

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۰۱/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۴/۰۹

بررسی و مقایسه جامع فناوری‌های بی‌سیم برای اینترنت اشیاء

کسری رشیدی

دانشجوی مهندسی کامپیوتر، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
پست الکترونیکی: kasrarashidi3@gmail.com

سعدون عزیزی*

استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
پست الکترونیکی: s.azizi@uok.ac.ir

چکیده

توسعه‌دهندگان کمک می‌کند تا به شناخت و درک مطلوبی از فناوری‌های مختلف اینترنت اشیاء دست پیدا کرده و بتوانند مناسب‌ترین فناوری بی‌سیم را برای کاربردهای مورد نظر انتخاب نمایند. واژه‌های کلیدی: اینترنت اشیاء، فناوری‌ها و پروتکل‌های بی‌سیم، مقایسه و ارزیابی، برد محیطی، نرخ ارسال، مصرف انرژی

مقدمه

یک شبکه کامپیوتری این امکان را فراهم می‌کند که کامپیوترهای وصل شده به شبکه بتوانند منابع و اطلاعات را ارسال، دریافت و به اشتراک بگذارند. در اواخر سال ۱۹۶۰ این امکان فراهم شد که دو کامپیوتر بتوانند با هم ارتباط برقرار کنند؛ در اوایل سال ۱۹۸۰ پروتکل TCP/IP معرفی گردید و سپس اینترنت یا وب جهانی در سال ۱۹۹۱ به وجود آمد و باعث پیشرفت چشمگیر بستر شبکه جهانی شد. بعد از آن قابلیت وصل شدن به اینترنت برای تلفن‌های همراه نیز فراهم آمد و باعث شد که کاربران در هر زمان و هر مکانی قابلیت وصل شدن به اینترنت و

اینترنت اشیاء یک بُن‌انگاره (پارادایم) به سرعت در حال رشد است که ارتباطات بین انسان با دستگاه (H2D) و دستگاه با دستگاه (D2D) را با استفاده از فناوری‌ها و پروتکل‌های بی‌سیم فراهم می‌سازد. با توجه به نیازمندی‌های مختلف، تاکنون فناوری‌های بی‌سیم متعددی برای برقراری ارتباطات شبکه‌ای در حوزه اینترنت اشیاء به وجود آمده است. بررسی و مقایسه فناوری‌های بی‌سیم (مانند NB-IoT، LoRa WAN، Sigfox، Zigbee، Z-Wave، EnOcean و Bluetooth Low Energy) از نظر معیارهایی همچون برد محیطی، نرخ ارسال، مصرف انرژی، فرکانس و مقیاس‌پذیری یک چالش اساسی و بحث‌برانگیز است. در این مقاله، ما ابتدا مطالعه‌ای جامع روی مشخصات و پارامترهای کلیدی هر یک از فناوری‌های بی‌سیم رایج انجام می‌دهیم و در ادامه، آن‌ها را از جنبه‌های مختلف با هم مقایسه می‌کنیم. در نهایت نیز، با توجه به کاربردهای چند سال اخیر در حوزه اینترنت اشیاء، پروتکل‌ها و فناوری‌های رایج‌تر و مقبول‌تر برای هر کاربرد را معرفی می‌کنیم. نتیجه این مطالعه و بررسی به مهندسان و

* نویسنده مسئول

تبادل داده میان یکدیگر را داشته باشند. در سال ۱۹۹۹ بُن‌انگاره اینترنت اشیا^۱ به وجود آمد که تعریف جدیدی از شبکه را مبتنی بر ارتباطات بین انسان با دستگاه (H2D) و دستگاه با دستگاه (D2D) با استفاده از فناوری‌ها و پروتکل‌های بی‌سیم ارائه می‌دهد.

اینترنت اشیا تاکنون توانسته بر زندگی روزمره انسان‌ها و اشیاء و محیط اطرافمان تاثیر چشم‌گیری داشته باشد و روال زندگی روزمره را دچار تغییرات زیادی کند. همچنین با استفاده از فناوری‌های بی‌سیم بستر ارتباط میان حسگرها و کامپیوترها و عملگرها را مهیا ساخته که به موجب آن هوشمندسازی محیط اطراف در بسیاری از حوزه‌ها مانند حمل و نقل، خانه و ساختمان، کشاورزی، مراقبت‌های پزشکی و غیره محقق شده است [۱].

پروتکل‌های ارتباطی بی‌سیم نقش اصلی را در برقراری ارتباط و تبادل داده بین دستگاه‌ها ایفا می‌کنند، به طوری که اگر بخواهیم داده‌ای را از یک دستگاه به دستگاه دیگری ارسال کنیم بدون استفاده از پروتکلی مشابه میان آن دو امکان‌پذیر نخواهد بود. با شناخت مشخصات و ویژگی‌های پروتکل‌ها و فناوری‌های موجود، می‌توان با اطلاع کامل، فناوری و پروتکل مناسب و کارآمد را برای کاربرد مورد نظر انتخاب کرد.

مشخصه‌ها و پارامترهای متعددی برای بررسی و مقایسه پروتکل‌های لایه پیوند داده در اینترنت اشیا وجود دارند [۲، ۳]: برد محیطی، نرخ ارسال داده، مصرف انرژی، امنیت، فرکانس و مقیاس‌پذیری. در این مقاله قصد داریم که چنین پارامترهایی را برای هر یک از رایج‌ترین فناوری‌های بی‌سیم در حوزه اینترنت اشیا (مانند NB-IoT, LoRa WAN, Sigfox, Cellular Networks, WiMAX, Wi-Fi, Zigbee, RFID, Bluetooth, EnOcean, Z-Wave و NFC) استخراج کنیم. علاوه بر این، فناوری‌های مورد بررسی در این مقاله را از جنبه‌های مختلف مورد بحث و ارزیابی قرار داده و در نهایت، رایج‌ترین و مقبول‌ترین پروتکل و فناوری را برای چند کاربرد رایج اینترنت اشیا معرفی می‌کنیم.

1- Internet of Things (IoT)

ساختار مقاله در ادامه به صورت زیر ساماندهی شده است. در بخش دوم، فناوری‌های بی‌سیم رایج معرفی و توصیف می‌شوند. دسته‌بندی و مقایسه فناوری‌ها از جنبه‌های مختلف در بخش سوم ارائه شده است. بخش چهارم به چند کاربرد رایج اینترنت اشیا و انتخاب پروتکل‌های رایج برای هر کاربرد اختصاص داده شده است. در نهایت، در بخش پنجم، جمع‌بندی مقاله آمده است.

۲- معرفی فناوری‌های بی‌سیم

تاکنون پروتکل‌ها و فناوری‌های بی‌سیم متعددی جهت برقراری ارتباطات بین دستگاه‌های اینترنت اشیا معرفی شده است. در این بخش، به توصیف جامعی از رایج‌ترین آن‌ها خواهیم پرداخت.

۲-۱- NB-IoT

NB-IoT یک فناوری استاندارد رادیویی برای شبکه‌های گسترده کم توان^۲ است که برای ایجاد طیف گسترده‌ای از دستگاه‌ها و خدماتی که با استفاده از باندهای مخابراتی سلولی متصل می‌شوند، توسعه پیدا کرده است. این فناوری توسط پروژه مشارکت نسل سوم^۳ استانداردسازی شده است. NB-IoT به‌طور خاص روی پوشش داخلی، هزینه کم، طول عمر باتری طولانی و متصل کردن تعداد زیادی از دستگاه‌ها تمرکز می‌کند [۴، ۵].

استقرار NB-IoT در باندهای فرکانسی مانند ۷۰۰ مگاهرتز، ۸۰۰ مگاهرتز و ۹۰۰ مگاهرتز یک انتخاب عالی است زیرا تعداد زیادی از اپراتورها آن‌ها را انتخاب می‌کنند. این فناوری با بهره‌گیری از پهنای باند بسیار باریک ۲۰۰ کیلوهرتز (۱۸۰ کیلوهرتز به اضافه محافظ بین باند) می‌تواند نرخ انتقال ۲۵۰ کیلوبیت بر ثانیه را فراهم سازد. از دیگر ویژگی‌های این فناوری می‌توان به مقیاس‌پذیری بسیار بالای آن (پشتیبانی از حدود ۵۰ هزار دستگاه در هر سلول) و مصرف انرژی

2- NarrowBand IoT

3- Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)

4- The 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

برنامه (۳) کلید خاص دستگاه (EUI128) برای برقراری امنیت در سطح دستگاه.

۲-۳ شبکه‌های سلولی^۶

نیاز به ایجاد یک شبکه ارتباطات رادیویی متحرک که بتواند به نیازهای روزافزون مشترکان در دسترسی به خدمات مخابراتی در هر زمان و در هر مکان پاسخ دهد، موجب گردید که سازمان سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه^۷ یکی از متداول‌ترین استانداردهای تلفن‌های همراه در جهان، که به صورت فناوری دیجیتال سلولی برای انتقال صدا و داده‌های تلفن همراه استفاده می‌شود، به وجود آید. این استاندارد در اصل یک شبکه دیجیتال، مدار بسته بهینه‌سازی شده که برای ارتباطات دوطرفه تلفنی استفاده می‌شود را توصیف می‌کند. این استاندارد در طول زمان گسترش یافت تا شامل انتقال داده روی خط مدار بسته نیز شود [۱۱]. این فناوری دارای نسل‌های مختلفی است که در زیر به مشخصات و ویژگی‌های هر نسل پرداخته شده است.

1G: به نسل اول فناوری بی‌سیم سلولی اشاره دارد. استاندارد ارتباطات مخابراتی آنالوگ که در دهه ۱۹۸۰ معرفی شد و تا زمانی که توسط مخابرات دیجیتال 2G جایگزین شد، ادامه پیدا کرد. تفاوت اصلی بین دو سیستم تلفن همراه (1G و 2G) این است که سیگنال‌های رادیویی که توسط شبکه‌های 1G استفاده می‌شود از نوع آنالوگ هستند در حالی که شبکه‌های 2G دیجیتال هستند؛ اگرچه هر دو سیستم از سیگنال‌دهی دیجیتال برای اتصال به برج‌های رادیویی استفاده می‌کنند.

2G: نسل دوم فناوری بی‌سیم سلولی سه مزیت اصلی را نسبت به نسل پیشین خود فراهم می‌کند:

- مکالمات تلفنی دیجیتالی رمزگذاری می‌شوند.
- سیستم‌های 2G به طرز قابل توجهی کارآمدتر هستند به صورتی که اجازه می‌دهد سطوح نفوذ تلفن همراه به مراتب بیشتر باشد.

پایین آن (طول عمر باتری ۱۰ ساله برای دستگاه‌ها در شرایط عادی و متوسط) اشاره کرد [۶، ۷]. این فناوری با پشتیبانی از تمامی تجهیزات تلفن همراه اصلی، تولید کنندگان مجموعه تراشه^۵ و ماژول می‌تواند با شبکه‌های 2G، 3G و 4G همراه باشد. همچنین از تمامی ویژگی‌های امنیتی و حفظ حریم خصوصی شبکه‌های تلفن همراه مانند پشتیبانی از هویت کاربر، تأیید هویت سازمانی، محرمانه بودن، یکپارچگی داده‌ها و شناسایی تجهیزات تلفن همراه بهره‌مند می‌باشد.

۲-۲ LoRa WAN

LoRa WAN نیز استاندارد شبکه بی‌سیم از نوع شبکه‌های گسترده کم توان است که برای برقراری ارتباط اشیائی که از باتری استفاده می‌کنند و در مقیاس منطقه‌ای، ملی و جهانی (برد طولانی)، با نرخ انتقال داده پایین کار می‌کنند، ساخته شده است [۸]. این فناوری با استفاده از باند فرکانس رادیویی ۱۶۹ مگاهرتز، ۴۳۳ مگاهرتز (آسیا)، ۸۶۸ مگاهرتز (اروپا) و ۹۱۵ مگاهرتز (آمریکای شمالی) در سراسر جهان عرضه شده است. پهنای باند معمولی برای این فناوری مقادیر ۱۲۵، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز است که نرخ داده بین ۰٫۳ کیلوبیت بر ثانیه تا ۵۰ کیلوبیت بر ثانیه را در اختیار قرار می‌دهد و می‌توان به وسیله این پروتکل میلیون‌ها دستگاه را به هم وصل کرد [۹]. همچنین این پروتکل برد محیطی بسیار طولانی دارد؛ به طوری که در محیط‌های شهری برد آن به ۲ تا ۵ کیلومتر و در محیط‌های خارج از شهر برد آن به ۱۵ کیلومتر هم می‌رسد. مصرف انرژی LoRa WAN بسیار پایین است تا جایی که عملگرهای محیطی در حدود ۱۰ سال عمر باتری دارند [۱۰].

این پروتکل توسط چند لایه رمزگذاری امن شده است: (۱) کلید واحد شبکه (EUI64) برای حصول اطمینان از برقراری امنیت در سطح شبکه (۲) کلید واحد برنامه (EUI64) برای حصول اطمینان از برقراری امنیت در سطح

6- Cellular networks

7- Global System for Mobile Communications (GSM)

5- Chipset

2G: خدمات داده‌ها را برای تلفن همراه معرفی کرد. این فناوری شبکه‌های مختلف تلفن همراه را قادر می‌سازد تا خدماتی مانند پیام‌های متنی، پیام‌های تصویری و سرویس پیام‌های چندرسانه‌ای را ارائه دهند.

2.5G: سرویس بسته امواج رادیویی^۸ سرویس داده تلفن همراه بسته‌ای می‌باشد که بر روی سیستم‌های جهانی 2G و 3G شبکه‌های سلولی تلفن همراه فعال است. استفاده از این فناوری بر اساس داده منتقل شده است نه مدت زمان وصل بودن. فناوری 2G همراه با سرویس بسته امواج رادیویی گاهی اوقات به عنوان 2.5G نیز معرفی می‌شود.

2.75G: سرعت داده افزایش یافته برای تحول سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه^۹ به معنای نسل سریع‌تر از سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه در انتقال داده‌ها است. دستگاه‌های تلفن همراهی که از این استاندارد بهره می‌برند، می‌توانند با سرعت بالاتری نسبت به پیشینیان خود به دریافت و ارسال بسته‌های داده بپردازند. با این حال کارشناسان مخابراتی، این استاندارد را به عنوان نسل سوم نمی‌شناسند بلکه آن را به عنوان بهبودی در سرعت انتقال داده نسل دوم به رسمیت می‌شناسند. یکی از مزایای این شبکه، ارسال بسته‌های بزرگ اطلاعاتی در یک زمان کوتاه توسط دکل‌ها است. شبکه‌های سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه با معرفی کدگذاری PSK8 به شبکه‌های سرعت داده افزایش یافته برای تحول سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه تکامل یافتند. این فناوری توسط پروژه مشارکت نسل سوم به عنوان بخشی از خانواده سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه استاندارد شده است و حاصل آن ارتقاء سه برابری افزایش ظرفیت شبکه‌های نسل 2.5G است.

3G: نسل سوم فناوری ارتباطات بی‌سیم تلفن همراه است که تفاوت آن با نسل‌های پیشین، ارتقاء سطح سرعت انتقال داده برای تبادل فایل‌ها و اطلاعات چندرسانه‌ای

می‌باشد. از مزیت‌های این نسل می‌توان به کیفیت بالای صدا، دسترسی به اینترنت تلفن همراه، انتقال داده با سرعت بالا، انتقال فایل‌های چندرسانه‌ای و تماس‌های ویدئویی اشاره کرد.

یکی از استانداردهای به کار رفته در نسل سوم تلفن‌های همراه سرویس جهانی مخابرات تلفن همراه^{۱۰} است. این سامانه در سال ۲۰۰۱ توسط پروژه مشارکت نسل سوم استاندارد و ارائه شده است. این سامانه با استفاده از فناوری دسترسی رادیویی چندگانه از کد پهنای باند برای ارائه بازده طیفی و پهنای باند بیشتر به تلفن همراه استفاده می‌کند.

4G: نسل چهارم از فناوری شبکه‌های تلفن همراه پهن‌بند است که به دنبال 3G آمد. در این نسخه سرعت انتقال داده تا سطح قابل چشم‌گیری ارتقا یافت که می‌توان از آن برای دسترسی به اینترنت با سرعت بالا، مکالمه اینترنتی، بازی‌های برخط، نمایش ویدئو به صورت برخط (تلویزیون) و ویدئو کنفرانس اشاره کرد.

تکامل بلند مدت^{۱۱} یک استاندارد برای ارتباطات بی‌سیم با سرعت بالا برای دستگاه‌های تلفن همراه و پایانه‌های داده است که ظرفیت و سرعت را با استفاده از یک رابط رادیویی متفاوت، همراه با پیشرفت‌های اصلی شبکه افزایش می‌دهد. این استاندارد نیز توسط پروژه مشارکت نسل سوم توسعه یافته است.

5G: شبکه‌های نسل پنجم سیستم‌های بی‌سیم ویژگی‌هایی مانند ظرفیت بالاتر نسبت به 4G قابلیت پذیرش ظرفیت بیشتر تعداد کاربران متقاضی، پهنای باند بالا، پشتیبانی از برقراری ارتباط دستگاه به دستگاه، قابلیت اعتماد و امنیت بالاتری را ارائه می‌دهد. یکی دیگر از اهداف عملیاتی 5G، بهبود پشتیبانی از ارتباطات ماشین به ماشین با هزینه کمتر، مصرف باتری کمتر و تأخیر پایین‌تر از نسل چهارم می‌باشد. در حال حاضر هیچ استاندارد برای استقرار 5G وجود ندارد [۱۲]. نسل‌های مختلف شبکه‌های

10- Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS)

11- Long-Term Evolution (LTE)

8- General Packet Radio Service (GPRS)

9- Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)

جدول ۱: فرکانس و نرخ داده نسل‌های مختلف شبکه‌های سلولی

نرخ داده	فرکانس	نسل
2kbps	800 MHz	1G
6.4 to 14.4 kbps	900 MHz /1800MHz	2G
384kbps to 3.1 Mbps (21.6 Mbps for HSPA+)	1.8 - 2.1 GHz	3G
100 Mbps to 1 Gbps	2 – 8 GHz	4G
More than 1Gbps	above 6 GHz	5G

سلولی دارای فرکانس و نرخ داده مختلفی هستند. ما این اطلاعات را به صورت یکجا در جدول (۱) آورده‌ایم.

امنیت: شبکه‌های سلولی یکی از امن‌ترین راه‌های ارتباطات نوع سلولی است که امروزه در دسترس است و روش‌های امنیتی خود را استاندارد کرده است. سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه با حفظ محرمانه بودن تماس‌ها و ناشناس بودن مشترک، امنیت پایدار را حفظ می‌کند. شماره شناسایی موقت به مشترکان اختصاص داده می‌شود تا حریم خصوصی کاربر حفظ شود. حریم خصوصی ارتباط با استفاده از الگوریتم‌های رمزنگاری و پرش از فرکانس حفظ می‌شود که می‌تواند با استفاده از سیستم‌های دیجیتالی و سیگنالینگ فعال شود.

مصرف انرژی: گوشی‌های هوشمند در حال رشد نیستند، بلکه برنامه‌های کاربردی را که به صورت چشم‌گیری در حال رشد هستند باید پشتیبانی کنند. افزایش توان انتقال داده توسط تلفن همراه یکی از ملاک‌های خیلی مهم برای کاربر تلفن‌های همراه و شرکت‌های سازنده برنامه‌ها است. این روند عمیقاً باتری‌های تلفن همراه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با حرکت از ۲G به ۴G، دیگر تلفن همراهی وجود ندارد که بتواند بدون شارژ شدن تا سه روز دوام بیاورد، حتی اگر اندازه باتری‌ها در همان زمان به اندازه دستگاه افزایش یافته باشند.

۲-۴ - Sigfox

Sigfox یک پروتکل ارتباطی بی‌سیم از نوع شبکه‌های گسترده کم‌توان است که توسط یک شرکت فرانسوی،

که در سال ۲۰۰۹ تاسیس گردید، معرفی شده است. این پروتکل بیشتر برای اتصال اشیاء کم انرژی مانند کنتور برق، ساعت‌های هوشمند و ماشین لباسشویی کاربرد دارد.

Sigfox یک فناوری با باند باریک است و در گروه‌های رادیویی بدون مجوز^{۱۲} عمل می‌کند. این پروتکل از نظر سازگاری، شباهت زیادی با شبکه‌های سلولی دارد با این تفاوت که تنها می‌تواند مقادیر کمی از داده‌ها را ارسال و دریافت کند. Sigfox یک راه حل ارتباطی مبتنی بر نرم‌افزار ارائه می‌دهد که در آن تمام پیچیدگی‌های متوالی و محاسباتی در ابر، به جای دستگاه‌ها، مدیریت می‌شود. فرکانس دقیق این فناوری می‌تواند بر اساس قوانین ملی متفاوت باشد، اما در اروپا باند ۸۶۸ مگاهرتز به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و در ایالات متحده ۹۱۵ مگاهرتز است و همچنین پهنای باندی برابر ۲۰۰ کیلوهرتز دارد. تراکم سلول‌ها در شبکه Sigfox بر اساس محدوده متوسط حدود ۳۰-۵۰ کیلومتر در مناطق روستایی است و در مناطق شهری، به دلیل وجود موانع، محدوده ممکن است به ۳ تا ۱۰ کیلومتر کاهش یابد. همچنین توسط Sigfox هر شیء در روز می‌تواند حداکثر ۱۴۰ پیام، با اندازه هر پیام^{۱۳} بایت در نرخ داده‌ای ۱۰۰ بیت در ثانیه منتقل کند [۱۳، ۱۴].

۲-۵ - WiMAX

WiMAX رویکردی همگانی برای دسترسی به امواج مایکروویو در سطح جهانی است. WiMAX پروتکل ارتباطی بی‌سیم از نوع شبکه‌های ناحیه شهری است که طبق استاندارد IEEE 802.16 ساخته شد. هدف از ساخت این پروتکل ایجاد یک فناوری بی‌سیم مبتنی بر استاندارد است که ارتباطات پهنای باند بالا را از راه دور و به عنوان جایگزینی برای کابل توصیف می‌کند.

در WiMAX شعاع تحت پوشش هر دکل حداکثر ۵۰ کیلومتر (۳۰ مایل) برای ایستگاه‌های ثابت و ۵ تا ۱۵

12- Industrial, Scientific and Medical (ISM)

13- Worldwide Interoperability for Microwave Access

جدول ۲: ویژگی‌های RFID برای طیف‌های فرکانسی مختلف

محدوده فرکانسی	فرکانس	نرخ داده	برد محیطی
LF	120-140 KHz	پایین	10 cm
HF	13.56 MHz	متوسط به پایین	10 cm – 1 m
UHF	433 MHz	متوسط	1 – 100 m
UHF (US&EU)	865 – 868 MHz (EU) 902 – 928 MHz (US)	متوسط به بالا	1 – 12 m
Microwave	2450 - 5800 MHz	بالا	1 – 2 m
UWB	3.1 – 10.6 GHz	بالا	Up to 200 m

است. برد محیطی این پروتکل بین ۱۰ تا ۱۰۰ متر است. همچنین این پروتکل می‌تواند بیش از ۶۴۰۰۰ دستگاه را از طریق شبکه به هم متصل کند. در ZigBee امکاناتی از جمله کلیدها و چارچوب‌های رمزنگاری فراهم شده که امنیت ارتباطات را تضمین می‌کند. ZigBee از کلیدهای ۱۲۸ بیتی برای امنیت خود استفاده می‌کند. یکی از ملاک‌های اصلی در طراحی ZigBee مصرف کم انرژی و طول عمر زیاد باتری است. در این پروتکل، دستگاه‌ها بیشتر وقت خود را در حالت صرفه جویی در انرژی (حالت خواب) به سر می‌برند.

۲-۷- RFID

سامانه شناسایی امواج رادیویی^{۱۷} پروتکل ارتباطی بی‌سیم از نوع شبکه‌های شخصی توسط ماریو کاردولو^{۱۸} ساخته شد. این فناوری قادر به برقراری ارتباط و تبادل داده‌ها به وسیله یک برچسب به عنوان فرستنده و ذخیره کننده اطلاعات و یک بازخوان به عنوان دریافت‌کننده اطلاعات به صورت بی‌سیم است [۱۷]. ویژگی‌های فناوری مذکور برای طیف‌های فرکانسی مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

برچسب‌های RFID می‌توانند منفعل، فعال یا ترکیبی باشند. یک برچسب فعال دارای یک باتری است و به صورت دوره‌ای سیگنال ID خود را به بازخوان انتقال

17- Radio Frequency Identification (RFID)
18- Mario Cardullo

کیلومتر (۳ تا ۱۰ مایل) برای ایستگاه‌های سیار است. در این استاندارد، نرخ ارسال داده حدود ۷۰ مگابیت بر ثانیه است. البته این سرعت به صورت میانگین است و بدیهی است که هرچه پارامترهای انتقال و کیفیت افزایش پیدا کنند، سرعت شبکه نیز افزایش پیدا خواهد کرد [۱۵].

امنیت: شبکه‌های WiMAX برای برقراری امنیت از روش پنهان‌سازی و مدیریت کلید خصوصی^{۱۴} استفاده می‌کنند. از این روش برای ارتباط بین ایستگاه پایه^{۱۵} و ایستگاه مشترک^{۱۶} استفاده می‌شود تا بتوان علاوه بر پنهان‌سازی اطلاعات، مانع از سرقت خدمات موجود در شبکه شد. به عبارت دیگر، این نوع امنیت برای شبکه‌های WiMAX، محرمانه بودن اطلاعات و محیط شبکه را به ارمغان می‌آورد.

مصرف انرژی: سیستم مدیریت انرژی WiMAX از سه حالت عادی، آماده به کار و حالت خواب پشتیبانی می‌کند. تعریف دو حالت آماده به کار و حالت خواب از مصرف بیهوده انرژی (باتری) جلوگیری می‌کند.

۲-۶- ZigBee

ZigBee یک استاندارد شبکه ارتباطی بی‌سیم و هوشمند از نوع شبکه‌های شخصی می‌باشد. فناوری ZigBee بر پایه استاندارد IEEE 802.15.4 برای شبکه‌های بی‌سیم با نرخ ارسال داده پایین طراحی شده است. علت پایین بودن نرخ داده را می‌توان هدف از طراحی این فناوری دانست که به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی بوده و برای ایجاد شبکه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که به انتقال داده‌های کم، بهره‌وری انرژی و شبکه‌ای ایمن نیاز دارند [۱۶]. هدف از ساخت و طراحی پروتکل ZigBee، ساده، ارزان، مطمئن و کم مصرف بودن و پوشش دستگاه‌های بیشتر نسبت به بقیه پروتکل‌های هم نوع می‌باشد.

پروتکل ZigBee بر اساس دستگاه‌های بی‌سیم در باند فرکانس ۸۶۸ مگاهرتز، ۹۱۵ مگاهرتز و ۲،۴ گیگاهرتز عمل می‌کند. بیشترین نرخ انتقال داده ۲۵۰ کیلوبیت بر ثانیه

14- Private Key Management
15- Base Station
16- Subscriber station

می‌دهد. یک باتری غیرفعال دارای یک باتری کوچک است که در حضور بازخوان RFID فعال می‌شود. برچسب منفعل ارزان‌تر و کوچک‌تر است زیرا باتری ندارد؛ در عوض برچسب از انرژی رادیویی که توسط خواننده منتقل می‌شود استفاده می‌کند. با این حال، برای استفاده از یک برچسب منفعل، باید با سطح قدرت تقریباً هزار بار قوی‌تر روشن شود.

کاربرد: برچسب RFID می‌تواند به یک شیء وصل شده و برای ردیابی و مدیریت موجودی‌ها، اشیاء، افراد و غیره استفاده شود. برای مثال، آن را می‌توان به اتومبیل، تجهیزات کامپیوتری، کتاب‌ها، تلفن‌های همراه و غیره اعمال کرد.

امنیت: استفاده از برچسب‌های RFID به دلیل داشتن ضعف‌های امنیتی آسیب پذیرند. لو رفتن اطلاعات تنظیم شده در برچسب‌ها و برچسب‌خوان‌های RFID ممکن است منجر به بروز وضعیت‌های نامطلوبی شود. یکی از این مخاطرات، گردآوری اطلاعات به‌طور غیرمجاز است که در آن حمله‌کننده اطلاعات را به صورت غیرقانونی و به شکل فعال یعنی انتشار درخواست اطلاعات و یا به صورت غیر فعال یعنی شنود ارتباط برقرار شده بین برچسب و برچسب‌خوان به‌دست می‌آورد. انواع دیگر حمله شامل رهگیری اشیاء و افراد به وسیله ایجاد ارتباط بین برچسب‌خوان‌های RFID مختلف و برچسبی خاص و تحلیل ترافیک برچسب RFID است. این ضعف‌ها باعث عدم رشد این فناوری در حوزه‌هایی مثل تجارت الکترونیکی شده است [۱۸].

۲-۸- Wi-Fi^{۱۹}

Wi-Fi یک استاندارد شبکه ارتباطی بی‌سیم و هوشمند از نوع شبکه‌های شخصی می‌باشد که توسط اتحادیه Wi-Fi Alliance تحت استاندارد IEEE 802.11 به عنوان یک علامت تجاری به ثبت رسیده است. هدف از ساخت چنین وسیله‌ای برقراری ارتباط دستگاه به صورت بی‌سیم

به شبکه جهانی اینترنت است. با استفاده از این فناوری به عنوان نقطه اتصال بی‌سیم، وسایل خانه می‌توانند به شبکه جهانی اینترنت وصل شده و از آن استفاده کنند. به همین دلیل توسط بسیاری از دستگاه‌ها و برنامه‌ها از جمله پیشانه‌های بازی، شبکه‌های خانگی، تلفن‌های همراه، سیستم‌های عامل و سایر لوازم الکترونیکی پشتیبانی می‌شود.

امنیت: امنیت در شبکه‌های بی‌سیم از شبکه‌های سیمی کم‌تر است. یک اقدام معمولی برای جلوگیری از استفاده کاربران غیرمجاز پنهان کردن نام نقطه دسترسی و غیرفعال کردن پخش SSID است. این روش برای ورود کاربر معمولی موثر است و به عنوان یک روش امنیتی بی‌فایده است. یک روش دیگر این است که تنها دستگاه‌های با نشانی‌های MAC شناخته شده اجازه دسترسی و پیوستن به شبکه را داشته باشند. البته این روش با درست کردن یک نشانی دروغین نیز از بین می‌رود.

رمزگذاری WEP^{۲۰} دیگر امن نیست. ابزارهایی مانند Air Snort یا Air crack-ng می‌توانند به سرعت کلیدهای رمزگذاری WEP را بازیابی کنند. به دلیل ضعف امنیتی WEP، رمزگذاری WPA^{۲۱} معرفی شد. WPA به‌طور خاص برای کار با تجهیزات قدیمی‌تر از طریق ارتقاء سیستم عامل طراحی شده است. اگر چه WPA امن‌تر از WEP است، اما این پروتکل هم آسیب‌پذیر شناخته شده است. امن‌تر از WPA رمزگذاری WPA2 می‌باشد. با استفاده از استاندارد رمزگذاری پیشرفته در سال ۲۰۰۴ معرفی شد و توسط اکثر دستگاه‌های Wi-Fi جدید پشتیبانی می‌شود. WPA2 به‌طور کامل با WPA سازگار است. در سال ۲۰۱۷، یک نقص در پروتکل WPA2 کشف شد که باعث حمله کلیدی باز شناخته شده KRACK گردید. نقص در ویژگی اضافه شده به Wi-Fi در سال ۲۰۰۷، به نام WPS^{۲۲}، اجازه می‌دهد تا امنیت WPA و WPA2 را دور بزنیم. تنها درمان در اواخر

20- Wired Equivalent Privacy
21- Wi-Fi Protected Access
22- Wi-Fi Protected Setup

19- Wireless Fidelity

جدول ۳: استانداردها و ویژگی‌های نسخه‌های مختلف Wi-Fi

پروتکل	بیشترین نرخ داده	معماری کانال	پهنای باند کانال (MHz)	فرکانس (GHz)	بیشترین برد محیطی (m)
802.11 legacy	2 Mbps	DSSS, FHSS	20	2.4	100
802.11a	54 Mbps	OFDM	21	3.7/5	120/5000
802.11b	11 Mbps	CCK, DSSS	22	2.4	140
802.11g	54 Mbps	DSSS, OFDM	23	2.4	140
802.11n	600 Mbps	Multi User (MU-MIMO) OFDM	24-40	5 / 2.4	250
802.11ac Wave1	866.7 Mbps	Single User (SU-MIMO) OFDM	80	5	305
802.11ac wavw2	3.47 Gbps	Single User (SU-MIMO) OFDM	20-40-80-160	5	10
802.11ad	6.757 Gbps	SC, OFDM	GHz 2.16	60	10
802.11af	26.7- 568.9 Mbps	SC, OFDM	8 6-7-	0.54 - 0.79	1000
802.11ah	0.347 Gbps	MIMO-OFDM, SC	1-2-4-8-16	0.9	1000
802.11ax	10.53 Gbps	MIMO-OFDM, SC	20-40-80-160	2.4/5	305
802.11ay	100 Gbps	N/A	N/A	60	300/500
802.11az	N/A	N/A	N/A	60	1

Z-Wave ساخته شده و در اصل هدف از ساخت این پروتکل، هوشمندسازی خودکارسازی خانگی و ایجاد برقراری ارتباط میان وسایل و اشیاء خانه برای کنترل راحت‌تر از داخل خانه یا بیرون خانه می‌باشد [۲۰].

دستگاه‌های Z-Wave می‌توانند به‌طور مستقیم تا ۳۶ متر به صورت نقطه به نقطه با هم ارتباط برقرار کنند. هر شبکه Z-Wave می‌تواند از ۲۳۲ دستگاه Z-Wave پشتیبانی کند که به شما امکان انعطاف‌پذیری برای اضافه کردن تعداد زیادی دستگاه را می‌دهد. Z-Wave در سه نوع با نرخ داده‌های متفاوت ۹,۶ kbit/s و ۴۰ kbit/s و ۱۰۰ kbit/s در سراسر جهان عرضه شده است [۲۰, ۲۱].

۲-۱-۱۰ Bluetooth

بلوتوث استاندارد فناوری بی‌سیم از نوع شبکه‌های شخصی برای ارسال تبادل اطلاعات در فواصل کوتاه بر اساس سیستم امواج رادیویی است که بر پایه استاندارد IEEE 802.15.1 توسط شرکت اریکسون ساخته شده و عهده‌دار توسعه استانداردهای بلوتوث تیم Bluetooth SIG می‌باشد. هدف از ساخت این پروتکل برقراری ارتباط بدون

سال ۲۰۱۱ این بود که WPS را خاموش کنید که همیشه امکان پذیر نیست.

پژوهشگران دانشگاه واشنگتن با بازطراحی عملکرد سیگنال‌های رادیویی، روشی را یافتند که در آن اتصال به وای‌فای حتی انرژی کمتر از اتصال بلوتوث را لازم دارد. این فناوری Wi-Fi منفعل نام دارد که مصرف انرژی در آن ۱۰۰۰ بار کمتر از اتصالات معمولی مانند بلوتوث کم مصرف و ZigBee است و حتی در یک عملکرد بهینه تا ۱۰,۰۰۰ بار نیز می‌تواند کاهش مصرف انرژی داشته باشد. در این روش با جداسازی دو قسمت دیجیتال و آنالوگ در اتصالات رادیویی موفق به این فناوری شدند [۱۹].

استانداردها و ویژگی‌های نسخه‌های مختلف Wi-Fi را می‌توان در جدول ۳ مشاهده کرد.

۲-۹-۲ Z-Wave

Z-Wave یک پروتکل ارتباطی بی‌سیم از نوع شبکه‌های شخصی است که توسط شرکت Zen-Sys و اتحادیه

جدول ۴: مشخصه‌های BLE, Bluetooth 5, Bluetooth 4.2

مشخصات	Bluetooth 4.2	Bluetooth 5	Bluetooth Low Energy (BLE)
فرکانس (مگاهرتز)	2.4 to 2.485	2.4 to 2.485	2.4 to 2.485
نرخ داده (مگابیت بر ثانیه)	1.24	2.48	1.24
برد محیطی (متر)	100	400	100
مصرف انرژی	زیاد	کم	خیلی کم

دستگاه‌های NFC از دو حالت ارتباطی پشتیبانی می‌کنند: (۱) **فعال**: در این حالت، فرستنده و دستگاه‌های خواننده (گیرنده) دارای منبع تغذیه هستند و می‌توانند با انتقال سیگنال متناوب با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.

(۲) **منفعل**: در این حالت، دستگاه خواننده (گیرنده) سیگنال‌های رادیویی را تولید می‌کند و دستگاه فرستنده با این میدان الکترومغناطیسی کار می‌کند. فرستنده با استفاده از منبع تغذیه دستگاه خواننده نیروی مورد نیاز خود را تامین می‌کند.

۳- بحث و مقایسه پروتکل‌ها

در اینترنت اشیاء برای انتخاب یک پروتکل مناسب برای برقراری ارتباط میان دو شیء جهت تبادل داده و اطلاعات پارامترهای زیادی وجود دارد. ما در این مقاله سعی بر این داشته‌ایم که مهم‌ترین شاخص‌های انتخاب یک پروتکل جهت رفع نیاز و کاربرد مورد نظر را بررسی کنیم. از مهم‌ترین مشخصه‌های یک پروتکل می‌توان به برد محیطی، نرخ داده، نوع پروتکل، مقیاس پذیری، میزان مصرف انرژی و امنیت اشاره کرد [۲].

۳-۱- برد محیطی

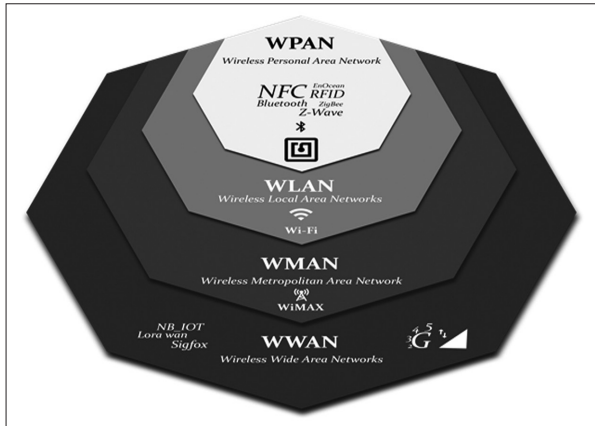
در انتقال ارتباطات بی‌سیم مهم‌ترین مسئله فاصله میان دو دستگاه یا دو شیء و برقراری شبکه می‌باشد. این ارتباط می‌تواند هر چیزی را از تعداد انگشت شماری از دستگاه‌ها در یک اتاق تا میلیون‌ها دستگاه در سراسر جهان در برگیرد. دو شیء امکان دارد در هر فاصله‌ای نسبت به یکدیگر قرار گیرند و به تبادل داده به صورت بی‌سیم نیاز داشته باشند. برای برقرار کردن شبکه میان

سیم، کم مصرف و کم هزینه میان تلفن‌های همراه بود [۲۳، ۲۴]. فناوری بلوتوث دارای نسخه‌های مختلف است که مشخصات و ویژگی‌های هر یک در جدول ۴ آمده است.

۲-۱۱- NFC

NFC پروتکل ارتباطی بی‌سیم از نوع شبکه‌های شخصی بی‌سیم است. استانداردهای NFC شامل پروتکل‌های ارتباطی و قالب‌های مبادله داده‌ها هستند که بر اساس استانداردهای RFID موجود شامل ISO/IEC 14443 و استانداردهای ISO/IEC 18092 و آن‌هایی که توسط انجمن NFC تعریف شده‌اند، می‌باشد. هدف از ساخت این پروتکل برقراری ارتباط نزدیک میان دو دستگاه می‌باشد که یکی از آن‌ها معمولاً یک دستگاه قابل حمل می‌باشد مانند گوشی، کارت‌های شناسایی هوشمند، کارت‌های بانکی، برچسب‌ها، بلیط‌های مترو و غیره که با برد تقریبی ۴ تا ۱۰ سانتی‌متر به هم وصل می‌شوند و تبادل داده انجام می‌دهند. فناوری NFC اجازه می‌دهد تا یک دستگاه که به عنوان خواننده یا دستگاه فعال شناخته می‌شود، برای ایجاد جریان فرکانس رادیویی با یک دستگاه سازگار با NFC یا یک برچسب کوچک NFC حاوی اطلاعاتی که خواننده می‌خواهد ارتباط برقرار کند. دستگاه‌های منفعل مانند برچسب NFC اطلاعات را ذخیره کرده و با خواننده ارتباط برقرار می‌کنند. اما دستگاه‌های دیگر را نمی‌خوانند. ارتباط NFC از طریق دو دستگاه فعال نیز امکان پذیر است [۲۵].

دستگاه‌های NFC در فرکانس ۱۳,۵۶ مگاهرتز، سرعت ۱۰۶ کیلوبیت در ثانیه تا ۴۲۴ کیلوبیت در ثانیه را در فاصله کمتر از ۱۰ سانتی‌متر فراهم می‌کنند [۲۶].



شکل ۱: دسته‌بندی انواع پروتکل‌ها و فناوری‌ها بر اساس پارامتر برد محیطی

و تلفن‌های همراه هوشمند و تبلت‌ها و یا وسایل و کامپیوترهای نزدیک فرد.

دسته‌بندی پروتکل‌ها و فناوری‌های مورد مطالعه در این مقاله را می‌توان به صورت منسجم و یکجا در شکل ۱ مشاهده کرد.

۳-۲- نرخ داده

در شبکه‌های کامپیوتری و ارتباطات مخابراتی، نرخ داده به میزان داده‌ای (بر حسب بیت) که در واحد ثانیه منتقل می‌شود و یا سرعت انتقال داده بر حسب بیت گفته می‌شود که آن را با علامت اختصاری bps نشان می‌دهند. هر پروتکل بر اساس استاندارد تعریف شده نرخ داده‌های خاص خود را دارد. پروتکل‌های بی‌سیم نرخ داده‌های متفاوتی دارند. در اینترنت اشیاء بسته به نوع ارتباط، میزان نرخ داده انتقالی و شیوه انتقال آن، پروتکل مورد نظر را برای شیء مورد نظر انتخاب می‌کنند.

معمولاً حجم داده‌های ارسالی در اینترنت اشیاء پایین بوده و مسئله مهم دیگر در تعیین نرخ داده‌ها برای پروتکل‌ها مصرف انرژی است. طبق بررسی‌ها و مقایسه‌های صورت گرفته این نتیجه حاصل شد که نرخ داده و مصرف انرژی با هم نسبت مستقیم دارند و با توجه به این‌که مصرف انرژی یک معیار مهم بوده به همین دلیل در پروتکل‌های جدید شاهد نرخ انتقال داده پایین هستیم. برای آن‌که دید خوبی نسبت به کارکرد یک فناوری داشته باشیم، معمولاً

دو شیء به استانداردهای (پروتکل‌های) مشابه نیاز داریم. پروتکل‌های ارتباطی بی‌سیم بر اساس برد محیطی که دارند به چهار دسته اصلی تقسیم شده‌اند:

۱) شبکه‌های گسترده^{۲۴}

همان‌طور که از اسم آن مشخص است، به برقراری ارتباط و شبکه در یک منطقه و ناحیه جغرافیایی وسیع مانند ارتباطات میان یک کشور، یک قاره و یا کل جهان اشاره می‌کند که میلیون‌ها شیء و وسیله را به هم متصل می‌کند. این نوع شبکه می‌تواند چندین شبکه کوچک‌تر مانند شبکه‌های محلی و شهری داشته باشد. شبکه جهانی اینترنت یک شبکه از نوع گسترده می‌باشد.

۲) شبکه‌های شهری^{۲۵}

شبکه شهری از شبکه‌های نوع گسترده ضعیف‌تر بوده و برای برقراری رابطه و شبکه در سطح یک شهر به کار می‌رود و توانایی پوشش یک شهر را دارد. شبکه‌های تلویزیونی کابلی و اینترنت پرسرعت بی‌سیم از این نوع شبکه به شمار می‌روند.

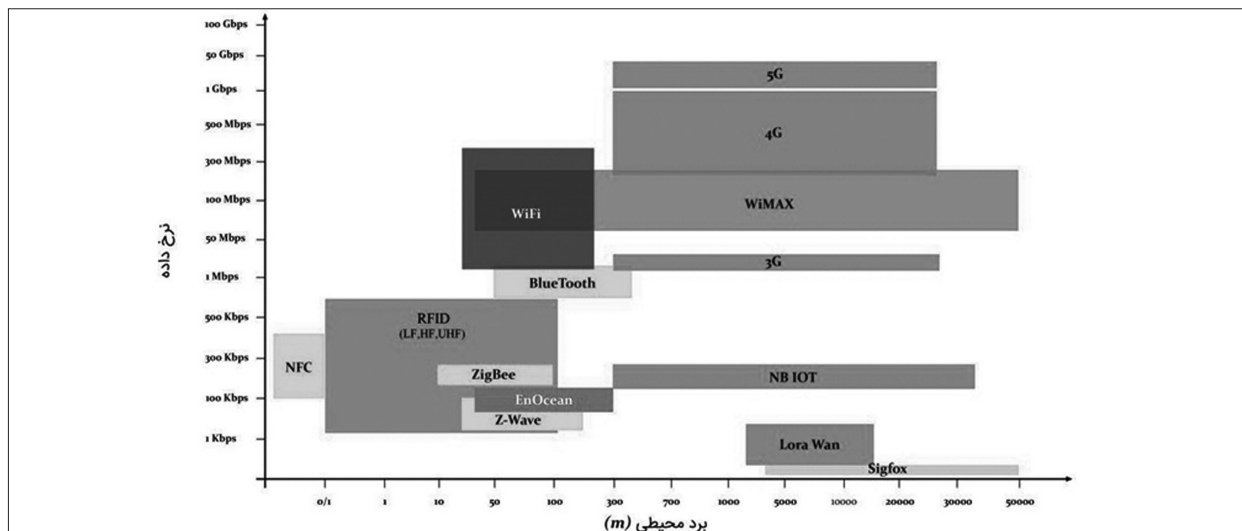
۳) شبکه‌های محلی^{۲۶}

شبکه محلی محدوده کوچک‌تری را تحت پوشش قرار می‌دهد. برقراری یک شبکه میان بخش‌های چند ساختمان یا چند خانه را می‌توان توسط این نوع شبکه برقرار ساخت. در این نوع شبکه سرعت انتقال داده نسبت به شبکه‌های نوع گسترده و شهری بیشتر بوده و نیاز به استفاده از خطوط مخابراتی نیست. برای مثال، از این نوع شبکه برای برقراری ارتباط میان بخش‌های یک کارخانه یا یک دانشگاه استفاده می‌شود.

۴) شبکه‌های شخصی^{۲۷}

این نوع شبکه‌ها برای برقراری ارتباط میان وسایل شخصی که متعلق به یک نفر می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال برقراری ارتباط میان کامپیوتر

24- Wide Area Network (WAN)
25- Metropolitan-Area Network (MAN)
26- Local-Area Network (LAN)
27- Personal Area Network (PAN)



شکل ۲: دسته‌بندی پروتکل‌ها بر اساس پارامترهای نرخ داده و برد محیطی

در یک محیط که جهت هوشمندسازی به کار می‌بریم، انرژی مورد نیاز خود را به صورت غیرمستقیم و از باتری تامین می‌کنند. در نتیجه استفاده از پروتکل‌هایی که از لحاظ مصرف انرژی بهینه‌سازی شده‌اند و باعث افزایش طول عمر باتری می‌شوند، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. از جمله اقداماتی که در اکثر پروتکل‌های ارتباطی بی‌سیم به کار رفته، سازوکاری تحت عنوان حالت خواب است. در این حالت زمانی که از پروتکل استفاده نمی‌شود پروتکل مصرف انرژی خود را به حداقل می‌رساند [۲، ۲۷]. بیشتر پروتکل‌ها و فناوری‌هایی که اخیراً برای حوزه اینترنت اشیا معرفی شده‌اند از مصرف انرژی پایین یا گاه بسیار پایینی برخوردار هستند. از جمله این پروتکل‌ها می‌توان به NB-IoT، LoRa، Sigfox، ZigBee و بلوتوث کم انرژی اشاره کرد.

۳-۵- امنیت

از دیرباز تا امروز امنیت همواره یکی از مقوله‌های مهم شبکه‌های کامپیوتری بوده و خواهد بود. اما، در اینترنت اشیا این زمینه از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است. تا جایی که اگر امنیت در اینترنت اشیا به خطر بیفتد می‌توان ادعا کرد که اینترنت اشیا در دنیای امروز جایی نخواهد داشت. پروتکل‌ها و فناوری‌های بی‌سیم قبل از وارد شدن به بازار باید بتوانند به بهترین نحو خدمات امنیتی مانند

نرخ داده آن را در کنار برد محیطی‌اش می‌آورند. ما این کار را برای پروتکل‌های رایج اینترنت اشیا در شکل (۲) به نمایش گذاشته‌ایم.

۳-۳- مقیاس‌پذیری

با توجه به روند روبه‌رشد تعداد دستگاه‌ها و اشیا اطراف از لحاظ قابلیت پیوستن به شبکه و اینترنت اشیا، مسئله مقیاس‌پذیری از معیارهای مهم در انتخاب یک پروتکل تلقی می‌شود. مقیاس‌پذیری به تعداد دستگاه‌ها یا شیء‌هایی که می‌توانند به یک پروتکل وصل شوند و بین آن‌ها شبکه برقرار کرد، گفته می‌شود. بستگی به محیط و کاربرد، تعداد وسیله‌هایی که می‌توانیم توسط یک پروتکل شبکه کنیم، متفاوت است. پروتکل‌های نوع شبکه گسترده و شبکه شهری مقیاس‌پذیری بالایی دارند زیرا تعداد اشیائی که در یک محیط جغرافیایی بزرگتر وجود دارد بیشتر است و نیاز به مقیاس‌پذیری بیشتری برای شبکه داریم. اما در پروتکل‌های نوع محلی و شخصی به دلیل محلی بودن و کاهش برد محیطی و شخصی بودن ارتباطات میزان مقیاس‌پذیری به نسبت زیادی کاهش می‌یابد.

۳-۴- مصرف انرژی

بسیاری از اشیا اطراف ما که به صورت روزمره با آن‌ها سر و کار داریم و هم چنین حسگرهای مورد استفاده

محرمانگی، صحت پیام، احراز هویت و امنیت فیزیکی را در اختیار کاربران قرار دهند تا بتوان از آن‌ها در دنیای واقعی استفاده کرد. تاکنون کارهای زیادی در حوزه امنیت اینترنت اشیا صورت گرفته است اما همچنان این مقوله نیاز به بررسی‌های بیشتر و ارائه الگوریتم‌ها و سازوکارهای امنیتی قوی‌تری دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌های امنیتی در اینترنت اشیا این است که سازوکارها و پروتکل‌های امنیتی باید قابلیت اجرایی و عملیاتی شدن روی دستگاه‌های با منابع محدود داشته باشند. برای مطالعه عمیق‌تر در حوزه امنیت اینترنت اشیا، خواننده علاقمند می‌تواند به [۲۸، ۲۹] مراجعه نماید.

خلاصه‌ای از مشخصات و ویژگی‌های کلیدی هر یک از پروتکل‌ها و فناوری‌های مورد مطالعه در جدول ۵ جمع‌آوری شده است. همان‌طور که از جدول برمی‌آید، چنانچه نیاز به برد محیطی بالا و نرخ انتقال پایین باشد Sigfox و NB-IoT، LoRa بهترین گزینه به شمار می‌روند. اما برای کاربردهایی که نیاز به حجم ارسال زیاد با برد محیطی بالا دارند، شبکه‌های سلولی (نسل ۳، ۴ و ۵) و وایکس بهترین انتخاب خواهند بود. برای کاربردهای با نرخ داده بالا و با برد نسبتاً کوتاه، WiFi و بلوتوث گزینه‌های پیش‌رو هستند. البته اگر نرخ ارسال بسیار بالا مدنظر باشد، فناوری بلوتوث پاسخگویی خوبی نخواهد بود. برعکس، اگر نیاز به نرخ ارسال متوسط باشد، به دلیل مصرف انرژی پایین، بلوتوث گزینه بهتری است. برای کاربردهای با برد کوتاه و نرخ ارسال پایین، ZigBee، EnOcean، Z-Wave و RFID انتخاب‌های مطلوبی هستند. اگر برد محیطی بسیار پایین مدنظر باشد، NFC و نسخه‌های با فرکانس پایین RFID انتخاب‌های ما خواهند بود.

۴- کاربردهای اینترنت اشیا

در ادامه چند نمونه از پرکاربردترین حوزه‌هایی که اینترنت اشیا در آن‌ها به کار رفته است را بررسی کرده‌ایم [۱، ۳۰-۳۳]. برای هر کاربرد، پروتکل‌ها یا فناوری‌های

رایج استفاده شده در آن ذکر شده است.

خانه هوشمند: خانه‌ای که وسایل هوشمند به وسیله پروتکل‌ها به یکدیگر متصل شده و کاربر از طریق اینترنت اشیا تجهیزات مکانیکی، الکتریکی و مدیریت انرژی داخل ساختمان را از راه دور یا داخل ساختمان کنترل کرده و بر آن‌ها نظارت داشته و یا خود شیء توسط اطلاعات دریافتی از محیط به صورت هوشمند اقدامات از قبل تعریف شده را در محیط خانه انجام دهد. بیشترین پروتکل‌های مورد استفاده در خانه یا ساختمان هوشمند عبارتند از: ZigBee، Wi-Fi، Z-Wave و EnOcean.

هوشمندسازی ادارات، سازمان‌ها، کارخانجات و فروشگاه‌ها: در این محیط‌ها توسط اینترنت اشیا می‌توانیم هوشمندسازی عوامل زیر را پیاده سازی کنیم:

- فروش کالا، پرداخت وجه، اطلاع از وضع موجودی، مصرف بهینه انرژی و غیره در فروشگاه
- ورود و خروج کارکنان، بایگانی اسناد، کنترل ورود و خروج خودرو و غیره در ادارات و سازمان‌ها
- اطلاع از تولید تا فروش یک محصول، نظارت و کنترل دستگاه‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی و غیره در کارخانه‌ها

پروتکل‌های رایج مورد استفاده برای این نوع کاربردها عبارتند از: NFC، RFID، Z-Wave.

هوشمند سازی ناوگان حمل و نقل: حمل و نقل و ترافیک هوشمند یکی دیگر از کاربردهای اینترنت اشیا می‌باشد. حمل و نقل هوشمند به دو قسمت تقسیم می‌شود: (۱) خودرو هوشمند: خودرویی که توسط یک سری از حسگرها از محیط داخل و خارج خودرو اطلاعاتی را دریافت کرده و باتوجه به آن‌ها یک سری اقدامات انجام می‌دهد. (۲) جاده و راه‌های هوشمند: توسط حسگرهایی داده‌های محیطی را جمع‌آوری کرده و با خودروهایی که قصد استفاده از آن راه را دارند، تبادل اطلاعات می‌کند.

این سیستم می‌تواند کنترل ترافیک، کاهش تصادفات، کاهش آلودگی هوا و گزینه‌های راحتی راننده و سرنشینان و غیره را بهبود بخشد. از رایج‌ترین پروتکل‌های مورد

جدول ۵: مقایسه کلی پروتکل‌های مورد مطالعه

نوع شبکه	امنیت	مصرف انرژی	پهنای باند کانال	فرکانس	برد محیطی	نرخ داده	استاندارد مربوطه	پروتکل
LPWAN سلولی	بالا	بسیار پایین	180 kHz 200 kHz (حامل پهنای باند)	900 MHz 800 MHz 700 MHz	<35km 164 dB	250 kbps	3GPP Re- lease 13	NB_IOT
LPWAN	بالا	بسیار پایین	500- 250-125	868 MHz 915 MHz	2-15 km 155/154 dB	0.3-50 Kbps	LoRa WAN	LoRa WAN
LPWAN	بالا	بسیار پایین	100-200 Hz	868 MHz 915 MHz	50_3 km	100 Bits\s	N/A	Sigfox
WWAN سلولی	بالا	زیاد	200 kHz	1.8GHz (900MHz)	Cellular network	6.4 - 14.4 kbps	GSM GPRS EDGE	2G
WWAN سلولی	بالا	زیاد	5-20 MHz	1.6 – 2.0 GHz	Cellular network	384 kbps to 3.1 Mbps	GSM UMTS CDMA2000	3G
WWAN سلولی	بالا	زیاد	5–20 MHz, optionally up to 40 MHz	2 – 8 GHz	Cellular network	100 Mbps to 1 Gbps	GSM LTE	4G
WWAN سلولی	بالا	زیاد	N/A	test network used a 15 GHz	Cellular network	More than 1Gbps	N/A	5G
WMAN	بالا	متوسط	20;10 MHz	2-11 10-66 GHz	5-50 km	70-268 Mbps	IEEE 802.16	WiMAX
WLAN	پایین	زیاد	25-20 MHz	2.4-60 GHz	20-250 m	2 Mbps 100 Gbps	IEEE 802.11	Wi-Fi
WPAN	بالا	خیلی کم	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	868 MHz 915 MHz 2.4 GHz	10-100 m	250 kbps	IEEE 802.15.4	ZigBee
WPAN	متوسط	کم	300-400 KHz	908.4 ; 916 MHz USA	36-182 m	9.6-40-100 kbps	Z-Wave	Z-Wave
WPAN	پایین	خیلی کم	N/A	120 KHz- 10.6 GHz	10 cm- 200 m	8 – 640 kbps	RFID	RFID
WPAN	بالا	خیلی کم	280 KHz	868 MHz 902 MHz 928 MHz	30-300 m	125 kbps	ISO/IEC 14543-3-10	EnOcean
WPAN	متوسط	متوسط	1 MHz	2.4 to 2.485	100 m	1.24 Mbps	IEEE 802.15.1	Bluetooth
WPAN	پایین	کم	1 MHz	2.4 to 2.485	100 m <	1.24 Mbps	IEEE 802.15.1	Bluetooth (BLE)
WPAN	متوسط	متوسط	1 MHz	2.4 to 2.485	400 m	2.48 Mbps	IEEE 802.15.1	Bluetooth5
WPAN	بالا	خیلی کم	N/A	13.56 MHz	>20 cm (4-10)	106 -424 kbps	ISO / IEC 14443 ISO/ IEC 18092	NFC

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ما فناوری‌های بی‌سیم رایج استفاده شده در اینترنت اشیا (NB-IoT, LoRa WAN, Sigfox, Cellular Networks, WiMAX, Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave, RFID, Bluetooth, NFC) را مورد بررسی قرار دادیم و آن‌ها را از جنبه‌های مختلفی همچون برد محیطی، نرخ ارسال، مصرف انرژی و مقیاس‌پذیری دسته‌بندی و مقایسه کردیم. نتایج حاصل از این مقاله را می‌توان به این صورت جمع‌بندی کرد: برای کاربردهای با برد محیطی بالا و نرخ ارسال پایین (مانند شبکه‌های هوشمند انرژی)، فناوری‌های Sigfox, NB-IoT و LoRa WAN به دلیل مصرف بهینه انرژی بهترین انتخاب به شمار می‌روند. اما برای کاربردهایی که هم نیاز به برد محیطی بالا و هم نرخ ارسال بالا دارند (مانند دوربین‌های کنترل ترافیک) شبکه‌های سلولی، به‌ویژه نسل ۴ و نسل ۵، WiMAX و Wi-Fi گزینه‌های مطلوبی هستند. Zigbee, Z-Wave, Bluetooth و EnOcean برای کاربردهایی همچون خانه و ساختمان هوشمند مناسب‌ترین گزینه به حساب می‌آیند. برای کاربردهایی مانند خرده‌فروشی، زنجیره تأمین و سیستم‌های ردیابی، می‌توان فناوری‌های RFID و NFC را به‌کار گرفت. البته کاربردهایی هم وجود دارند که به فناوری‌های از دسته‌های مختلف نیاز دارند. به عنوان مثال، می‌توان به کاربردهایی نظیر کشاورزی هوشمند و حمل و نقل هوشمند اشاره کرد. در حالت کلی، می‌توان این‌گونه اذعان کرد که فناوری‌هایی که مصرف بهینه انرژی و امنیت بالا را در کنار مقیاس‌پذیری بالا فراهم می‌سازند، بیشتر مورد پسند طراحان و توسعه‌دهندگان اینترنت اشیا خواهند بود. انتظار می‌رود که این مقاله بینش خوبی در اختیار افرادی قرار دهد که در حوزه اینترنت اشیا فعالیت می‌کنند تا بتوانند مناسب‌ترین و مطلوب‌ترین فناوری و پروتکل را برای کاربردهای مورد نظر انتخاب نمایند.

استفاده در این حوزه می‌توان به WiFi، شبکه‌های سلولی، LoRa، NB-IoT و Sigfox اشاره کرد.

شهر هوشمند: به منطقه‌ای شهری گفته می‌شود که از انواع مختلف حسگرها جهت دریافت داده از محیط و ارائه آن جهت کنترل ترافیک و حمل نقل شهری، نیروگاه‌ها، شبکه‌های آبرسانی، مدیریت زباله‌های شهری، سیستم‌های اطلاعاتی و نظارت و کنترل بر آنچه در شهر اتفاق می‌افتد و غیره استفاده می‌شود. WiFi، WiMAX، شبکه‌های سلولی، LoRa، NB-IoT و Sigfox از جمله پروتکل‌ها و فناوری‌هایی هستند که اغلب در چنین حیطه‌ای به کار گرفته می‌شوند.

کشاورزی هوشمند: استفاده از فناوری‌ها و ارتباطات جدید در کشاورزی هوشمند این امکان را به کشاورز می‌دهد تا در تولید محصول بیشتر و کاهش هزینه و مدیریت منابع پیشرفت چشم‌گیری داشته باشد. جدیدترین فناوری که در صنعت کشاورزی استفاده می‌شود اینترنت اشیا است. پیش‌بینی وضعیت آب و هوا و اطلاع از میزان رطوبت و املاح معدنی و اطلاعات دیگر تاثیر بسیاری بر افزایش بازده و کاهش احتمال آسیب دیدگی مزارع دارد. اینترنت اشیا با اطلاعات دقیقی که در اختیار کشاورزان و متخصصان امر قرار می‌دهد امکان کنترل و نظارت دقیق را می‌دهد. پروتکل‌های مورد استفاده در این بخش عبارتند از: LoRa، NB-IoT، WiFi، ZigBee، شبکه‌های سلولی و Sigfox.

پوشیدنی و لباس هوشمند: لباس و پوشیدنی هوشمند فناوری جدیدی است که بیشتر در زمینه‌های پزشکی، ورزشی و مراقبت از کودکان کاربرد دارد. در این کاربرد، با استفاده از انواع حسگرها، مانند حسگر ضربان قلب، فشار خون و دمای بدن، علایم حیاتی شخص اندازه‌گیری شده و با استفاده از فناوری بلوتوث اطلاعات به گوشی هوشمند شخص ارسال می‌شود. همچنین می‌توان توسط فناوری‌های با برد بلند، مانند شبکه‌های سلولی، اطلاعات را به نزدیک‌ترین مرکز اورژانس یا پزشک مربوطه ارسال کرد تا در صورت لزوم اقدامات لازمه صورت گیرد.

- [21] R. G. (01/15), "Short range narrow-band digital radio-communication transceivers - PHY, MAC, SAR and LLC layer specifications."
- [22] EnOcean, "www.enocean.com/en/technology/radio-technology.", 2018
- [23] Bluetooth, "www.bluetooth.com.", 2018
- [24] P. P. Ray, "A survey on Internet of Things architectures," Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2016.
- [25] NFC, "www.nearfieldcommunication.org/about-nfc.html.", 2017
- [26] S. Burkard, "Near field communication in smartphones," Master Student, Computer Engineering Dep. of Telecommunication Systems, Service-centric Networking, Berlin Institute of Technology, Germany, 2012.
- [27] D. Halperin, B. Greenstein, A. Sheth, and D. Wetherall, "Demystifying 802.11 n power consumption," in Proceedings of the 2010 international conference on Power aware computing and systems, 2010, p. 1.
- [28] D. Dragomir, L. Gheorghe, S. Costea, and A. Radovici, "A Survey on Secure Communication Protocols for IoT Systems," in Secure Internet of Things (SIoT), 2016 International Workshop on, 2016, pp. 47-62: IEEE.
- [29] Y. Yang, L. Wu, G. Yin, L. Li, and H. Zhao, "A survey on security and privacy issues in internet-of-things," IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 5, pp. 1250-1258, 2017.
- [30] C. Sarkar, S. A. U. Nambi, R. V. Prasad, and A. Rahim, "A scalable distributed architecture towards unifying IoT applications," in Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on, 2014, pp. 508-513: IEEE.
- [31] M. R. Palattella, N. Accettura, L. A. Grieco, G. Boggia, M. Dohler, and T. Engel, "On optimal scheduling in duty-cycled industrial IoT applications using IEEE802.15.4 e TSCH," IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 10, pp. 3655-3666, 2013.
- [32] A. Mehta and S. Patel, "IoT based smart agriculture research opportunities and challenges," Int. J. Technol. Res. Eng, vol. 4, pp. 541-543, 2016.
- [33] P. P. Ray, "Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction," Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, vol. 9, no. 4, pp. 395-420, 2017.
- [1] 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.
- [2] S. Chakkor, E. A. Cheikh, M. Baghour, and A. Hajraoui, "Comparative performance analysis of wireless communication protocols for intelligent sensors and their applications," arXiv preprint arXiv:1409.6884, 2014.
- [3] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology," Sensors, vol. 12, no. 9, pp. 11734-11753, 2012.
- [4] C. Hennebert and J. Dos Santos, "Security protocols and privacy issues into 6LoWPAN stack: a synthesis," IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 5, pp. 384-398, 2014.
- [5] GSMA, "3GPP low power wide area technologies," GSMA white paper, October 7, 2016.
- [6] D. Flore, "3GPP Standards for the Internet-of-Things," Qualcomm Technologies Inc, 2016.
- [7] Y.-P. E. Wang et al., "A primer on 3GPP narrowband Internet of Things," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, 2017.
- [8] lora-alliance, "www.lora-alliance.org/technology.", 2018
- [9] L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range IoT technologies: The dawn of LoRa™," in Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures, 2015, pp. 51-58: Springer.
- [10] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, 2017.
- [11] GSM, "www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/gsm.", 2018
- [12] J. G. Andrews et al., "What will 5G be?," IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, 2014.
- [13] Sigfox, "www.sigfox.com.", 2018
- [14] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios," IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, 2016.
- [15] S. Song and B. Issac, "Analysis of Wifi and Wimax and Wireless Network Coexistence," arXiv preprint arXiv:1412.0721, 2014.
- [16] Zigbee, "www.zigbee.org.", 2017
- [17] D. Sen, P. Sen, and A. M. Das, RFID for energy & utility industries. Pennwell Books, 2009.
- [18] Q. Qian, Y.-L. Jia, and R. Zhang, "A Lightweight RFID Security Protocol Based on Elliptic Curve Cryptography," IJ Network Security, vol. 18, no. 2, pp. 354-361, 2016.
- [19] B. Kellogg, V. Talla, J. R. Smith, and S. Gollakot, "PASSIVE WI-FI: Bringing low power to Wi-Fi transmissions," GetMobile: Mobile Computing and Communications, vol. 20, no. 3, pp. 38-41, 2017.
- [20] Z-Wave, "http://www.z-wave.com.", 2018