسته‌هایی که در شبکه ارسال می‌شوند، به درستی به مقصد می‌رسند و چه تعداد از آن‌ها به دلیل عوامل مختلف مانند سیگنال ضعیف یا تداخلات از دست می‌روند و هر چقدر PDR بهتر باشد کارایی سامانه بهتر است. در این آزمایش برای مقایسه دقیق‌تر واسطه‌های پیام مختلف، مطابق جدول ۴ برنامه‌های کاربران به دو بخش متفاوت برنامه‌های بی‌درنگ با موعد زمانی ۸۵۰ و برنامه‌های غیر حساس به زمان با موعد زمانی ۱۳۵۰ جهت پذیرفتن بسته تقسیم شده است. واسطه‌های پیام انتخابی در این آزمایش HiveMQ و MQTTMQ است. در طول ۲۴ ساعت در فواصل زمانی ۸ ساعته، ۱۰۰ بسته ۵۰۰ بیتی را با فاصله زمانی یک ثانیه ارسال کرده و PDR برای این واسطه‌های پیام محاسبه شده است. این پژوهش در محیط آزمایشگاه سامانه‌های سایر-فیزیکی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. تعداد بسته‌های ارسالی برای هر واسطه پیام ۱۰۰۰ عدد بسته



شکل ۱۷: انرژی مصرفی برای اشتراک بسته ۱۰۰ بیتی

- tion technologies and challenges,” *IEEE access*, vol.6, pp.3619–3647, 2017.
- [14] A. Pant, M. Singh, and M. S. Parihar, “A frequency reconfigurable/switchable mimo antenna for lte and early 5g applications,” *AEU-international Journal of Electronics and Communications*, vol.131, p.153638, 2021.
 - [15] C. Santhosh, S. A. Kumer, J. G. Krishna, M. Vaishnavi, P. Sairam, and P. Kasulu, “Iot based smart energy meter using gsm,” *Materials Today: Proceedings*, vol.46, pp.4122–4124, 2021.
 - [16] M. Bor, J. E. Vidler, and U. Roedig, “Lora for the internet of things,” 2016.
 - [17] B. Vejlggaard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovács, P. Mogensen, and M. Sorensen, “Coverage and capacity analysis of sigfox, lora, gprs, and nb-iot,” in *2017 IEEE 85th vehicular technology conference (VTC Spring)*, pp.1–5, IEEE, 2017.
 - [18] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low power wide area networks: An overview,” *ieee communications surveys & tutorials*, vol.19, no.2, pp.855–873, 2017.
 - [19] N. Naik, “Choice of effective messaging protocols for iot systems: Mqtt, coap, amqp and http,” in *2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)*, pp.1–7, IEEE, 2017.
 - [20] Ably, “Pub/sub use cases: When to use the pub/sub pattern,” 2019. [Online].Available:<https://ably.com/blog/pub-sub-pattern-examples>.
 - [21] T. Stefanec and M. Kusek, “Comparing energy consumption of application layer protocols on iot devices,” in *2021 16th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, pp.23–28, IEEE, 2021.
 - [22] Z. Shelby, “The constrained application protocol (coap),internet engineering task force (ietf),” 2014. [Online].Available:<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252>.
 - [23] H. C. Hwang, J. S. Park, B. R. Lee, and J. G. Shon, “An enhanced reliable message transmission system based on mqtt protocol in iot environment,” in *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing: CSA-CUTE2016 8*, pp.982–987, Springer, 2017.
 - [24] N. Q. Uy and V. H. Nam, “A comparison of amqp and mqtt protocols for internet of things,” in *2019 6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, pp.292–297, IEEE, 2019.
 - [25] S. Cope, “Understanding mqtt qos levels,” 2011-2023. [Online].Available:<http://www.steves-internet-guide.com/understanding-mqtt-qos-levels-part-1/>.
 - [2] H. Taleb, A. Nasser, G. Andrieux, N. Charara, and E. M. Cruz, “Energy consumption improvement of a healthcare monitoring system: application to lorawan,” *IEEE Sensors Journal*, vol.22, no.7, pp.7288–7299, 2022.
 - [3] H. Koc and P. P. Madupu, “Optimizing energy consumption in cyber physical systems using multiple operating modes,” in *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp.520–525, IEEE, 2018.
 - [4] Y. J. Zhang and W. Q. Tao, “Analysis of network overhead and delay of rule engine based on mqtt protocol,” in *Proceedings of the 2022 10th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City*, pp.179–183, 2022.
 - [5] S. M. Z. Khan, M. M. Alam, Y. Le Moullec, A. Kuusik, S. Päränd, and C. Verikoukis, “An empirical modeling for the baseline energy consumption of an nb-iot radio transceiver,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol.8, no.19, pp.14756–14772, 2021.
 - [6] Y. Chen, Y. A. Sambo, O. Onireti, and M. A. Imran, “A survey on lpwan-5g integration: Main challenges and potential solutions,” *IEEE Access*, vol.10, pp.32132–32149, 2022.
 - [7] T. Li and P. Hou, “Application of nb-iot in intelligent fire protection system,” in *2019 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*, pp.203–206, IEEE, 2019.
 - [8] Y.-P. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H. S. Razaghi, “A primer on 3gpp narrowband internet of things,” *IEEE communications magazine*, vol.55, no.3, pp.117–123, 2017.
 - [9] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, “A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot,” *Ict Express*, vol.3, no.1, pp.14–21, 2017.
 - [10] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol.17, no.4, pp.2347–2376, 2015.
 - [11] M. T. Abbas, K.-J. Grinnemo, J. Eklund, S. Alfredsson, M. Rajiullah, A. Brunstrom, G. Caso, K. Kousias, and Ö. Alay, “Energy-saving solutions for cellular internet of things—a survey,” *IEEE Access*, vol.10, pp.62073–62096, 2022.
 - [12] R. Singh and Y. Yan, “An experimental evaluation of nb-iot coverage and energy consumption,” in *2020 IEEE Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp)*, pp.1–6, IEEE, 2020.
 - [13] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, “A survey on 5g networks for the internet of things: Communica-

Application Programming Interfaces .۹	
Short-Range .۱۰	
Long-Range .۱۱	
Constrained Application Protocol .۱۲	
Message Queuing Telemetry Transport .۱۳	
Advanced Message Queuing Protocol .۱۴	
MQTT for Sensor Networks .۱۵	
Quality of Service .۱۶	
Publish/Subscribe .۱۷	
Radio Frequency Identification .۱۸	
Near Field Communication .۱۹	
Topology .۲۰	
End Devices .۲۱	
3rd Generation Partnership Project (3GPP) .۲۲	
Narrowband Internet of Things .۲۳	
Long Term Evolution-machine Type Communication .۲۴	
Enhanced Carrier Global System for Mobile Communications .۲۵	
Low-power Wide Area Network (LPWAN) .۲۶	
Machine to Machine .۲۷	
Enhanced Machine-Type Communication .۲۸	
Mobility .۲۹	
General Packet Radio Services .۳۰	
Binary Phase Shift Keying .۳۱	
Chirp Spread Spectrum .۳۲	
Gateway .۳۳	
Real-Time .۳۴	
Subscriber .۳۵	
Publisher .۳۶	
Topic .۳۷	
Broker .۳۸	
Scalability .۳۹	
Component .۴۰	
Lossy .۴۱	
Internet Engineering Task Force .۴۲	
Request/Response .۴۳	
Resource/Observe .۴۴	
Universal Resource Identifier .۴۵	

- [26] S. Cope, "Introduction to mqtt-sn (mqtt for sensor networks)," 2011-2023. [Online]. Available: <http://www.steves-internet-guide.com/mqtt-works/>.
- [27] M. Martí, C. Garcia-Rubio, and C. Campo, "Performance evaluation of coap and mqtt_sn in an iot environment," *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, vol.31, no.1, p.49, 2019.
- [28] A. M. Gaddafi and M. Muhammad, "Optimized low-powered wide area network within internet of things," *Qeios*, 2023.
- [29] U. Noreen, A. Bounceur, and L. Clavier, "A study of lora low power and wide area network technology," in *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, pp.1–6, IEEE, 2017.
- [30] C. Bouras, A. Gkamas, and S. A. K. Salgado, "Energy efficient mechanism for lora networks," *Internet of Things*, vol.13, p.100360, 2021.
- [31] R. Mozny, P. Masek, M. Stusek, K. Zeman, A. Ometov, and J. Hosek, "On the performance of narrow-band internet of things (nb-iot) for delay-tolerant services," in *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp.637–642, IEEE, 2019.
- [32] A. M. Yousuf, E. M. Rochester, B. Ousat, and M. Ghaderi, "Throughput, coverage and scalability of lora lpwan for internet of things," in *2018 IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, pp.1–10, IEEE, 2018.
- [33] J. Toldinas, B. Lozinskis, E. Baranauskas, and A. Dobrovolskis, "Mqtt quality of service versus energy consumption," in *2019 23rd International Conference Electronics*, pp.1–4, IEEE, 2019.
- [34] P. Jutadhamakorn, T. Pillavas, V. Visoottiviset, R. Takano, J. Haga, and D. Kobayashi, "A scalable and low-cost mqtt broker clustering system," in *2017 2nd International Conference on Information Technology (INCIT)*, pp.1–5, IEEE, 2017.

پانویس‌ها

Technology .۱
Systems Cyber-Physical .۲
Infrastructures .۳
Sensor .۴
Actuator .۵
Internet of Things .۶
Simple Object Access Protocol .۷
Hypertext Transfer Protocol .۸

Multicast	. ٤٦
User Datagram Protocol	. ٤٧
Overhead	. ٤٨
Transmission Control Protocol	. ٤٩
Datagram Transport Layer Security	. ٥٠
Header	. ٥١
Confirmable	. ٥٢
Non-Confirmable	. ٥٣
At Most Once	. ٥٤
At Least Once	. ٥٥
Acknowledgement	. ٥٦
Wireless Sensor Network	. ٥٧
Secure Sockets Layer	. ٥٨
QoS 0	. ٥٩
Reliability	. ٦٠
Fire-and-Forget	. ٦١
QoS 1	. ٦٢
QoS 2	. ٦٣
Simple Authentication and Security Layer	. ٦٤
Entity	. ٦٥
Offline	. ٦٦
Particle Swarm Optimization Algorithm	. ٦٧
Spreading Factor	. ٦٨
Search and Rescue	. ٦٩
Time Difference of Arrival	. ٧٠
Extended Discontinuous Reception	. ٧١
Interoperability	. ٧٢
Authentication	. ٧٣
Encryption	. ٧٤