


Proposing Criteria for Selecting Wireless Telecommunication Technology of Advanced Metering Infrastructure in Iran's Smart Grid

 <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1400.10.3.4.3>

Mohamad Javad Tanakian¹, Mehri Mehrjoo², Samira Noferesti³

1- Ph.D. Student, Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, mj.tanakian@pgs.usb.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, mehrjoo@ece.usb.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Information Technology Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, snoferesti@ece.usb.ac.ir

Abstract

Advanced Metering Infrastructure (AMI), as one of the components of smart power distribution networks, is used to send and receive the consumption, demand, voltage, and current between subscribers and electricity power distribution companies. To set up AMI, various wireless technologies have been used as the telecommunication network infrastructure in different countries. These technologies vary in terms of technical specifications, such as bit rate, frequency, latency, and coverage area. The selection of a technology among them requires a comprehensive study of specific technical requirements of the power distribution network, wireless technology development, and specific economic conditions of each country. From this viewpoint, we first review the research conducted on the design of smart grid telecommunications infrastructure. Then, we review the deployed wireless technologies based on their physical specifications and the way of access to the wireless medium. To differentiate their field of performance properly, we divide the technologies into three categories: short-range, medium-range, and long-range; in addition, we divide them into two groups: licensed and unlicensed operating frequency. Then, we examine the topology and medium access mechanism of each technology in terms of its transmission delay and transmission capacity; from an executive point of view, we prioritize a set of qualitative criteria for selecting wireless telecommunication technology of AMI in Iran including having technology support in our country, being an open-source technology, having low network setup and maintenance cost, data transmission rate, interference, security and passive defense, ease of design and scalability, medium-access mechanism, and battery life. Then, we compare the wireless technologies, nominated for the telecommunication infrastructure of AMI, based on the proposed criteria. Finally, we suggest some of the most appropriate ones for the congested and geographically extended network of AMI.

Keywords: Wireless telecommunication technologies, Advanced Metering Infrastructure, Smart grid

Received: 2020 December 27

Accepted: 2021 May 17

عیارهای انتخاب فناوری بیسیم مخابراتی برای فراسامانه اندازه گیری شبکه هوشمند برق ایران

نوع مطالعه: پژوهشی

 <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1400.10.3.4.3>

- محمد جواد تناکیان^۱، دانشجو مقطع دکتری، مهری مهرجو^۲، دانشیار، سمیرا نوفرستی^۳، استادیار
- ۱- گروه مهندسی مخابرات - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان - ایران
mj.tanakian@pgs.usb.ac.ir -
- ۲- گروه مهندسی مخابرات - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان - ایران
mehrjoo@ece.usb.ac.ir -
- ۳- گروه مهندسی فناوری اطلاعات - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان - ایران
snoferesti@ece.usb.ac.ir

چکیده: فراسامانه اندازه گیری به عنوان یکی از راهبردهای هوشمندسازی شبکه توزیع برق، جهت ارسال و دریافت میزان مصرف، دیماند، ولتاژ و جریان بین مشترکین و شرکت های توزیع برق بکار گرفته می شود. برای راه اندازی فراسامانه اندازه گیری، فناوری های بیسیم مخابراتی گوناگونی به عنوان زیرساخت مخابراتی شبکه در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این فناوری ها از نظر مشخصات فنی مثل نرخ بیت داده، فرکانس مورد استفاده، تاخیر و منطقه تحت پوشش متفاوتند و انتخاب یک یا چند فناوری از میان آنها، نیاز به بررسی همه جانبه نیازمندی های فنی خاص شبکه، میزان توسعه فناوری و شرایط اقتصادی هر کشور دارد. با این دیدگاه، در این مقاله، ابتدا با تکیه بر روی مشخصات فیزیکی و نحوه دسترسی به محیط بیسیم، مروری بر فناوری های موجود خواهیم داشت. به منظور تفکیک مناسب حوزه عملکرد، فناوری ها را در سه دسته، برد کوتاه، برد متوسط و برد بلند، و در دو گروه با فرکانس آزاد و با فرکانس انحصاری تقسیم بندی می کنیم. همچنین، سازوکار دسترسی هر فناوری به محیط انتقال بیسیم را از نظر مناسب بودن آن از نظر تاخیر ارسال و حجم ارسال اطلاعات بررسی می نماییم، سپس، مجموعه ای از معیارهای کیفی برای انتخاب زیرساخت مناسب فراسامانه اندازه گیری را معرفی می نماییم. پشتیبانی فناوری در ایران، منبع باز یا انحصاری بودن فناوری، هزینه راه اندازی و نگهداری شبکه که از دیدگاه اجرایی از اولویت بالایی برخوردارند، را به عنوان معیار ارزیابی فناوری ها پیشنهاد می دهیم. در انتها، همه فناوری های معرفی شده در مقاله را براساس معیارهای معرفی شده مورد نقد و ارزیابی قرار می دهیم.

واژه های کلیدی: فناوری های بیسیم مخابراتی، فراسامانه اندازه گیری، شبکه هوشمند برق

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

نام نویسنده ی مسئول : مهری مهرجو

نشانی نویسنده ی مسئول : ایران - زاهدان - بلوار دانشگاه - دانشگاه سیستان و بلوچستان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

می‌شود که این پارامترها خود به نیازمندی‌های فنی خاص شبکه هر کشور بستگی دارد.

شناخت و بررسی فناوری‌های مخابراتی که با سخگوی نیاز شبکه هوشمند می‌باشند، دو مین قدم در انتخاب زیر ساخت است. مقالات (مدقق و همکاران. ۱۳۹۲، Kuzlu et al. 2013, Gungor et al. 2011, Li et al. 2018) با در نظر گرفتن الزامات مخابراتی راهبردهای مختلف شبکه هوشمند، به بیان مزایا و محدودیت‌های انواع فناوری‌های مخابراتی باسیم و بیسیم پرداخته‌اند. در مقاله (مدقق و همکاران. ۱۳۹۲)، فناوری‌های مناسب برای سه سطح شبکه خانگی، محلی و گسترده و در مقالات (Gungor et al. 2011, Kuzlu et al. 2013) فناوری‌های مناسب برای هر یک از راهبردهای مختلف شبکه هوشمند برق معرفی شده است. مقاله (Li et al. 2018) نیز با تکیه بر یک فناوری خاص، به مقایسه جنبه‌های مختلف فناوری انتخاب شده با سایر فناوری‌های بیسیم و باسیم قابل استفاده در شبکه هوشمند پرداخته است. فناوری‌های مخابراتی بیسیم مطرح شده در این مقالات، مانند Zigbee و WiMax، نسبت به فناوری‌های سیمی مانند پی ال سی و فیبر نوری، توسعه پذیری راحت‌تر و هزینه نصب و راه‌اندازی پایین‌تری دارند، ولی از لحاظ امنیت، پهنای باند، میزان نویزپذیری و تداخل دارای محدودیت‌های بیشتری می‌باشند. مقالات (Mulla et al. 2015, Kabalci et al. 2019, Akyol et al. 2010, Dragičević et al. 2019) به معرفی فناوری‌های جدید بیسیم مانند 5G, LoRaWAN و Sigfox با قابلیت‌های پشتیبانی هزاران نقطه، توان مصرفی پایین و پوشش جغرافیایی وسیع پرداخته‌اند. در این مقالات، این فناوری‌ها از نظر نرخ بیت داده، مدولاسیون، سطح پوشش، فرکانس کاری و برخورداری فاکتورهای مورد نیاز شبکه هوشمند مقایسه شده‌اند.

پس از شناخت فناوری‌ها، گام بعدی تعیین ملاک‌های تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب فناوری مناسب است. مقالات (رحمانی. ۱۳۹۴، یغمایی. ۱۳۹۲، Gungor et al. 2013) معیارهایی چون تاخیر، پهنای باند، سازگاری پذیری، مقیاس پذیری، قابلیت اطمینان، هم‌گامی زمانی و پشتیبانی از چندپخش را معیار انتخاب فناوری مخابراتی مناسب بر می‌شمارند. از این میان، معیارهای تاخیر، پهنای باند، مقیاس پذیری و قابلیت اطمینان تقریباً در هر کاربرد مخابراتی مد نظر طراحان می‌باشند، اما معیارهای سازگاری پذیری، هم‌گامی زمانی و پشتیبانی از چندپخش در این مقالات، به طور خاص برای استفاده در شبکه هوشمند در نظر گرفته شده‌اند.

سازگاری پذیری در شبکه هوشمند، به توانایی سیستم‌های گوناگون برای کارکردن باهم و انجام فعالیت‌های مشارکتی گفته می‌شود به نحوی که یکپارچه‌سازی، همکاری مؤثر و ارتباطات دو طرفه بین المان‌های مختلف در شبکه هوشمند برقرار شود. هم‌گامی زمانی در برخی از دستگاه‌های موجود در شبکه برق، مانند واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU²)، مورد استفاده قرار می‌گیرد که جهت انجام محاسبات خود به

شبکه هوشمند برق، یک سیستم قدرت است که در آن فناوری‌های مخابراتی و اطلاعاتی به تجهیزات سیستم افزوده شده و روند پایش، کنترل و بهره‌برداری سیستم را بهبود داده و تسهیل می‌کند. شبکه مخابراتی در سه سطح تولید، انتقال و توزیع در شبکه برق استفاده می‌شود. در سطح تولید و انتقال به علت وجود سیستم‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری با قابلیت کنترل از راه دور و دست‌های مخابراتی مانند فیبرنوری و پی ال سی^۱، شبکه هوشمند بخوبی توسعه داده شده است. اما سطح توزیع که در حال حاضر فاقد شبکه مخابراتی مناسب می‌باشد از هوشمندی پایین‌تری در روند کنترل و بهره‌برداری برخوردار است.

یکی از راهبردهای هوشمندسازی شبکه توزیع برق، پیاده‌سازی فراسامانه اندازه‌گیری می‌باشد. فراسامانه اندازه‌گیری، یک سیستم یکپارچه شامل سخت‌افزار، نرم‌افزار و زیرساخت مخابراتی است که داده‌هایی نظیر مصرف، دیماند، ولتاژ و جریان را به صورت پیوسته یک نزدیکی به زمان حقیقی یا در زمان مجاد بستری مخابراتی دو طرفه قابل دریافت می‌کند. این سیستم با ایجاد بستری مخابراتی دو طرفه قابل قرائت، پیکربندی، نظارت و کنترل از راه دور کنترل‌ها و جمع‌آوری، مدیریت، پردازش و تحلیل داده، رسم گراف‌ها و گزارش‌های لازم را به صورت خودکار دارا می‌باشد. امکان تبادل دو طرفه داده در سیستم توزیع، از یک سو ضمن آگاه‌سازی مشترکین از میزان هزینه مصرف، زمینه اصلاح الگوی مصرف را فراهم می‌آورد و از سوی دیگر، در سمت مراکز جمع‌آوری داده، توسعه خدمات را به همراه دارد (مدقق. ۱۳۹۴).

با پیشرفت روزافزون فناوری‌های ارتباطی و مخابراتی و همچنین تنوع نیازمندی‌های شبکه هوشمند برق، طراحی زیرساخت مخابراتی که بتواند نیازمندی‌های این شبکه را فراهم نماید همواره یکی از موضوعات مورد توجه تحقیقات و مقالات علمی بوده است. ما این تحقیقات را در چهار بخش دسته‌بندی می‌کنیم: (۱) شناخت الزامات و نیازمندی‌های مخابراتی راهبردهای مختلف شبکه هوشمند برق، (۲) مقایسه و بررسی فناوری مخابراتی کاربردی در شبکه هوشمند برق، (۳) تعیین معیارهای انتخاب فناوری مخابراتی و (۴) ارزیابی عملی و به‌وجود کارایی فناوری انتخاب شده.

اولین بخش در طراحی زیرساخت مخابراتی شبکه هوشمند، شناخت نیازمندی‌های ارتباطی شبکه است. در (U.S.DOE. 2010, Balachandran et al. 2014) به معرفی این نیازمندی‌ها از جمله امنیت، قابلیت اطمینان، پهنای باند و تاخیر مجاز برای راهبردهای مختلف شبکه، به عنوان نمونه فراسامانه اندازه‌گیری، پرداخته شده است. همچنین، رابطه بین نحوه عملکرد بعضی از اجزای شبکه و نیازمندی مخابراتی مربوطه نیز تبیین شده است. برای مثال، پهنای باند مورد نیاز هر کنتور براساس پارامترهای مختلفی مانند فاصله زمانی نمونه برداری داده‌ها، حجم داده کدگذاری شده و فاصله زمانی ارسال نمونه‌ها محاسبه

مرور تحقیقات موجود نشان می‌دهد که امروزه به خاطر مزایای متعدد شبکه بی‌سیم، فناوری‌های بی‌سیم متعددی برای استفاده در فراسامانه اندازه‌گیری پیشنهاد شده است (مدقق و هم‌کاران. ۱۳۹۲ Gungor et al. 2011, Kuzlu et al. 2013, Li et al. 2018, Mulla et al. 2015, Kabalci et al. 2019, Akyol et al. 2010, Dragičević et al. 2019). این فناوری‌ها از نظر مشخصات فنی دارای شباهت‌ها و تفاوت‌هایی بوده و هر کدام سهمی از بازار را به خود اختصاص داده و در کشور های مختلف ضریب نفوذ گوناگونی را دارا می‌باشند. حال این سوال مطرح است که با چه معیارهایی می‌توان فناوری مناسب جهت راه‌اندازی زیرساخت مخابراتی فراسامانه اندازه‌گیری در شبکه هوشمند برق ایران را انتخاب نمود. برای پاسخ به این سوال، در بخش دوم به معرفی و بررسی تعدادی از فناوری‌های مخابراتی بی‌سیم که تاکنون جهت استفاده در فراسامانه اندازه‌گیری به کار گرفته شده‌اند، می‌پردازیم. در بخش سوم، معیارهای مختلفی برای مقایسه این فناوری‌ها، مثل پشتیبانی فناوری در ایران، منبع باز یا انحصاری بودن، هزینه راه‌اندازی و نگهداری شبکه، نرخ ارسال داده، تداخل، امنیت داده و پدافند غیرعامل، سهولت طراحی و توسعه‌پذیری، سازوکار دسترسی به رسانه ۳ و طول عمر باتری معرفی می‌کنیم. در انتها در بخش چهارم، نتیجه‌گیری مقاله حاصل از مقایسه این فناوری‌ها را ارائه می‌نماییم.

۲- معرفی فناوری‌های مخابراتی بی‌سیم

فناوری‌های بی‌سیم از سه جنبه باند فرکانس، توپولوژی و برد ارسال دسته‌بندی می‌شوند. از جنبه باند فرکانسی، فناوری‌های بی‌سیم به دو دسته فناوری‌هایی که در باندهای فرکانسی با نیاز و یا بدون نیاز به مجوز کار می‌کنند، تقسیم‌بندی می‌شوند. باندهای فرکانسی بدون نیاز به مجوز، باند فرکانسی آزاد نامیده می‌شوند که استفاده از آنها در مقاصد صنعتی، علمی و پزشکی نیاز به کسب مجوز ندارد.

از جنبه توپولوژی، فناوری‌های کاربردی در فراسامانه اندازه‌گیری به صورت پنج توپولوژی مش، ستاره، ترکیب مش-مش، مش-ستاره و ستاره-درخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به ساختار شبکه‌ای و محدوده تحت پوشش وسیع فراسامانه اندازه‌گیری، فناوری‌های مخابراتی بی‌سیم با محدوده تحت پوشش کمتر از چند صد متر جهت ایجاد محدوده پوشش وسیع‌تر، با توپولوژی مش و یا در کنار سایر فناوری‌ها به صورت ترکیب توپولوژی مش-مش و توپولوژی مش-ستاره مورد استفاده قرار می‌گیرند. در معماری شبکه‌های مبتنی بر فناوری‌هایی که از توپولوژی مش استفاده می‌کنند، هر یک از تجهیزات شبکه به عنوان مسیر یاب شبکه عمل می‌کنند و بطور مستقیم به یک یا چند تجهیز دیگر شبکه متصل هستند. همچنین فناوری‌ها با محدوده تحت پوشش چند کیلومتر به دلیل محدوده تحت پوشش وسیعی که دارند، با توپولوژی ستاره به کار گرفته می‌شوند.

معماری شبکه‌های مبتنی بر توپولوژی ستاره، مطابق شکل ۱، شامل بلوک‌های تجهیزات انتهایی (مثل سگ، عملگر و کنترلور هوشمند)، تجهیزات رادیویی و دروازه‌ها، شبکه واسط ارتباطی (مثل شبکه سلولی

استخراج پارامترهای الکتریکی پست‌ها، خطوط و تراز سفورماتورها در مقیاس زمانی دقیق نیاز دارند. با توجه به اینکه در شبکه هوشمند برق یک پیام داده ممکن است در یک لحظه در چند برنامه کاربردی مورد استفاده قرار گیرد، به جای اینکه چندین پیام به صورت جداگانه آدرس‌دهی و ارسال شوند، پیام چندبخشی توسط سوئیچ به صورت همزمان به چندین مقصد مورد نظر ارسال می‌گردد. معیارهای معرفی شده در مقالات (رحمانی. ۱۳۹۴، یغمایی. ۱۳۹۲، Gungor et al. 2013) به صورت فراگیر جهت استفاده در تمام کشورها ارائه شده است. برخی از معیارهای معرفی شده ممکن است برای یک کاربرد خاص اولویت نداشته باشد.

به عنوان نمونه، میزان تأخیر در ارسال و دریافت اطلاعات، از چند میلی‌ثانیه تا چند دقیقه به ترتیب برای اتوماسیون شبکه توزیع برق و فراسامانه اندازه‌گیری که دارای اطلاعات حساس و غیرحساس به تأخیر هستند، متفاوت می‌باشد (Li et al. 2018). علاوه بر این، ممکن است با معیارهای معرفی شده، یک فناوری مخابراتی در یک کشور بهینه شناخته شود، در صورتی که امکان پشتیبانی آن فناوری در کشور دیگر امکان‌پذیر نباشد. از این رو، در عمل باید معیارهای دیگری متناسب با شرایط شبکه در هر کشور تعریف شود. (Rezagholizadeh et al. 2013, Zamani et al. 2010) برای کاربرد اتوماسیون مدیریت اجزاء، جهت انتخاب فناوری مناسب از بین فناوری‌های کانال استیجاری شرکت مخابرات، پی‌ال‌سی و رادیو طیف گسترده، از یک روش ریاضی استفاده شده است. در این راستا، شاخص‌های متوسط عدم دسترسی به انرژی (ASU) و متوسط زمان قطعی مشترک به ازای هر بار قطع (CAIDI) به عنوان معیارهای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه توزیع و همچنین در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به ساخت، اجرا و نگهداری شبکه هوشمند مورد استفاده قرار گرفته است.

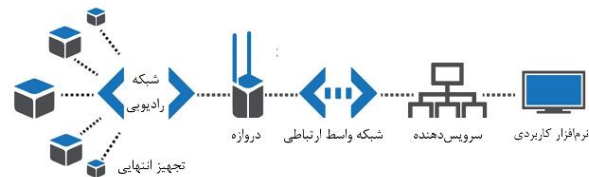
آخرین بخش از تحقیقات، ارزیابی عملی فناوری انتخاب شده به صورت اجرای پایلوت نمونه و یا انجام عملیات شبیه‌سازی و همچنین ارائه راهکار در خصوص بهبود عملکرد فناوری می‌باشد که در (شریف‌پور و هم‌کاران. ۱۳۹۶, Abbasi et al. 2019, Aznaveh et al. 2019, Tiurlikova et al. 2018) به آنها اشاره شده است. مقاله (شریف‌پور و هم‌کاران. ۱۳۹۶) هوشمندسازی شبکه برق جزیره هرمز را با اجرای اتوماسیون توزیع، فراسامانه اندازه‌گیری، خودرو برقی و پاسخگویی بار به وسیله فناوری‌هایی مانند فیبرنوری، کانال مایکروویو استیجاری شرکت مخابرات، GPRS شبکه سلولی، به دلیل در دسترس بودن بسترهای مخابراتی و صرفه اقتصادی، گزارش نموده است. مقالات (Aznaveh et al. 2019, Abbasi et al. 2019) عملکرد فناوری LoRaWAN را برای فراسامانه اندازه‌گیری شبیه‌سازی نموده و نشان داده‌اند که با افزایش تعداد نقاط شبکه میزان تصادم در شبکه به شدت افزایش پیدا می‌کند. در این راستا، مقاله (Tiurlikova et al. 2018) با ارائه راه‌کاری برای افزایش مقیاس‌پذیری فناوری LoRaWAN، مقیاس‌پذیری را برای ۵۰۰۰ کنتور و ۱۰۰۰۰ کنتور به ترتیب ۲۰٪ و ۴۰٪ ارتقا می‌دهد.

بعضی از نسخه های برد کوتاه 802.11 با نام تجاری Wi-Fi می باشد. نسخه های متنوعی از Wi-Fi با فرکانس کاری، پهنای باند، نوع توپولوژی، میزان پوشش و نرخ ارسال داده موجود است (حسینی سنو و هم کاران. ۱۳۹۴). نسخه برد کوتاه این فناوری، نسخه 802.11s است که در شبکه های هوشمند به دلیل پشتیبانی از توپولوژی مش محبوبیت بیشتری دارد (Saputro et al. 2017, Deng et al. 2017). در مقایسه با سایر فناوری های برد کوتاه، فناوری Wi-Fi دارای نرخ بیت مصرفی بالاتر می باشد (عزیزی و همکاران. ۱۳۹۷).

۲-۲- فناوری های برد متوسط

فناوری های برد متوسط در محدوده ای از چند صد متر تا یک یا دو کیلومتر را پوشش می دهد. دو فناوری شاخص در این دسته، IEEE802.15.4g و IEEE802.11ah می باشند، که در جدول ۱ با هم مقایسه شده اند (Shah et al. 2018). هر دو فناوری از سازوکار رقابتی CSMA/CA برای دسترسی به رسانه استفاده می کنند. در این سازوکار چنانچه تجهیز قبضه ارسال داده داشته باشد، یک مدت زمان تصادفی به کانال گوش دهد تا اگر کانال آزاد باشد، ارسال داده را آغاز نماید. اگر در این مدت زمان کانال توسط تجهیز دیگری اشغال شود، فرآیند ارسال به تعویق می افتد تا از تصادم جلوگیری نماید (Aalamifar et al. 2018).

Ethernet، LTE/3G و یا فضای اجری، سرویس دهنده شبکه و نرم افزارهای کاربردی می باشد. این شبکه ها در نحوه ارتباط تجهیزات انتهایی با دروازه ها و نوع شبکه واسط ارتباطی با یکدیگر متفاوت می باشند. به عنوان نمونه، در شبکه های مبتنی بر فناوری LoRaWAN هر تجهیز انتهایی ارسال داده را به صورت همه پخش انجام می دهد که به موجب آن تمام دروازه هایی که در برد فرستنده هر تجهیز قرار دارند امکان دریافت داده های ارسالی را دارند. اما در شبکه های مبتنی بر فناوری Dash7، هر تجهیز انتهایی ارسال داده را تنها به دروازه ای با بهترین سطح قدرت سیگنال انجام می دهد (Ayoub et al. 2018). در خصوص نوع شبکه واسط ارتباطی، شبکه های مبتنی بر فناوری های Sigfox و Dash7 از فضای اجری و در LoRaWAN نیز از Ethernet و LTE/3G به عنوان شبکه واسط ارتباطی استفاده می گردد (Ayoub et al. 2018). فضای اجری که مجموعه ای از کامپیوترها است با امکان ذخیره و کنترل اطلاعات از راه دور، موجب افزایش دسترسی پذیری و انعطاف پذیری شبکه و کاهش هزینه خرید و نگهداری تجهیزات ذخیره سازی و نرم افزارهای مختلف می گردد.



شکل (۱): معماری زیرساخت ارتباطی با توپولوژی ستاره

مطابق شکل ۲، از لحاظ برد ارسال داده فناوری های بیسیم را می توان به سه دسته برد کوتاه، برد متوسط و برد بلند تقسیم نمود. برد کوتاه به ارسال پیام تا حدود ۱۰۰ متر، برد متوسط تا حدود ۱ کیلومتر و برد بلند به ارسال تا چند (معمولاً ۵) کیلومتر اطلاق می شود. فناوری های برد کوتاه و برد متوسط به علت محدودیت در مسافت ارسال پیام، برای شبکه های دیگر تداخل زیادی ایجاد نمی کنند؛ از این رو، در باند فرکانسی بدون مجوز از آنها استفاده می شود. اما فناوری های بیسیم برد بلند، برای کاهش تداخل یا باید از باند مجوزدار استفاده کنند و یا در صورت استفاده از باند بدون مجوز، روش هایی برای کاهش تداخل به کار گیرند. برای مثال، ارسال داده در زمان ها، فرکانس ها، فازها و مسیرهای مختلف می تواند باعث کاهش تداخل گردد (حسینی سنو و همکاران. ۱۳۹۴). در بخش بعدی به معرفی این فناوری ها خواهیم پرداخت.

۲-۱- فناوری های برد کوتاه

هزینه و توان مصرفی پایین و سادگی از مشخصه های اصلی این فناوری ها به شمار می آیند. با توجه به برد ارسال کوتاه، از چند ده تا چند صد متر، از این فناوری ها در شبکه های بزرگ، معمولاً به صورت ترکیب با فناوری های برد بلند استفاده می شوند (Nejad et al. 2017). رایج ترین فناوری های برد کوتاه، Bluetooth، Z-Wave، 802.15.4 (Zigbee) و

فناوری های مخابراتی			
برد	برد	برد	
802.11s (Wi-Fi)	802.15.4g (Zigbee Pro)	باند فرکانسی	باند فرکانسی
802.15.4 (Zigbee)	802.11ah	LTE-Cat-M1 (E-MTC)	Weightless-P
Bluetooth		EC-GSM-IoT	Ingenu-RPMA
Z-Wave		NB-IoT	Lorawan
		802.11af	Sigfox
		Weightless-W	Nwave
			NB-Fi
			Dash7

شکل (۲): دسته بندی فناوری های مخابراتی بیسیم کاربردی در فراسامانه اندازه گیری از لحاظ برد ارسال

شده‌اند (Finnegan et al. 2018)، ولی چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. از این‌رو، در این بررسی به آنها نمی‌پردازیم.

۱-۳-۲- فناوری Sigfox

فناوری Sigfox یک LPWAN است که برای کاربرد هایی با هزینه ارتباطی کم و نرخ داده پایین مناسب می‌باشد (Finnegan et al. 2018). در این فناوری هر یک از تجهیزات قادر به ارسال حدود ۱۴۰ پیام روزانه می‌باشد که هر پیام به ترتیب دارای حداکثر ۱۲ و ۸ بایت داده در حالت فراسو و فروسو است (Bembe et al. 2019). فرکانس پایین حامل ها، استفاده از مدولاسیون فوق باند باریک و همچنین پهنای باند کم در این فناوری باعث پوشش دهی بالا و همچنین مقاومت در برابر نویز و تداخل می‌شود. سازوکار دسترسی به رسانه در فناوری Sigfox، دسترسی چندگانه تصادفی بر مبنای تقسیم فرکانسی زمانی می‌باشد. در این روش دسترسی، تجهیز بخش های مختلف پیام خود را در جازه های زمانی و فرکانسی متفاوتی ارسال می‌کند.

فناوری Sigfox در سال ۲۰۰۹ توسط شرکت فرانسوی به همین نام ارائه شد. همچنین، شبکه Sigfox توسط این شرکت و با همکاری شرکت های همکار در دهها کشور جهان از جمله آلمان، لهستان، روسیه و اسپانیا راه اندازی شده است (https://www.sigfox.com/en). در حال حاضر، شرکت هایی نظیر STMicroelectronics، Texas Instruments و Atmel ماژول های رادیویی این شرکت را تولید می‌کنند (Rama et al. 2018).

۲-۳-۲- فناوری LoRaWAN

فناوری LoRaWAN در ابتدا توسط شرکت فرانسوی Cyclos معرفی و توسط شرکت Semtech با مشارکت جامعه ای از شرکت های بزرگ حوزه فناوری مانند IBM، Cisco، HP و Foxconn که LoRa Alliance نام دارد، توسعه یافته و تکمیل شده است (Ahmad et al. 2019). از نظر مدل توسعه، عضویت در LoRa Alliance و مشارکت در توسعه و استفاده از استانداردهای این فناوری برای همه امکان پذیر است. هر شرکت ساخت افزاری می‌تواند تجهیزات انتهایی و دروازه را مطابق با استانداردهای LoRaWAN تولید کند. حتی تولید ماژول های رادیویی (لایه فیزیکی) که تا چندی پیش تنها توسط Semtech انجام می‌گرفت، با فروش حق استفاده از تکنولوژی به کمپانی های NXP و Microchip، از آنجا که یک کمپانی خاص خارج شده است (https://techblog.comsoc.org/tag/lorawan-sigfox/). همین امر رشد این فناوری را سرعت بخشیده است.

نخستین نسخه این فناوری برای اولین بار در سال ۲۰۱۵ ارائه شده است. این فناوری به سیگنالها اجازه می‌دهد تا حتی در سطوح پایین تر از سطح نویز نیز منتشر و بازیابی شوند. لذا تجهیزات مبتنی بر این شبکه می‌توانند تا سالها فقط با یک باتری کار کنند. فرکانس کاری این فناوری کمتر از 1GHz و در هر کشور بسته به قوانین و مقررات رادیویی

جدول (۱): مقایسه مشخصات فنی دو فناوری برد متوسط

فناوری	IEEE802.11ah (Wi-Fi HaLow)	IEEE802.15.4g (Wi-Sun)
سال انتشار	۲۰۱۷	۲۰۱۲
باند فرکانس	بدون مجوز، زیر 1GHz	بدون مجوز 868 MHz(EU), 915 MHz (USA), 2.4 GHz
میزان پوشش	۱/۵ کیلومتر	۱/۵ کیلومتر
نرخ بیت داده	150 Kbps to 78Mbps	2.4 Kbps to 800 Kbps
تعداد گره قابل پشتیبانی	حدود ۸۰۰۰ گره	دقیق اعلام نشده است (وابسته به توپولوژی شبکه).
توپولوژی	ستاره، درخت (۲ گام)	مش
سازوکار دسترسی به رسانه	CSMA/CA RAW+	CSMA/CA or TDMA
امنیت	AES(128,256)	AES(128,256)
روش دوسویه سازی	TDD	TDD

فناوری 802.11ah در کنار CSMA/CA از پنجره دسترسی محدود (RAW⁵) نیز استفاده می‌کند که با دستبندی تجهیزات به گروه های کوچک موجب کاهش احتمال تصادم تجهیزات رقابت کننده و افزایش قابلیت اطمینان ارسال داده می‌شود. در یک شبکه بزرگ با ۱۰۰۰ نقطه اتصال، با افزایش تعداد RAW از صفر تا ۸۰، مقدار نرخ گذردهی شبکه از ۲۲٪ تا ۱۰٪ قابل افزایش است (نغزعلی، ۱۳۹۸). به طور معمول، توپولوژی فناوری های 802.11ah و 802.15.4g به ترتیب مش و ستاره می‌باشد. فناوری 802.11ah جهت افزایش محدوده تحت پوشش ستاره از رله در یک ساختار درختی استفاده می‌کند (Ahmed et al. 2016).

۳-۲- فناوری های برد بلند

پرچم داران فناوری های مخابراتی برد بلند، شبکه های گسترده با توان مصرفی پایین (LPWAN) و شبکه های سلولی می‌باشند که به ترتیب از باند فرکانسی بدون مجوز و مجوزدار استفاده می‌کنند (Bembe et al. 2019). LPWANها شبکه های بیسیم با رنج ارسال طولانی می‌باشند که به منظور پشتیبانی تعداد زیادی از تجهیزات با نرخ انتقال داده و توان مصرفی کم طراحی شده‌اند (Bembe et al. 2019). در ارسال با برد بلند، مشکلات تداخل و افت توان بیشتر از ارسال برد کوتاه مشکل آفرین هست، از این‌رو، در فناوری های برد بلند، استفاده از باند فرکانسی مجوزدار بیش از دو دسته فناوری های برد متوسط و برد کوتاه به چشم می‌خورد. در ادامه، به بررسی کاربردترین فناوری های برد بلند در فراسامانه اندازه گیری، Sigfox، LoRaWAN، NB-IoT، RPMA، Dash7، Weightless و Nb-Fi می‌پردازیم. فناوری های دید گهر، از جمله Telensa و Nwave که به ترتیب در سال های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ ارائه شده اند، نیز در کاربرد های فراسامانه اندازه گیری به کار برده

دارای کلاس C بیشترین مصرف انرژی و کمترین زمان تاخیر در دریافت را در مقایسه با دو کلاس دیگر دارا می باشد (Ertürk et al. 2019). این کلاس در مواردی که در تامین انرژی مصرفی تجهیزات با مشکل مواجه نیستیم، مانند قرائت کنتورها، مناسب می باشد.

در فناوری LoRaWAN، سازوکار دسترسی به رسانه Pure Aloha می باشد. در این روش دسترسی اگر تجهیز داده ای برای ارسال داشته باشد، بدون وقفه و بدون در نظر گرفتن وضعیت آزاد و یا اشغال بودن کانال، عملیات ارسال داده را انجام می دهد. همین موضوع باعث کاهش تاخیر در ارسال اطلاعات توسط این روش شده است.

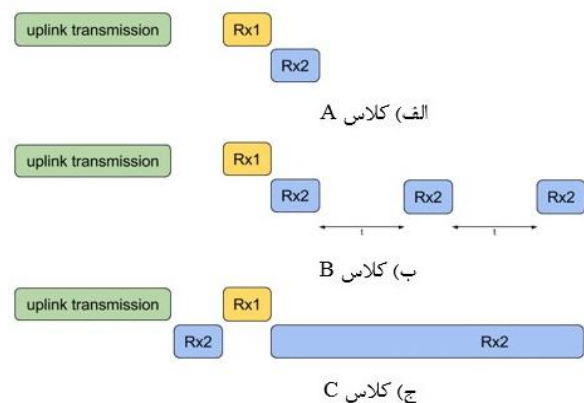
۲-۳-۳- فناوری NB-IoT*

NB-IoT یک فناوری برد بلند با توان پایین است که توسط سازمان استانداردسازی 3GPP توسعه داده شده است (Ayoub et al. 2018). شبکه های سلولی کنونی، برای کاربردهای متنوعی نظیر ارسال صدا و ارسال داده با سرعت بالا طراحی شده اند تا درآمد بیشتری کسب نمایند. از این رو، برای ارتباط دستگاه های ارزان قیمت که قرار است با حجم کم داده و باتری هایی با طول عمر بالا کار کنند بهینه سازی نشده اند. فناوری NB-IoT به منظور رفع این نقیصه به شبکه سلولی افزوده شده است. این فناوری پس از LoRaWAN و Sigfox عرضه شد و هدف از آن این بوده است که بتواند توسط اپراتورهای شبکه سلولی و در باندهای فرکانسی مجوزدار برای راهکارهای اینترنت اشیا استفاده شود. در کنار فناوری NB-IoT، LTE-M⁹ و EC-GSM-IoT^{۱۰} قرار دارند که توسط اپراتورهای شبکه سلولی برای کاربردهای ما شین به ما شین و اینترنت اشیا در سال ۲۰۱۶ ارائه شده اند. تفاوت این فناوری ها با هم در پهنای باند کانال، نرخ بیت داده و نوع مدولاسیون می باشد (Bembe et al. 2019).

فناوری NB-IoT نسبت به LTE-M که پیش تر و برای ارتباطات ماشین-به-ماشین^{۱۱} توسط 3GPP ارائه شده بود، توان مصرفی پایین تر، هزینه کمتر و ناحیه پوشش وسیع تری را دارا می باشد (Bembe et al. 2019). در این فناوری دو روش مختلف دسترسی چندگانه بر مبنای تقسیم فرکانسی متعامد (OFDMA) و دسترسی چندگانه بر مبنای تقسیم فرکانسی تک حامل (SC-FDMA) به ترتیب جهت دسترسی به رسانه در مسیر فرسو و فراسو بکار گرفته شده است (Li et al. 2018). SC-FDMA نیاز به گیرنده پیچیده تری دارد. از این رو، به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی تجهیزات انتهایی، از این تکنیک جهت دسترسی به رسانه در مسیر فرسو استفاده می شود. هر دو روش OFDMA و SC-FDMA در LTE به کار گرفته می شوند و از تقسیم باند فرکانسی به بخش های کوچک تر به نام زیرحامل استفاده می کنند که باعث انعطاف پذیری اختصاص منابع می شود. به عبارت دیگر کاربران با نرخ بیت متفاوت، تعداد زیر حامل های متفاوتی را در اختیار می گیرند. عمود بودن زیرحامل ها در این دو روش دسترسی، امکان استفاده از

متفاوت می باشد. برای کاهش تداخل در این فناوری، بسته به باند فرکانسی که در آن بکار گرفته می شود، دوره کاری ۱/۰، ۱/۰، ۱۰ در صد می باشد. به عنوان نمونه دوره کاری ۱ درصد به این معناست که اگر تجهیز به مدت ۱ ثانیه عمل ارسال داده را انجام دهد در ۹۹ ثانیه بعدی مجاز به ارسال هیچ داده ای نمی باشد. در LoRaWAN، نرخ ارسال داده از 0.3kbps تا 50kbps متغیر است. البته در برخی مقالات نرخ ارسال از 0.3kbps تا 27kbps اشاره شده است (Mroue et al. 2018). LoRaWAN مبتنی بر مدولاسیون طیف گسترده است که هم از توان پایینی برای ارسال استفاده می کند و هم در برابر تداخل و محوشوندگی در کانال بیسیم مقاوم است.

در این فناوری ارسال داده های فراسو به صورت همه پخشی می باشد. بدین صورت که تمام دروازه هایی که در محدوده برد فرستنده تجهیز انتهایی قرار دارند می توانند داده ای را از تجهیز دریافت و به سرویس دهنده انتقال دهند. این روش به دلیل ایجاد چندین مسیر مختلف ارتباطی بین تجهیز انتهایی و سرویس دهنده، موجب بالا رفتن قابلیت اطمینان شبکه در ارسال داده می گردد. در مسیر فرسو، بسته به اهمیت میزان مصرف انرژی و تاخیر در دریافت اطلاعات، تجهیزات انتهایی به سه کلاس مختلف به نام های A، B و C تقسیم بندی می شوند (Ayoub et al. 2018). در این سه نوع کلاس، داده های ارسال در مسیر فراسو می توانند در هر زمان و به صورت تصادفی به جز در زمان دریافت داده های فرسو ارسال شوند. تفاوت این سه کلاس در تعداد دفعات دریافت داده مسیر فرسو بین مدت زمان دو عملیات فراسوی متوالی می باشد. همانطوری که در شکل ۳ نشان داده شده است، در کلاس A، در فاصله بین دو ارسال فراسو فقط دو بار امکان دریافت در مسیر فرسو وجود دارد و تجهیز عمدتاً به خاطر ذخیره سازی انرژی به حالت خواب می رود. در کلاس B امکان دریافت های متعدد و زمان بندی شده بین دو ارسال فراسو وجود دارد که موجب کاهش تاخیر نسبت به کلاس A می گردد. در کلاس C یک تجهیز به جز در زمان ارسال داده در مسیر فراسو همواره آماده دریافت در مسیر فرسو می باشد. بنابراین تجهیزات



شکل (۳): کلاس های مختلف تجهیزات در فناوری LoRaWAN - (<https://witekio.com/lorawan-a-dedicated-iiot-network/>)

آن می‌باشد به طوری که سازندگان ادعا نمودند یک دروازه RPMA به تنهایی معادل ۱۸ دروازه در LoRaWAN، ۳۰ دروازه در شبکه سلولی و ۷۰ دروازه در Sigfox، پوشش انتت قال را فراهم می‌کند (<https://www.ingenu.com/technology/rpma/competition/>).

در مقایسه با سایر فناوری‌های برد بلندی که در این مقاله به بررسی آن‌ها پرداخته شده است، این فناوری در دسته فناوری‌های دارای نرخ ارسال بالا قرار می‌گیرد. علاوه بر این RPMA تنها فناوری می‌باشد که در فرکانس بدون نیاز به مجوز 2.4 GHz کار می‌کند.

۲-۳-۶- فناوری Dash7

یکی دیگر از فناوری‌های مخابراتی منبع باز Dash7 می‌باشد که توسط موسسه غیر انتفاعی Dash7 Alliance در سال ۲۰۱۳ ارائه شده است. فرکانس کاری این فناوری کمتر از 1GHz می‌باشد و در باندهای فرکانسی 433، 868 و یا 915 مگاهرتز با نرخ‌های ارسال 9.6Kbps و 166.67 Kbps مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری از محدود فناوری‌های برد بلندی می‌باشد که از سازوکار CSMA/CA جهت دسترسی به رسانه بهره می‌گیرد (Bembe et al. 2019, Ayoub et al. 2018).

۲-۳-۷- فناوری NB-Fi¹⁵

فناوری NB-Fi در سال ۲۰۱۱ توسط شرکت آمریکایی WAVIOT ارائه شده است (Bembe et al. 2019). فرکانس کاری و پهنای باند مورد استفاده در این فناوری به ترتیب زیر 1GHz و 100Hz می‌باشد. سازوکار دسترسی به رسانه در این فناوری به صورت TDMA/FDMA می‌باشد. تخصیص کانال در این فناوری توسط سرور شبکه و رادیو نرم‌افزاری صورت می‌پذیرد (Bembe et al. 2019). این فناوری با جایگزینی نرم‌افزار به جای سخت‌افزار، بعضی از عملیاتی که روی سیگنال رادیویی انجام می‌شود را ساده‌تر کرده و انعطاف‌پذیری فرستنده و گیرنده را در بکارگیری طیف گسترده‌ای از فرکانس‌ها افزایش می‌دهد. با توجه به مطالبی که تا اینجا در خصوص فناوری‌های برد بلند بیان شد، شباهت‌ها و تفاوت‌های مشخصات فنی این فناوری‌ها را می‌توان مطابق جدول ۲ خلاصه نمود. ویژگی‌های قابل مقایسه این فناوری‌ها عبارتند از: توپولوژی، میزان پوشش‌دهی، نرخ بیت داده، فرکانس کاری، سازوکار دسترسی به رسانه و انحصاری یا منبع باز بودن اجزای فناوری.

۳- معیارهای کیفی انتخاب فناوری بیسیم برای

فراسامانه اندازه‌گیری

تا این بخش از مقاله، فناوری‌های بیسیم کاربردی در فراسامانه اندازه‌گیری شبکه توزیع هوشمند برق مورد بررسی قرار گرفت. به منظور پاسخ دادن به این سوال که بکارگیری کدام یک از این فناوری‌ها جهت راه‌اندازی فراسامانه مورد بحث در ایران مناسب‌تر است، ابتدا لازم است

ارسال و دریافت چند آنتنی (MIMO) را فراهم می‌آورد که باعث افزایش نرخ گذردهی و قابلیت اطمینان ارسال داده می‌شود.

۲-۳-۴- فناوری Weightless

گروه SIG¹² به عنوان یکی دیگر از توسعه‌دهندگان LPWAN، پروتکل منبع باز Weightless را جهت کاربردهای مختلف در سه فناوری تحت نام‌های Weightless-P، Weightless-N، Weightless-W ارائه نموده است (Bembe et al. 2019).

فناوری Weightless-W برای ارتباطات دو سویه و کار کردن در طیف فرکانسی سفید تلویزیون بکار گرفته می‌شود. طیف سفید به آن دسته از فرکانس‌های اختصاص داده شده به یک سرویس پخش کننده سیگنال مخابراتی گفته می‌شود که در بعضی از زمان‌ها مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. فناوری Weightless-N دارای پهنای باند بسیار کم می‌باشد که برای بارگذاری و ارسال داده‌ها از حسگرها به ایستگاه پایه به صورت یک طرفه طراحی شده است. فرکانس کاری در این فناوری، کمتر از 1GHz می‌باشد. Weightless-P آخرین فناوری شرکت Weightless می‌باشد که در سال ۲۰۱۶ برای برقراری ارتباطات به صورت دو طرفه عملیاتی شده است. فرکانس کاری در این فناوری نیز کمتر از 1GHz می‌باشد. این فناوری در مقایسه با دو فناوری دیگر، دارای نرخ ارسال طول عمر باتری کمتری است. توسعه این فناوری توسط شرکت انگلیسی Ubiik در حال انجام است. مکانیزم دسترسی به رسانه در این فناوری دسترسی چندگانه تقسیم زمانی (TDMA) و دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس (FDMA) است (Bembe et al. 2019). در TDMA با تقسیم کانال ارتباطی به شیارهای زمانی و تخصیص هر شیار به یک کاربر، امکان استفاده چندین کاربر از رسانه مشترک با فرکانس یکسان فراهم می‌شود. در FDMA نیز با تقسیم پهنای باند کانال به بازه‌های فرکانسی کوچک به نام زیرحامل و اختصاص هر زیرحامل به یک کاربر، امکان استفاده چند کاربر از رسانه مشترک در یک زمان فراهم می‌شود.

۲-۳-۵- فناوری RPMA

فناوری RPMA توسط شرکت آمریکایی Ingenu برای کاربرد های اینترنت اشیا معرفی شده است (Bembe et al. 2019). در این فناوری، دو روش مختلف دسترسی چندگانه، یکی بر مبنای تقسیم کد متعامد¹³ (CDMA) و دیگری با فاز تصادفی (RPMA)¹⁴ به ترتیب جهت دسترسی به رسانه در مسیر فرستنده و فراسو بکار گرفته شده است (Raza et al. 2017, Bembe et al. 2019). در روش CDMA، با اختصاص کدهای متعامد به داده هر نود، امکان دسترسی همزمان همه نودها بر روی یک باند فرکانسی فراهم می‌باشد. روش RPMA، نسخه تغییر یافته CDMA است که در آن نسبت سیگنال به نویز به یو پدیا کرده، زمان هر تایم اسلات افزایش یافته، یک کد واحد به همه نودها اختصاص داده شده است و زمان ارسال هر نود در طول یک تایم اسلات می‌تواند متفاوت باشد. یکی از مزیت‌های این فناوری، توسعه‌پذیری بالای

در انتخاب فناوری مناسب و نقش پر اهمیت این انتخاب می باشد. از دیگر فعالیت های صورت گرفته جهت هوشمندسازی شبکه برق کشور، سامانه مدیریت داده های اندازه گیری شده مستمر (مدام) است. این سامانه، در بازه های متناوب (۱۵ دقیقه ای) با جمع آوری اطلاعات کنتورهای نصب شده بر روی فیدهای ۲۰ کیلوولت پست های برق کل کشور، امکان ایجاد گزارش گیری از میزان تولید و مصرف برق به عنوان نمونه بر حسب نام پست و یا نام شرکت های توزیع را فراهم می آورد. بستر مخابراتی مورد استفاده در این سامانه، شبکه فیبرنوری اختصاصی صنعت برق و سرویس Private APN^{۱۷} شرکت ایرانسل و همراه اول می باشد. این سرویس مجموعه ای از پروتکل ها است که باعث افزایش امنیت در ارسال داده توسط شبکه سلولی می شود.

یک فناوری هر اندازه کاربردی و دارای قابلیت های فراوان باشد تا زمانی که در کشور خدمات پشتیبانی آن ارائه نشود، مفید نخواهد بود. لذا، یکی از مهمترین فاکتورهای یک فناوری، پشتیبانی و ارائه خدمات پس از فروش آن می باشد. همه فناوری های برد کوتاه و متوسطی که در این مقاله به آنها اشاره شده است، در ایران قابل بکارگیری می باشند. ولی از میان فناوری های برد بلند اشاره شده در این مقاله، تنها فناوری های Sigfox، NB-IoT و LoRaWAN تاکنون در ایران از پشتیبانی برخوردار بوده اند.

این فناوری ها را از نظر معیارهای کیفی انتخاب فناوری مورد بررسی قرار داد. در ادامه به معرفی و بررسی هر کدام از معیارها براساس اولیوی که در این مقاله برای آنها در نظر گرفته شده است خواهیم پرداخت.

۳-۱- پشتیبانی فناوری در ایران

در حال حاضر، بعنوان اولین گام جهت هوشمندسازی شبکه توزیع برق ایران، طرح ملی فراسامانه هوشمند اندازه گیری و مدیریت انرژی (فهام) در حال اجرا می باشد. در این طرح، جهت انتقال اطلاعات اندازه گیری کنتورهای مشترکین صنعتی و کشاورزی به سرویس دهنده شبکه، از بستر GPRS شبکه سلولی اپراتور های همراه اول و ایرانسل استفاده می گردد. یکی از مشکلات اجرای این طرح، جدا و وابستگی به اپراتورهای مذکور، عدم آنتن دهی و یا آنتن دهی نامناسب شبکه سلولی در برخی از مناطق مورد نظر می باشد. در بعضی از شرکت های توزیع نیروی برق، برای برقراری ارتباط با کنتورهای هوشمند خانگی و مجتمع های بزرگ به صورت آزمایشگاهی و در سطح محدود از سایر فناوری های بیسیم استفاده می گردد. به عنوان نمونه، در شرکت توزیع برق شیراز و زنگان از فناوری LoRaWAN و در اردبیل از فناوری Zigbee بهره می گیرند. بکارگیری فناوری های بیسیم متعدد جهت زیرساخت مخابراتی فراسامانه اندازه گیری در کشور، نشان دهنده سردرگمی شرکت های ذینفع

جدول (۲): مشخصات فنی فناوری های مخابراتی برد بلند (Ayoub et al.2018, Bembe et al. 2019, Raza et al.2017, Li et al.2018)

Dash7	NB-Fi	Weightless-P	RPMA	NB-IoT	Lorawan	Sigfox	شاخص / فناوری
۲۰۱۳	۲۰۱۱	۲۰۱۶	۲۰۰۸	۲۰۱۶	۲۰۱۵	۲۰۰۹	سال انتشار
انحصاری	انحصاری	منبع باز	انحصاری	انحصاری	منبع باز جز لایه فیزیکی	انحصاری به جز تجهیزات انتهایی	دسترسی به اجزای فناوری
آزاد، < 1	آزاد، < 1	آزاد، < 1	آزاد، 2.4	مجوزدار، 0.9-1.8	آزاد، < 1	< 1	باند فرکانس (GHz)
5	16 (NLOS) 50 (LOS)	> 2	15	< 15	2 - 5 (NLOS) 15 (LOS)	10 (*NLOS) 50 (*LOS)	میزان پوشش (Km)
55-200	0.01-0.1	0.200 - 100	UL = 624 DL = 158	UL: < 250 DL: < 230	EU: 0.3 - 50 US: 0.9 - 100	*UL: <0.1 *DL: < 0.6	نرخ بیت داده (Kbps)
اعلام نشده	1350000	اعلام نشده	500000	52000	UL>1000000 DL<100000	> 1000000	تعداد گره قابل پشتیبانی
GFSK	D-BPSK	GMSK & Offset QPSK	D-BPSK	QPSK , BPSK	Chirp Spread Spectrum (CSS)	BPSK	مدولاسیون
ستاره، درخت، تجهیز به تجهیز	ستاره	ستاره	ستاره، درخت	ستاره	ستاره ای از ستاره ها	ستاره	توپولوژی
CSMA/CA	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA	RPMA (CDMA-like)	OFDMA / SC-FDMA	ALOHA-based	RFTDMA (ALOHA-based)	سازوکار دسترسی به رسانه
AES	XTEA-2	AES 128/256b	16 B hash, AES256b	3GPP (128-256bit)	128-bit AES	secret key	امنیت
نیمه دوسویه	دوسویه کامل	نیمه دوسویه	نیمه دوسویه	نیمه دوسویه	نیمه دوسویه	نیمه دوسویه	روش دوسویه سازی

*NLOS= Non-Line-of-Sight, LOS= Line-of-Sight, UL=Uplink, DL= Downlink

اختیار خود دارد. تنها بخشی که شرکت Sigfox به سایر شرکتها اجازه مشارکت می‌دهد، فناوری سمت تجهیزات انتهایی است. برخلاف Sigfox، مشارکت در تمام قسمت‌های فناوری LoRaWAN امکان‌پذیر است و تنها بخشی که به صورت انحصاری در اختیار چند شرکت می‌باشد، لایه فیزیکی است. برخی دیگر از فناوری‌ها نیز مانند Dash7 و Weightless-P کاملاً به صورت منبع باز هستند. با توجه به این که کشور ما با تحریم‌های مختلف مواجه است، استفاده از فناوری‌های مخابراتی که تحت انحصار یک شرکت می‌باشند قابل توجه نیست.

۳-۳- هزینه راه‌اندازی و نگهداری شبکه

استفاده از فناوری‌های مخابراتی برد کوتاه و متوسط جهت استفاده در زیرساخت ارتباطی مناطق وسیع به دلیل نیاز به هزینه بالای طراحی و نگهداری شبکه، تعداد زیاد دروازه شبکه، تاخیر در ارسال داده و همچنین کاهش قابلیت اطمینان شبکه به دلیل افزایش تعداد گام‌های مورد نیاز جهت رسیدن داده از کنتور به دروازه شبکه، مقرون به صرفه نیست (Korkmaz et al. 2010). از این رو، استفاده از این فناوری‌ها برای پوشش مناطقی با وسعت کم می‌تواند مفید واقع شود. برخلاف اغلب فناوری‌های برد بلند که دارای رنج از سال چندین کیلومتری است، رنج ارسال فناوری‌های Dash7 و Weightless-P به ترتیب حداکثر ۲ و ۵ کیلومتر می‌باشد. از این رو، در مقایسه با رنج ارسال سایر فناوری‌های برد بلند، استفاده از این دو فناوری برای پوشش دادن یک منطقه وسیع به دلیل نیاز به تعداد بیشتر دروازه شبکه مقرون به صرفه نیست.

در میان فناوری‌های برد بلند، به دلیل آماده بودن زیرساخت مخابراتی فناوری‌های مبتنی بر شبکه سلولی، هزینه راه‌اندازی اولیه شبکه‌های بزرگ مبتنی بر این فناوری‌ها نسبت به فناوری‌های LPWAN کمتر می‌باشد. البته این که آیا با احتساب سایر هزینه‌های بعدی مربوط به استفاده از این فناوری‌ها، مانند پرداخت هزینه آبونمان به اپراتورهای شبکه سلولی، در مجموع استفاده از این فناوری‌ها همچنان مقرون به صرفه است نیز موضوعی است که نیاز به بررسی دارد. با این وجود استفاده از فناوری‌های مبتنی بر شبکه سلولی در راه‌اندازی فراسامانه اندازه‌گیری، با محدودیت‌هایی از جمله موارد ذیل مواجه می‌باشند:

- (۱) عدم استقلال شرکت‌های برق در مدیریت زیرساخت مخابراتی شبکه هوشمند برق و وابستگی به اپراتورهای شبکه سلولی
- (۲) پرداخت هزینه آبونمان و حق شارژ به اپراتورهای شبکه سلولی
- (۳) محدودیت ناشی از عدم گسترش و پشتیبانی فناوری NB-IoT در مناطق مورد نظر شرکت‌های برق بویژه مناطق غیر شهری

تا چندی پیش، شرکت پارس نت نماینده انحصاری Sigfox به شمار می‌آمد که بعد از شروع تحریم‌ها این همکاری تحت تاثیر تحریم‌ها قرار گرفته است (<https://www.parsnet.io/>). همچنین در اواخر سال ۱۳۹۵، شرکت ایرانسل برای نخستین بار از فناوری NB-IoT رونمایی نموده است (<https://irancell.ir/portal/>) اپراتور همراه اول نیز در اواسط سال ۱۳۹۷ موفق شد اولین مودم ارتباطی اینترنت اشیا ساخت داخل بر بستر NB-IoT را در شبکه خود به بهره‌برداری برساند (<https://mci.ir/news/>). همچنین شرکت دانش بنیان "اتصال صنعت میانه" نیز اعلام آمادگی نموده است که توانایی ارائه خدمات هوشمند سازی بر بستر NB-IoT را در کشور دارد (<https://www.esmcell.com/>). هر چند که اپراتور همراه اول و ایرانسل از فناوری NB-IoT رونمایی کردند ولی اطلاعاتی در دسترس نیست که در حال حاضر چند درصد تجهیزات نصب شده در شبکه سلولی که در کشور موجود هستند قابلیت پشتیبانی از این فناوری را دارند و یا این که چند درصد آنها نیازمند تغییرات نرم‌افزاری یا سخت‌افزاری می‌باشند.

با توجه به اینکه فناوری NB-IoT بر پایه شبکه‌های سلولی موبایل و در باندهای مجوزدار شکل گرفته است، مدل توسعه آن نیز کاملاً مشابه شبکه‌های ارتباطی موبایل و مبتنی بر اپراتورها می‌باشد. از این رو، امکان راه‌اندازی شبکه‌های خصوصی مبتنی بر این فناوری وجود ندارد. همچنین توسعه شبکه مبتنی بر فناوری NB-IoT در هر منطقه، نیازمند تصمیم اپراتورهای محلی برای بروزسانی سایت‌های موبایل است. با این حال، با توجه به مشخصات فنی و پژوهش‌هایی که در ارتباط با این فناوری و کاربردهای آن انجام شده است، NB-IoT یکی از کاندیدهای اصلی برای راه‌اندازی زیرساخت فراسامانه اندازه‌گیری می‌باشد (Li et al. 2018). در مورد LoRaWAN شرکت ارتباطات "فن کام کیش" به عنوان یکی از اعضای Alliance LoRa (<http://www.fancomkish.com/fancomkish-and-lora-alliance/>) شناخته می‌شود. همچنین برخی از شرکت‌های کنتورسازی در کشور مانند "نوس فایوز" امکان نصب و پشتیبانی ماژول‌های فناوری NB-IoT و LoRaWAN را در محصولات خود قرار داده‌اند (<https://www.toosfuse.com/news/960801/>).

۳-۴- فناوری‌های منبع باز یا انحصاری

در میان فناوری‌های معرفی شده در این مقاله، فناوری‌های NB-Fi، Telensa، RPMA، NB-IoT و EC-GSM-IoT به صورت انحصاری تحت مالکیت شرکت‌های توسعه‌دهنده خود می‌باشند. در برخی از فناوری‌ها مثل Sigfox و LoRaWAN نیز تنها بخشی از لایه‌های مدل ارتباطی آن‌ها به صورت انحصاری بوده و بخش دیگر به صورت منبع باز می‌باشد و قابلیت دسترسی به اسناد طراحی آن وجود دارد. فناوری Sigfox تمام فناوری از بخش داده‌ها و سرویس‌دهنده ابری تا نرم‌افزار سمت تجهیزات انتهایی را به صورت کامل و انحصاری در

۴-۳- نرخ ارسال داده

از لحاظ نرخ ارسال داده، فناوری‌های مخابراتی که در این مقاله به آنها اشاره شده است را می‌توان به ۵ دسته تقسیم‌بندی نمود:

- دسته ۱: نرخ ارسال کمتر از 1Kbps، مانند Sigfox و NB-Fi
 - دسته ۲: نرخ ارسال بین 1Kbps تا 100Kbps، مانند Weightless-P و LoRaWAN
 - دسته ۳: نرخ ارسال بین 100Kbps تا 200Kbps، مانند Dash7
 - دسته ۴: نرخ ارسال بین 200Kbps تا 1Mbps، مانند RPMA و NB-IoT، 802.15.4g
 - دسته ۵: نرخ ارسال بالاتر از 1Mbps، مانند LTE-M
- در حال حاضر محدوده‌های نرخ ارسال و حداکثر تاخیر مجاز فراسامانه اندازه‌گیری به ترتیب 10Kbps تا 100Kbps و ۵ ثانیه تا چندین ساعت می‌باشد (Li et al. 2018). از این‌رو، استفاده از فناوری‌های مخابراتی با نرخ ارسال در حد مناسب نمی‌باشد. اگر چه در حال حاضر استفاده از فناوری‌های مخابراتی با نرخ ارسال در حد 100Kbps مناسب می‌باشد ولی با توجه به توسعه خدماتی که فراسامانه اندازه‌گیری در آینده ممکن است ارائه دهد و یا احتمال استفاده از زیرساخت مخابراتی فراسامانه برای سایر کاربردهای شبکه هوشمند برق، باید فناوری‌ای را انتخاب کنیم که دارای نرخ ارسال بالاتری باشد.

۵-۳- تداخل

فناوری‌های مبتنی بر شبکه سلولی مانند NB-IoT در مقایسه با فناوری‌هایی مانند LPWAN که از باند فرکانسی بدون نیاز به مجوز استفاده می‌نمایند، کمتر دچار مشکل تداخل با سایر شبکه‌ها می‌گردند. در میان باندهای فرکانسی بدون مجوز، در حال حاضر فناوری‌هایی که در باند فرکانسی کمتر از 1GHz کار می‌کنند، نسبت به فناوری‌هایی که در باند فرکانسی 2.4GHz کار می‌کنند، کمتر مستعد تداخل می‌باشند. این موضوع به دلیل گستردگی استفاده از باند فرکانسی 2.4GHz در شبکه‌ها و تجهیزات بیسیم خانگی و عمومی نظیر Bluetooth و اینترنت ارائه شده توسط مودم‌های Wi-Fi می‌باشد. اما محدودیت فرکانسی کمتر از 1GHz نیز با گسترش کاربردهای اینترنت اشیا به زودی با مشکل تداخل مواجه خواهد شد. در میان فناوری‌های بررسی شده در این مقاله، فناوری‌های EC-GSM-IoT، LTE-M و NB-IoT در باند فرکانسی شبکه سلولی و فناوری‌های Sigfox، LoRaWAN، Dash7، NB-Fi، Weightless-P و 802.11ah در باند فرکانسی کمتر از 1GHz و فناوری‌های Bluetooth، 802.11s، RPMA در باند فرکانسی 2.4GHz کار می‌کنند. فناوری 802.14.5g نیز قابلیت کار در هر دو باند فرکانسی 2.4GHz و کمتر از 1GHz را دارد. از دیدگاه محدودیت‌های استفاده از باند فرکانسی بدون مجوز، احتمال تداخل

کانال‌های دو شبکه بیسیم با یکدیگر می‌باشند. به عنوان نمونه می‌توان به تداخل برخی از کانال‌های LoRaWAN با 802.154g اشاره نمود (Orfanidis et al. 2017).

۶-۳- امنیت داده و پدافند غیرعامل

کلیه فناوری‌هایی که در این مقاله به بررسی آنها پرداخته شده است جهت جلوگیری از خرابکاری‌های عمدی و بالابردن امنیت در سال و دریافت داده‌ها از روش‌های رمزنگاری استفاده می‌نمایند. علاوه بر این به منظور افزایش امنیت داده در شبکه سلولی سرویس Private APN در این شبکه اضافه شده است. این که کدام یک از این روش‌های رمزنگاری بکار گرفته شده در این فناوری‌ها عمل کرد به تری را دارا می‌باشند، موضوع مورد بحث در این مقاله نمی‌باشد. اما بحثی که در اینجا مطرح است، ایجاد امکان ارسال داده‌های فراسامانه اندازه‌گیری به خارج از کشور، در صورت استفاده از فناوری‌هایی مانند DASH7 و Sigfox که از فضای ابری به عنوان شبکه واسطه استفاده می‌کنند، است. از این‌رو، استفاده از این گونه فناوری‌ها به عنوان زیرساخت مورد نیاز جهت راه‌اندازی فراسامانه اندازه‌گیری از لحاظ مباحث مربوط به پدافند غیرعامل توصیه نمی‌شود (<https://rc.majlis.ir/fa/law/show/1033103/>).

۷-۳- سهولت طراحی و توسعه پذیری شبکه

یکی از محدودیت‌های طراحی شبکه ارتباطی، انتخاب و محدودیت‌های فرکانس کاری هر فناوری می‌باشد. استفاده از محدوده فرکانسی کمتر از 1GHz و در هر کشور بسته به قوانین و مقررات رادیویی متفاوت می‌باشد. به عنوان نمونه می‌توان به محدودیت بکارگیری فناوری‌های 802.11af و Weightless-W، با توجه عدم مجوز استفاده از محدوده فرکانسی سفید تلویزیون در اکثر کشورها اشاره نمود.

طراحی، عیب‌یابی و توسعه شبکه‌های مبتنی بر فناوری‌هایی که از توپولوژی ستاره استفاده می‌نمایند نسبت به فناوری‌هایی که از توپولوژی مش استفاده می‌کنند، به دلیل اینکه داده‌ها برای رسیدن به مقصد مجبور نیستند گره‌های مختلفی را طی کنند ساده‌تر می‌باشد. عیب توپولوژی ستاره وابستگی شبکه به یک نقطه مرکزی یا دروازه می‌باشد و در صورت بروز هرگونه اشکال در عملکرد دروازه، عملکرد کل شبکه مختل می‌گردد. در این توپولوژی بین هر تجهیز و دروازه شبکه تنها یک مسیر وجود دارد. از این‌رو، این توپولوژی در مقایسه با سایر توپولوژی‌ها از قابلیت اطمینان پایین‌تری در ارسال و دریافت داده برخوردار می‌باشد. همچنین در توپولوژی ستاره در برخی موارد به دلایل گوناگونی مانند وجود ساختمان بلند، امکان برقراری ارتباط مستقیم نود با دروازه شبکه وجود ندارد. یکی از روش‌های حل این مشکل استفاده از توپولوژی مش می‌باشد.

شبکه‌های مبتنی بر فناوری‌های مانده 802.11ah و Dash7 که از سازوکار CSMA/CA استفاده می‌نمایند به دلیل استفاده از روش پی‌شگیزی از تصادم در مقابله با فناوری‌های مانده Sigfox و LoRaWAN که از سازوکار ALOHA استفاده می‌کنند به ازای افزایش تاخیر در ارسال پیام، نرخ خطای بیت کمتری دارند.

۹-۳- طول عمر باتری

کنتورهای برق به خاطر اتصال به برق شهر نیاز به باتری ندارند. از طرفی میزان مصرف انرژی فناوری ارتباطی در کنتور را نیز می‌توان با برنامه‌ریزی مدت زمان خواب و بیداری فناوری کنترل کرد. از این‌رو، در راه‌اندازی فراسامانه اندازه‌گیری، مساله عمر باتری و مصرف انرژی در انتخاب فناوری محدودیت جدی ایجاد نمی‌کند.

برای جمع‌بندی مطالبی که تا اینجا بیان شد، فناوری‌های مخابراتی بیسیم کاربردی در فراسامانه اندازه‌گیری بر اساس معیارهای انتخاب فناوری پیشنهاد شده مطابق جدول ۳ خلاصه می‌گردد.

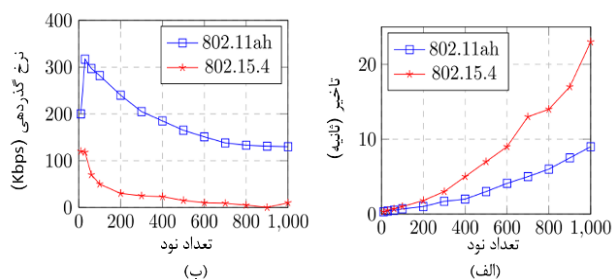
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، چندین معیار کیفی برای انتخاب فناوری بیسیم مناسب جهت زیرساخت مخابراتی فراسامانه اندازه‌گیری شبکه هوشمند برق ایران پیشنهاد گردیده است. ابتدا، فناوری‌های پیشنهاد شده را می‌توان در سطح جهانی، شامل Bluetooth، Wi-Fi، Z-Wave، 802.15.4، RPMA، NB-IoT، LoRaWAN، Sigfox، 802.15.4، 802.11ah، Weightless-P و Dash7 معرفی می‌شوند. پارامترهای لایه فیزیکی و دسترسی به رسانه این فناوری‌ها، شامل توپولوژی، میزان پوشش‌دهی، نرخ بیت داده، فرکانس کاری، سازوکار دسترسی به رسانه و انحصاری یا منبع باز بودن اجزای فناوری با هم مقایسه می‌گردند. سپس، بر اساس اولویت‌های عملی و اجرایی، معیارهای زیر برای مقایسه این فناوری‌ها پیشنهاد می‌شوند: پشتیبانی فناوری در ایران، فناوری‌های منبع باز یا انحصاری، هزینه راه‌اندازی و نگهداری شبکه، نرخ ارسال داده، تداخل، امنیت داده و پدافند غیرعامل، سهولت طراحی و توسعه‌پذیری شبکه، سازوکار دسترسی به رسانه و طول عمر باتری.

در زیرساخت مخابراتی فراسامانه اندازه‌گیری شبکه هوشمند برق ایران، یک فناوری از نظر خدمات پشتیبانی در صورتی مناسب است که ضمن وجود شرکت‌های پشتیبانی‌کننده و همچنین سهولت دسترسی به تجهیزات مختلف شبکه در کشور، حداقل تاثیر پذیری را در برابر تحریم‌ها داشته باشد. همچنین، هزینه راه‌اندازی و نگهداری فناوری باید دارای توجیه اقتصادی باشد. فناوری انتخابی باید کمترین تداخل را با سایر شبکه‌ها داشته باشد و نیز از قابلیت اطمینان بالایی در برقراری، صحت، تداوم و امنیت ارتباط برخوردار باشد. امکان حذف و اضافه آسان اجزای مختلف شبکه و نیز قابلیت استفاده بهینه از منابع

توپولوژی مش به دلیل وجود مسیرهای گوناگون ارتباطی بین دو تجهیز، به ازای افزایش پیچیدگی شبکه از قابلیت اطمینان بالاتری در برقراری ارتباط در مقایسه با سایر توپولوژی‌ها برخوردار می‌باشد. بدین سبب، طراحی و توسعه‌پذیری شبکه‌های مبتنی بر فناوری‌های LPWAN، شبکه‌های سلولی و 802.11ah که از توپولوژی ستاره استفاده می‌کنند نسبت به فناوری‌هایی مانند 802.11s و 802.15.4g که از توپولوژی مش استفاده می‌کنند ساده‌تر می‌باشد. فناوری 802.11ah در کنار توپولوژی ستاره قابلیت بکارگیری در ساختار درختی را نیز دارد. نکته محدودکننده در این فناوری، تعداد رله‌ها در ساختار درختی است. افزایش رله‌ها تا بیش از ۲ رله، باعث کاهش کارایی، افزایش پیچیدگی شبکه و مصرف انرژی می‌شود (Ahmed et al. 2016).

به طور کلی، با توسعه یک شبکه ارتباطی و افزایش تعداد تجهیزات فعال شبکه، با مشکل افزایش تاخیر در ارسال و دریافت داده و نیز کاهش نرخ گذردهی شبکه مواجه خواهیم بود. با این وجود بسته به نوع فناوری ارتباطی که در شبکه بکارگرفته است، میزان افزایش و کاهش تاخیر و نرخ گذردهی متفاوت می‌باشد. به عنوان نمونه، همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شده است با افزایش تعداد نودها (کنتورهای هوشمند) عملکرد فناوری 802.11ah در مقایسه با 802.15.4g از لحاظ تاخیر و نرخ گذردهی شبکه به تر می‌باشد (Ahmed et al. 2016).



شکل (۴): مقایسه الف) تاخیر، ب) نرخ گذردهی شبکه مبتنی بر دو فناوری 802.11ah و 802.15.4g به ازای افزایش تعداد نود شبکه (Ahmed et al. 2016).

۸-۳- سازوکار دسترسی به رسانه

از جنبه سازوکار دسترسی به رسانه، احتمال تصادم در ارسال داده در سازوکارهایی مانده ALOHA و CSMA/CA که در آن تجهیزات (کنتورهای هوشمند) برای دسترسی به رسانه با یکدیگر رقابت می‌کنند در مقایسه با سازوکارهایی مانده TDMA، CDMA و FDMA که در آن تخصیص منابع (فرکانس و زمان) برای تجهیزات به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود، بالاتر می‌باشد. سازوکار دسترسی به رسانه OFDMA نیز به دلیل مختلفی چون تخصیص بهینه منابع به تجهیزات و استفاده همزمان ویژگی‌های TDMA و FDMA نسبت به سایر سازوکارهای معرفی شده در این مقاله کارایی بهتری دارند.

جدول (۳): مقایسه فناوری‌های مخابراتی بیسیم کاربردی در فراسامانه اندازه‌گیری براساس معیارهای انتخاب فناوری

معیار انتخاب فناوری	قابلیت پشتیبانی فناوری در ایران	فناوری منبع باز یا انحصاری	هزینه استفاده از فناوری در راه‌اندازی شبکه‌های بزرگ	امکان ایجاد شبکه اختصاصی برای شرکت برق	نحوه طراحی و توسعه پذیری	دسته بندی نرخ ارسال داده	حداکثر طول عمر باتری	تداخل پذیری
Bluetooth	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	ساده	دسته ۴	در اینجا مطرح نمی‌باشد	زیاد
802.11s	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	پیچیده	دسته ۵	در اینجا مطرح نمی‌باشد	زیاد
IEEE802.15.4	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	پیچیده	دسته ۴	در اینجا مطرح نمی‌باشد	متوسط / زیاد (وابسته به فرکانس کاری)
IEEE802.15.4g	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	پیچیده	دسته ۴	در اینجا مطرح نمی‌باشد	متوسط / زیاد (وابسته به فرکانس کاری)
802.11ah	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	ساده	دسته ۵	در اینجا مطرح نمی‌باشد	متوسط
Sigfox	دارد (بستگی به تحریم دارد)	انحصاری به جز تجهیزات انتهایی	متوسط	دارد	ساده	دسته ۱	۱۰ سال	متوسط
Lorawan	دارد	منبع باز به جز لایه فیزیکی	متوسط	دارد	ساده	دسته ۲	۱۰ سال	متوسط
NB-IoT	دارد	انحصاری	کم	ندارد (وابسته به شبکه سلولی است)	ساده	دسته ۴	۱۰ سال	کم
EC-GSM-IoT	اعلام نشده	انحصاری	کم	ندارد (وابسته به شبکه سلولی است)	ساده	دسته ۴	بیش از ۱۰ سال	کم
LTE-M	اعلام نشده	انحصاری	کم	ندارد (وابسته به شبکه سلولی است)	ساده	دسته ۵	۱۰ سال	کم
Weightless-P	ندارد	منبع باز	متوسط	دارد	ساده	دسته ۲	۳ تا ۸ سال	متوسط
RPMA	ندارد	انحصاری	متوسط	دارد	ساده	دسته ۴	بیش از ۱۰ سال	زیاد
Dash7	ندارد	منبع باز	متوسط	دارد	ساده	دسته ۳	۱۰ سال	متوسط
NB-Fi	ندارد	انحصاری	متوسط	دارد	ساده	دسته ۱	بیش از ۱۰ سال	متوسط

مراجع

- Akyol, B. A., Kirkham, H., Clements, S. L., Hadley, M. D., (2010). A survey of wireless communications for the electric power system, Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington.
- Aznaveh, F. Y., Bassiri, M. M., (2019). Evaluation of using LoRaWAN to implement AMI in big city of Tehran, In 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT), pp. 1-4.
- Abbasi, M., Khorasanian, S., Yaghmaee, M. H., (2019). Low-power wide area network (lpwan) for smart grid: An in-depth study on lorawan, In 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI), pp. 022-029.
- Ayoub, W., Samhat, A., Nouvel, F., Mroue M., Prevotet, J., (2018). Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility, IEEE Communications Surveys Tutorials, 21(2), pp.1561 – 1581. In press, DOI 10.1109/COMST.2018.2877382
- Aalamifar, F., Lampe, L., (2018). Cost-efficient QoS-Aware Data Acquisition Point Placement for Advanced Metering

جهت دسترسی به رسانه، از دیگر مواردی است که در انتخاب فناوری باید مورد توجه قرار گیرند. شایان توجه است که بکارگیری یک فناوری واحد مخابراتی موجب یکپارچگی، کاهش پیچیدگی و نیز نگهداری ساده‌تر شبکه می‌گردد، ولی با توجه به این که نیازمندی‌های در بخش‌های مختلف شبکه متفاوت هستند، زیرساختی که در یک بخش از شبکه بهینه است ممکن است انتخاب خوبی برای بخش دیگری از شبکه نباشد. از این‌رو، جهت مدیریت و کاهش هزینه‌های شبکه، بسته به پراکندگی و تراکم کنتورهای هوشمند در هر منطقه و نیز وسعت ناحیه مورد نیاز، انتخاب یک یا چند فناوری از میان فناوری‌های برد متوسط و بلند جهت راه‌اندازی فراسامانه اندازه‌گیری توصیه می‌گردد. با این وجود، تصمیم‌گیری قطعی در مورد اینکه کدام یک و تا چه محدوده جغرافیایی از یک فناوری استفاده گردد، نیازمند ارزیابی اقتصادی و بهینه‌سازی پارامترهای شبکه است.

- Environments, Electronics, 9(8), DOI 10.3390/electronics8090972.
- Korkmaz, T., Sarac, K., (2010). Characterizing link and path reliability in large-scale wireless sensor networks, in: Proceedings of 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, pp. 217–224.
- Li, Y., Cheng, X., Cao, Y., Wang, D., Yang, L., (2018). Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT), IEEE Internet of Things Journal, 5(3), pp. 1505 – 1515.
- Mulla, A., Baviskar, S., Khare, N., Kazi, F., (2015). The Wireless Technologies for Smart Grid Communication: A Review, In Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), pp. 442–447.
- Mroue, H., Nasser, A., Hamrioui, S., Parrein, B., Motta-Cruz, E., Rouyer, G., (2018). MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT, in Proc. IEEE Middle East and North Africa Commun. Conf (MENACOMM), pp. 1–5.
- Nejad, H. M., Movahhedinia, N., Khayyambashi, M. R., (2017). Provisioning required reliability of wireless data communication in smart grid neighborhood area networks, The Journal of Supercomputing, 73(2), pp. 866–886.
- Orfanidis, C., Feeney, L. M., Jacobsson, M., Gunningberg, P., (2017). Investigating interference between LoRa and IEEE 802.15.4g networks, in Proceedings of the 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp. 1–8.
- Rezagholizadeh, M., Mehrannia, P., Barzegar, A., Fereidunian, A., Moshiri, B., Lesani, H., (2013). A probabilistic partial order theory approach to IT infrastructure selection for Smart Grid, 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 488-493, DOI 10.1109/ICCAS.2013.6703983.
- Raza, U., Kulkarni, P., Sooriyabandara, M., (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(2), pp. 855-873.
- Rama, Y., Ozpmar, M. A., (2018). A Comparison of Long-Range Licensed and Unlicensed LPWAN Technologies According to Their Geolocation Services and Commercial Opportunities, 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), pp. 398-403.
- Saputro, N., Akkaya, K., (2017). Investigation of Smart Meter Data Reporting Strategies for Optimized Performance in Smart Grid AMI Networks, IEEE Internet of Things Journal, 4(4), pp. 894-904.
- Shah, K., Notor, J., Godfrey, T., Rolfe, B., Seok, Y., Baycas, T., Khatibi, F., (2018). Smart Grid Standards for Operation in Sub-1 GHz Bands, an IEEE White Paper.
- Tiurlikova, A., Stepanov, N., Mikhaylov, K., (2018). Method of assigning spreading factor to improve the scalability of the LoRaWAN wide area network, in 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 1-4.
- U. S. DOE, (2010). Communications requirements of Smart Grid technologies, Tech. Rep., US Department of Energy, <https://www.energy.gov/gc/downloads/communications-requirements-smart-grid-technologies/>. Accessed May 7, 2021.
- Infrastructure, IEEE Transaction on Communications, 66(12), pp. 6260-6274, DOI 10.1109/TCOMM.2018.2858263.
- Ahmed, N., Rahman, H., Hussain, M. I., (2016). A comparison of 802.11ah and 802.15.4 for IoT, ICT Exp, 2(3), pp.100–102.
- Ahmad, A. I., Ray, B., Chowdhury, M., (2019). Performance evaluation of lorawan for mission-critical iot networks, International Conference on future Network systems and security, springer, Cham, pp. 37–51.
- Balachandran, K., Olsen, R. L., Pedersen, J. M., (2014). Bandwidth analysis of smart meter network infrastructure, In 16th International Conference on Advanced Communication Technology, pp. 928-933.
- Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M., Ngqondi, T., (2019). A survey on low-power wide area networks for IoT applications, Telecommunication Systems, 71(2), pp. 249–274. DOI <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00557-9>
- Dragičević, T., Siano, P., Prabakaran, S. R., (2019). Future generation 5G wireless networks for smart grid: A comprehensive review, Energies, 12(11).
- Deng, X., He, T., He, L., Gui, J., Peng, Q., (2017). Performance analysis for IEEE 802.11s wireless mesh network in smart grid, Wireless Personal Communications, 96(1), pp. 1537–1555.
- Ertürk, M. A., Aydın, M. A., Büyükakkaslar, M. T., Evirgen, H., (2019). A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies, Future Internet, 11(10), DOI 10.3390/fi11100216.
- Finnegan, J., Brown, S., (2018). A Comparative Survey of LPWA Networking, arXiv preprint arXiv: 1802.04222.
- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G. P., (2011). Smart grid technologies: Communication technologies and standards, IEEE transactions on Industrial Informatics, 7(4), pp. 529-539.
- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G. P., (2013). A survey on smart grid potential applications and communication requirements, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 9(1), pp. 28-42.
- <https://www.sigfox.com/en>. Accessed Apr 8, 2020.
- <https://www.ingenu.com/technology/rpma/competition/>. Accessed Apr 8, 2020.
- <https://www.parsnet.io/>. Accessed Apr 8, 2020.
- <https://irancell.ir/portal/>. Accessed Apr 8, 2020.
- <https://mci.ir/news>. Accessed Apr 8, 2020.
- <https://www.esmcell.com/>. Accessed Apr 8, 2020.
- <http://www.fancomkish.com/fancomkish-and-lora-alliance/>
- <https://www.toosfuse.com/news/960801/>. Accessed Sep 27, 2020.
- <https://rc.majlis.ir/fa/law/show/1033103/>. Accessed Oct. 26, 2020.
- <https://witekio.com/lorawan-a-dedicated-iot-network/>. Accessed Sep 26, 2020.
- <https://techblog.comsoc.org/tag/lorawan-sigfox/>. Accessed Apr 8, 2020.
- Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., (2013). Assessment of communication technologies and network requirements for different smart grid applications, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT).pp. 1-6.
- Kabalci, Y., Kabalci, E., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., Blaabjerg, F., (2019). Internet of Things applications as energy internet in Smart Grids and Smart

Zamani, M.A., Fereidunian, A., Jamalabadi, H. R., Boroomand, F., Sepehri, P., Lesani, H., Lucas, C., (2010). Smart grid IT infrastructure selection: A T3SD Fuzzy DEA approach, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), pp. 1-7, DOI 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638955.

حسینی سنو، سید امین؛ شهریاری، شیرزاد، (۱۳۹۴). مرجع کامل شبکه های بیسیم و سیار (اصول پروتکل ها، معماری، شبیه سازها)، ویرایش اول، دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات جهاد دانشگاهی.
 رحمانی، معصومه؛ (۱۳۹۴). مطالعه و بررسی چالش ها و نیازمندی های مخابراتی زیرسیستم های شبکه هوشمند، سی امین کنفرانس بین المللی برق.
 شریف پور، زهرا؛ علی بخشی، مهدیه، مظفری، مهدیه، (۱۳۹۶). طراحی زیرساخت مخابراتی شبکه هوشمند در پابلوت نمونه، سی و دومین کنفرانس بین المللی برق ایران.
 عزیزی، سعدون؛ کسری رشیدی، (۱۳۹۷). بررسی و مقایسه جامع فناوری های بیسیم برای اینترنت اشیا، علوم رایانشی، ۱۱.
 مدقق، هادی؛ (۱۳۹۴). هوشمند سازی شبکه برق، سمینار شبکه با گرایش شبکه هوشمند و سیستم های نوین SCADA.
 مدقق، هادی؛ رضاییان، میثم، سالک گیلانی، نادر، (۱۳۹۲). تکنولوژی های مخابراتی در سیستم های اندازه گیری هوشمند و طرح فهم، کنفرانس شبکه های هوشمند.
 نغزعلی، مظهره؛ (پاییز ۱۳۹۸). پیاده سازی اینترنت اشیا با استاندارد 802.11ah، پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی برق (مخابرات سیستم)، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده برق و کامپیوتر.
 یغمایی مقدم، محمد حسین؛ (۱۳۹۲). الزامات و نیازمندی های ارتباطی شبکه هوشمند برق، فصل نامه عصر برق، (۲)، صص ۲۴-۲۲.

زیر نویس ها

- ¹ Power Line Carrier (PLC)
- ² Phasor Measurement Unit (PMU)
- ³ Medium Access Control (MAC)
- ⁴ Gateways
- ⁵ Restricted Access Window (RAW)
- ⁶ Low Power Wide Area Network (LPWAN)
- ⁷ Duty Cycle
- ⁸ Narrow Band-IoT (NB-IoT)
- ⁹ LTE-Machine Type Communication (LTE-MTC)
- ¹⁰ Extended Coverage-GSM IoT (EC-GSM-IoT)
- ¹¹ Machine-to- Machine (M2M)
- ¹² Special Interest Group (SIG)
- ¹³ Code Division Multiple Access (CDMA)
- ¹⁴ Random Phase Multiple Access (RPMA)
- ¹⁵ Narrow Band-Fidelity (NB-Fi)
- ¹⁶ Software Defined Radio (SDR)
- ¹⁷ Access Point Name (APN)