Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 48-61

Vol. 10 / No. 3/ Autumn 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

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 Tanakian[1], Mehri Mehrjoo[2], Samira Noferesti[3]
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

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص 61- 48

Vol. 10 / No. 3/ Autumn 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

عیارهای انتخاب فناوری بیسیم مخابراتی برای فراسامانه اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری به عنوان یکی از راهبردهای هوشمندسازی شبکه توزیع برق، جهت ارسال و دریافت میزان مصرف، دیماند، ولتاژ و جریان بین مشترکین و شرکت‌های توزیع برق بکار گرفته می‌شود. برای راه‌اندازی فراسامانه اندازه‌گیری، فناوری‌های بیسیم مخابراتی گوناگونی به عنوان زیرساخت مخابراتی شبکه در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این فناوری‌ها 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 همه‌جانبه نیازمندی‌های 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 فناوری‌های موجود خواهیم داشت. به منظور تفکیک مناسب حوزه عملکرد، فناوری‌ها را در سه دسته، برد کوتاه، برد متوسط و برد بلند، و در دو گروه با فرکانس آزاد و با فرکانس انحصاری تقسیم‌بندی می‌کنیم. همچنین، سازوکار دسترسی هر فناوری به محیط انتقال بی‌سیم را از نظر مناسب بودن آن از نظر تاخیر ارسال و حجم ارسال اطلاعات بررسی می‌نماییم، سپس، مجموعه‌ای از معیارهای کیفی برای انتخاب زیرساخت مناسب فراسامانه اندازه‌گیری را معرفی می‌نماییم. پشتیبانی فناوری در ایران، منبع باز یا انحصاری بودن فناوری، هزینه راه‌اندازی و نگهداری شبکه که از دیدگاه اجرایی از اولویت بالایی برخوردارند، را به عنوان معیار ارزیابی فناوری‌ها پیشنهاد می‌دهیم. در انتها، همه فناوری‌های معرفی شده در مقاله را براساس معیارهای معرفی شده مورد نقد و ارزیابی قرار می‌دهیم.**

واژه‌های کلیدی: **فناوری‌های بیسیم مخابراتی، فراسامانه اندازه‌گیری، شبکه هوشمند برق**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول : مهری مهرجو

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

۱- مقدمه

شبکه هوشمند برق، یک سیستم قدرت است که در آن فناوری های 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 سیستم ها و تجهیزات اندازه‌گیری با قابلیت کنترل از راه دور و بسترهای مخابراتی مانند فیبرنوری و پی ال سی[1]، 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، پیاده سازی 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 پریود یک نزدیک به زمان حقیقی یا در زمان حقیقی، از سمت مصرف‌کننده دریافت می‌کند. این سیستم با ایجاد بستر مخابراتی دو طرفه قابلیت قرائت، پیکربندی، نظارت و کنترل از راه دور کنتور ها 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 و هزینه مصرف، زمینه اصلاح الگوی مصرف را فراهم می‌آورد و از سویی 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 نیازمندی های مخابراتی راهبردهای مختلف شبکه هوشمند برق، ۲) مقایسه و بررسی فناوری مخابراتی کاربردی در شبکه هوشمند برق، ۳) تعیین معیار های انتخاب فناوری مخابراتی و ۴) ارزیابی عملی و بهبود کارایی فناوری انتخاب شده.

اولین بخش در طراحی زیر ساخت مخابراتی شبکه هوشمند، شناخت نیازمندی‌های ارتباطی شبکه است. در (U.S.DOE. 2010, Balachandran et al. 2014) به معرفی این نیازمندی ها از جمله امنیت، قابلیت اطمینان، پهنای‌باند 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 کدگزاری شده و فاصله زمانی ارسال نمونه‌ها محاسبه می‌شود که این پارامترها خود به نیازمندی های فنی خاص شبکه هر کشور بستگی دارد.

شناخت و بررسی فناوری‌های مخابراتی که پاسخگوی نیاز شبکه هوشمند می‌باشند، دومین قدم در انتخاب زیر ساخت است. مقالات (مدقق و همکاران. ۱۳۹۲ ,Gungor et al. 2011, Kuzlu at al. 2013, 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 at 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 فناوری های بیسیم و باسیم قابل استفاده در شبکه هوشمند پرداخته است. فناوری های مخابراتی بیسیم مطرح شده در این مقالات، مانند WiMaxو Zigbee، نسبت به فناوری‌های سیمی مانند پی ال سی و فیبر نوری، توسعه‌پذیری راحت‌تر و هزینه نصب و راه‌اندازی پایین‌تری دارند، ولی از لحاظ امنیت، پهنای باند، میزان نویزپذیری و تداخل دارای محدودیت های 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 LoRaWAN، 5G و Sigfox با قابلیت های پشتیبانی هزاران نقطه، توان مصرفی پایین و پوشش جغرافیایی وسیع پرداخته‌اند. در این مقالات، این فناوری ها از نظر نرخ بیت داده، مدولاسیون، سطح پوشش، فرکانس‌کاری و برخورداری فاکتورهای مورد نیاز شبکه هوشمند مقایسه شده‌اند.

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

سازگاری‌پذیری 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 المان های مختلف در شبکه هوشمند برقرار شود. هم‌گامی زمانی در برخی از دستگاه های موجود در شبکه برق، مانند واحد اندازه‌گیری فازور (PMU[2])، مورد استفاده قرار می‌گیرد که جهت انجام محاسبات خود به

استخراج پارامترهای الکتریکی پ ست ها، خ طوط و تراز سفورماتورها در مقیاس زمانی دقیق نیاز دارند. با توجه به اینکه در شبکه هو شمند برق یک پیام داده ممکن است در یک لحظه در چند برنا مه کاربردی مورد استفاده قرار گیرد، به جای این که چ ندین پ یام به صورت جداگا نه آدرس‌دهی و ارسال شوند، پیام چندپخ شی تو سط سوییچ به صورت همزمان به چندین مقصد موردنظر ارسال می گردد. معیار های معر فی شده در م قالات (رح مانی. ۱۳۹۴، یغ مایی. ۱۳۹۲، Gungor et al. 2013) به صورت فراگیر جهت استفاده در تمام کشورها ارائه شده ا ست. برخی از معیارهای معرفی شده مم کن ا ست برای یک کاربرد خاص اولویت نداشته باشد.

به عنوان نمونه، میزان تاخیر در ارسال و دریافت اطلاعات، از چ ند میلی‌ثانیه تا چند دقیقه به ترتیب برای اتوما سیون شبکه توز یع برق و فراسامانه اندازه‌گیری که دارای اطلاعات حساس و غیرحساس به تاخیر 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 این‌رو، در عمل باید معیارهای دیگری متناسب با شرایط شبکه در هر ک شور تعر یف شود. در(Rezagholizadeh et al. 2013, Zamani et al. 2010) برای کاربرد اتوما سیون مدیریت ا نرژی، ج هت انتخاب فناوری مناسب از بین ف ناوری های کا نال ا ستیجاری شرکت مخابرات، پی ال سی و رادیو طیف گسترده، از یک روش ریاضی ا ستفاده شده است. در این راستا، شاخص‌های متوسط عدم دستر سی به ا نرژی (ASUI) و متوسط زمان قطعی مشترک به ازای هر بار ق طع (CAIDI) به عنوان معیارهای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه توز یع و همچ نین در نظرگرفتن هزینه‌های مربوط به ساخت، اجرا و نگهداری شبکه هو شمند مورد استفاده قرار گرفته است.

آخرین بخش از تحقیقات، ارزیابی عملی ف ناوری انت خاب شده به صورت اجرای پایلوت نمونه و یا انجام عمل یات شبیه سازی و همچ نین ارائه راهکار درخصوص بهبود عملکرد فناوری می‌باشد که در (شریف‌پور و هم کاران. ۱۳۹۶، Aznaveh et al. 2019, Abbasi et al. 2019, Tiurlikova et al. 2018) به آنها اشاره شده است. مقاله (شریف پور و همکاران. ۱۳۹۶) هوشمندسازی شبکه برق جز یره هر مز را با ا جرای اتوماسیون توزیع، فراسامانه اندازه‌گیری، خودرو برقی و پاسخگویی بار به وسیله فناوری‌هایی مانند فیبرنوری، کانال مایکروویو ا ستیجاری شرکت مخابرات، GPRS شبکه سلولی، به دل یل در د سترس بودن ب سترهای مخابراتی و صرفه اقتصادی، گزارش نموده است. م قالات (Aznaveh et al. 2019, Abbasi et al.2019) عملکرد فناوری LoRaWAN را برای فراسامانه اندازه‌گیری شبیه‌سازی نموده و نشان داده‌ا ند که با ا فزایش تعداد نقاط شبکه میزان تصادم در شبکه به شدت افزایش پیدا می‌ک ند. در این راستا، مقاله (Tiurlikova et al.2018) با ارا ئه راه کاری برای افزایش مقیاس پذیری ف ناوری LoRaWAN، مق یاس پذیری را برای ۵۰۰۰ کنتور و ۱۰۰۰۰ کنتور به ترتیب ۲۰٪ و ۴۰٪ ارتقا می‌دهد.

مرور تحقیقات موجود نشان می‌دهد که ا مروزه به خاطر مزا یای متعدد شبکه بی سیم، ف ناوری های بی سیم مت عددی برای ا ستفاده در فراسامانه اندازه‌گیری پی شنهاد شده ا ست (مدقق و هم کاران. ۱۳۹۲ Gungor et al. 2011, Kuzlu at 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 ف نی دارای شباهت‌ها و ت فاوت هایی بوده و هر کدام سهمی از بازار را به خود اختصاص داده و در ک شور های مخت لف ضریب ن فوذ گو ناگونی را دارا می‌باشند. حال این سوال مطرح است که با چه معیار هایی می توان 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 فرا سامانه ا ندازه‌گ یری ب کارگرف ته شده‌ا ند، می پردازیم. در ب خش سوم، معیار های مختل فی برای مقای سه ا ین فناوری‌ها، مثل پشتیبانی فناوری در ایران، منبع باز یا انح صاری بودن، هزینه راه‌اندازی و نگهداری شبکه، نرخ ارسال داده، تداخل، امنیت داده و پدافند غیرعامل، سهولت طراحی و توسعه‌پذیری، سازوکار دستر سی به رسانه[3] و طول عمر باتری معرفی می‌ک نیم. در انت ها در ب خش چ هارم، نتیجه‌گیری مقاله حاصل از مقایسه این فناوری‌ها را ارائه می‌نماییم.

۲- معرفی فناوری‌های مخابراتی بیسیم

فناوری‌های بیسیم از سه جنبه با ند فرکان سی، توپو لوژی و برد ار سال دسته‌بندی می‌شوند. از جنبه باند فرکانسی، ف ناوری های بی سیم 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، ترک یب 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 صدمتر 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 ا ستفاده قرار می‌گیرند. در معماری شبکه‌های مبتنی بر فناوری‌هایی که از توپو لوژی مش استفاده می‌کنند، هر یک از تجه یزات شبکه به ع نوان م سیریاب شبکه عمل می‌کنند و بطور مستقیم به یک یا چند تجه یز دی گر شبکه متصل هستند. همچنین فناوری‌ها با محدوده تحت پوشش چند کیلومتر به دلیل محدوده تحت پوشش وسیعی که دارند، با توپولوژی ستاره ب کار گرفته می‌شوند.

معماری شبکه‌های مبتنی بر توپولوژی ستاره، مطابق شکل ۱، شامل بلوک‌های تجهیزات انتهایی (م ثل ح سگر، عمل گر و ک نتور هو شمند)، تجهیزات رادیویی و دروازه‌ها[4]، شبکه واسط ارتباطی (مثل شبکه سلولی

LTE/3G، Ethernet و یا فضای ابری)، سرویس‌دهنده شبکه و نرم‌افزارهای کاربردی می‌باشد. این شبکه ها در نحوه ارتباط تجهیزات انتهایی با دروازه ها و نوع شبکه واسط ارتباطی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. به عنوان نمونه، در شبکه‌های مبتنی بر فناوری LoRaWAN هر تجهیز انتهایی ارسال داده را به صورت همه‌پخشی انجام می‌دهد که به موجب آن تمام دروازه‌هایی که در برد فرستنده هر تجهیز قراردارند امکان دریافت داده‌های ارسالی را دارند. اما در شبکه های مبتنی بر فناوری Dash7، هر تجهیز انتهایی ارسال داده را تنها به دروازه‌ای با بهترین سطح قدرت سیگنال انجام می‌دهد(Ayoub et al. 2018). درخصوص نوع شبکه واسط ارتباطی، شبکه‌های مبتنی بر فناوری هایی مانند Sigfox و Dash7 از فضای ابری و در LoRaWAN نیز از LTE/3G و Ethernet به عنوان شبکه واسط ارتباطی استفاده می گردد (Ayoub et al. 2018). فضای ابری که مجموعه‌ای از کامپیوترها است با امکان ذخیره و کنترل اطلاعات از راه دور، موجب افزایش دسترس‌پذیری و انعطاف‌پذیری شبکه و کاهش هزینه خرید و نگهداری تجهیزات ذخیره‌سازی و نرم‌افزارهای مختلف می‌گردد.

شکل (۱): معماری زیرساخت ارتباطی با توپولوژی ستاره

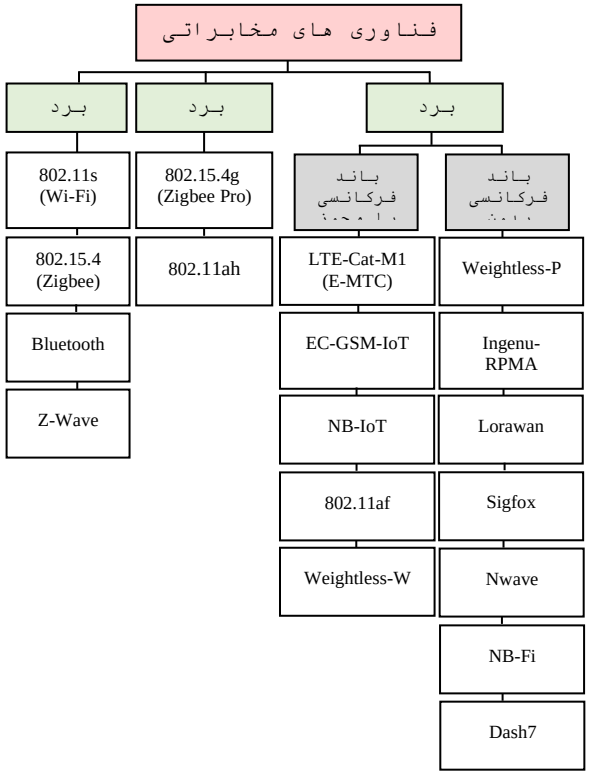
مطابق شکل ۲، از لحاظ برد ارسال داده فناوری های بی سیم را می‌توان به سه دسته برد کوتاه، برد متوسط و برد بلند تقسیم نمود. برد کوتاه به ارسال پیام تا حدود ۱۰۰ متر، برد متوسط تا حدود ۱ کیلومتر و برد بلند به ارسال تا چند (معمولا ۵) کیلومتر اطلاق می‌شود. فناوری‌های برد کوتاه و برد متوسط به علت محدودیت در مسافت ارسال پیام، برای شبکه‌های دیگر تداخل زیادی ایجاد نمی‌کنند؛ از این‌رو، در باند فرکانسی بدون مجوز از آنها استفاده می‌شود. اما فناوری‌های بیسیم برد بلند، برای کاهش تداخل یا باید از باند مجوزدار استفاده کنند و یا در صورت استفاده از باند بدون مجوز، روش‌هایی برای کاهش تداخل بکار گیرند. برای مثال، ارسال داده در زمان‌ها، فرکانس‌ها، فازها و مسیرهای مختلف می‌تواند باعث کاهش تداخل گردد(حسینی سنو و همکاران. ۱۳۹۴). در بخش بعدی به معرفی این فناوری‌ها خواهیم پرداخت.

۲-۱- فناوری‌های برد کوتاه

هزینه و توان مصرفی پایین و سادگی از مشخصه‌های اصلی این فناوری‌ها به شمار می‌آیند. با توجه به برد ارسال کوتاه، از چند ده تا چند صد متر، از این فناوری ها در شبکه های بزرگ، معمولا به صورت ترکیب با فناوری‌های برد بلند استفاده می‌شوند(Nejad et al .2017). رایج‌ترین فناوری‌های برد کوتاه، Bluetooth، Z-Wave، 802.15.4(Zigbee) و بعضی از نسخه‌های برد کوتاه 802.11 با نام تجاری Wi-Fi می‌باشند. نسخه‌های متنوعی از Wi-Fi با فرکانس‌کاری، پهنای باند، نوع توپولوژی، میزان پوشش و نرخ ارسال داده موجود است (حسینی سنو و همکاران. ۱۳۹۴). نسخه برد کوتاه این فناوری، نسخه 802.11s است که در شبکه‌های هوشمند به دلیل پشتیبانی از توپولوژی مش محبوبیت بیشتری دارد (Saputro et al.2017, Deng et al. 2017). در مقایسه با سایر فناوری‌های برد کوتاه، فناوری Wi-Fi دارای نرخ بیت داده و توان مصرفی بالاتر می‌باشد (عزیزی و همکاران. ۱۳۹۷).

۲-۲- فناوری‌های برد متوسط

فناوری‌های برد متوسط در محدوده‌ای از چند صد متر تا یک یا دو کیلومتر را پوشش می‌دهند. دو فناوری شاخص در این دسته، IEEE802.15.4g و IEEE802.11ah می‌باشند، که در جدول ۱ با هم مقایسه شده‌اند(Shah et al. 2018). هر دو فناوری از سازوکار رقابتی CSMA/CA برای دسترسی به رسانه استفاده می‌کنند. در این سازوکار چنانچه تجهیزی قصد 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 می‌افتد تا از تصادم جلوگیری نماید(Aalamifar et al. 2018).



شکل (۲): دسته‌بندی فناوری‌های مخابراتی بیسیم کاربردی در فراسامانه اندازه‌گیری از لحاظ برد ارسال

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 78Mbp	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(RAW[5]) نیز استفاده می‌کند که با دسته‌بندی تجهیزات به گروه‌های کوچک موجب کاهش احتمال تصادم تجهیزات رقابت‌کننده و افزایش قابلیت اطمینان ارسال داده می شود. در یک شبکه بزرگ با ۱۰۰۰ نقطه اتصال، با افزایش تعداد RAW از صفر تا ۸۰، مقدار نرخ گذردهی شبکه از ۲۲٪ تا ۱۰۰٪ قابل افزایش است(نغزعلی. ۱۳۹۸). به طور معمول، توپولوژی فناوری‌های 802.15.4g و 802.11ah 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).

۲-۳- فناوری‌های برد بلند

پرچم‌داران فناوری‌های مخابراتی برد بلند، شبکه های گسترده با توان مصرفی پایین (LPWAN)[6] و شبکه‌های سلولی می‌باشند که به ترتیب از باند فرکانسی بدون مجوز و مجوزدار استفاده می‌کنند(Bembe et al. 2019). LPWANها شبکه‌های 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 مشکل‌آفرین هست، از این‌رو، در فناوری های برد بلند، استفاده از باند فرکانسی مجوزدار بیش از دو دسته فناوری‌های برد متوسط و برد کوتاه به چشم می‌خورد. در ادامه، به بررسی پر کاربردترین فناوری های برد بلند در فرا سامانه اندازه‌گیری، Sigfox، LoRaWAN، NB-IoT، RPMA، Dash7،Weightless و Nb-Fi می پردازیم. فناوری های دیگر، از جمله Telensa و Nwave که به ترتیب در سال های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ ارائه شده‌اند، نیز در کاربرد های فرا سامانه اندازه‌گیری بکار برده شده‌اند(Finnegan et al. 2018)، ولی چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. از این‌رو، در این بررسی به آنها نمی‌پردازیم.

۲-۳-۱- 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 حدود۱۴۰ پیام روزانه می‌باشد که هر پیام به ترتیب دارای حداکثر۱۲ 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 پوشش‌دهی 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 بخش‌های مختلف پیام خود را در بازه های زمانی و فرکانسی متفاوتی ارسال می‌کند.

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

۲-۳-۲- فناوری LoRaWAN

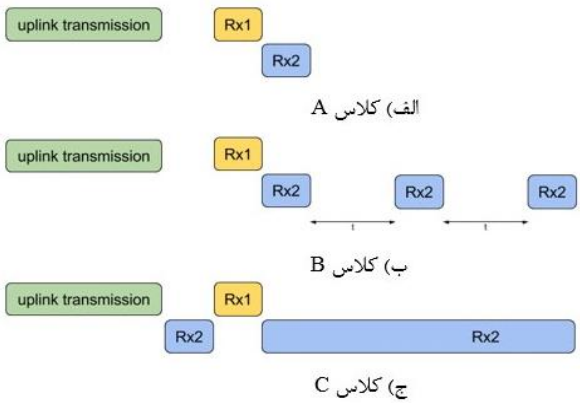
فناوری LoRaWAN در ابتدا توسط شرکت فرانسوی Cyclos معرفی و توسط شرکت Semtech با مشارکت جامعه‌ای از شرکت‌های بزرگ حوزه فناوری مانند IBM، Cisco، HP وFoxconn که LoRa Alliance نام دارد، توسعه یافته و تکمیل شده است(Ahmad et al. 2019). از نظر مدل توسعه، عضویت در LoRa Alliance و مشارکت در توسعه و استفاده از استانداردهای این فناوری برای همه امکان پذیر است. هر شرکت سخت‌افزاری 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 کمپانی‌های NXP و Microchip، از انحصار 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 پایین‌تر 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

متفاوت می‌باشد. برای کاهش تداخل در این فناوری، بسته به باند فرکانسی که در آن بکار گرفته می شود، دوره کاری[7] ۰/۱، ۱ و ۱۰ در صد می‌باشد. به عنوان نمونه دوره‌کاری ۱ درصد به این معنا است که اگر تجهیزی به مدت ۱ ثانیه عمل ارسال داده را انجام دهد در ۹۹ ثانیه بعدی مجاز به ارسال هیچ داده‌ای نمی‌باشد. 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 می‌کند و هم در برابر تداخل و محو شوندگی در کانال بی‌سیم مقاوم است.

در این فناوری ارسال داده‌های فراسو به صورت همه‌پخشی می‌باشد. بدین‌صورت که تمام دروازه‌هایی که در محدوده برد فرستنده تجهیز انتهایی قراردارند می‌توانند داده ارسالی از تجهیز را 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 می‌گردد. در مسیر فروسو، بسته به اهمیت میزان مصرف انرژی و تاخیر در دریافت اطلاعات، تجهیزات انتهایی به سه کلاس مختلف به نام‌های A ، B و C تقسیم‌بندی می‌شوند(Ayoub et al. 2018). در این سه نوع کلاس، داده‌های ارسالی در مسیر فراسو می‌توانند در هر زمان و به صورت تصادفی به جز در زمان دریافت داده های فروسو ارسال شوند. تفاوت این سه کلاس در تعداد دفعات دریافت داده مسیر فروسو بین مدت زمان دو عملیات فراسوی متوالی می‌باشد.

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 فروسو وجود دارد و تجهیز عمدتا به خاطر ذخیره‌سازی انرژی به حالت خواب می رود. در کلاس B امکان دریافت‌های متعدد و زمان‌بندی شده بین دو ارسال فراسو وجود دارد که موجب کاهش تاخیر نسبت به کلاس A می‌گردد. در کلاس C یک تجهیز به جز در زمان ارسال داده در مسیر فراسو همواره آماده دریافت در مسیر فروسو می‌باشد. بنابراین تجهیزات



شکل (۳): کلاس‌های مختلف تجهیزات در فناوری LoRaWAN- (https://witekio.com/lorawan-a-dedicated-iot- network/)

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

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

۳-۳-۲- فناوری NB-IoT[8]

NB-IoT یک فناوری برد بلند با توان پایین است که توسط سازمان استانداردسازی3GPP توسعه داده شده است(Ayoub et al. 2018). شبکه‌های سلولی کنونی، برای کاربردهای متنوعی نظیر ارسال صدا و ارسال داده با سرعت بالا طراحی شده‌اند تا درآمد بیشتری کسب نمایند. از این‌رو، برای ارتباط دستگاه‌های ارزان قیمت که قرار است با حجم کم داده و باتری‌هایی با طول عمر بالا کار کنند بهینه سازی نشده‌اند. فناوریNB-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-MTC[9] و EC-GSM-IoT[10] قرار دارند که توسط اپراتورهای شبکه سلولی برای کاربرد های ماشین به ماشین و اینترنت اشیاء در سال ۲۰۱۶ ارائه شده‌اند. تفاوت این فناوری‌ها با هم در پهنای باند کانال، نرخ بیت داده و نوع مدولاسیون می‌باشد(Bembe et al. 2019).

فناوری NB-IoT نسبت به LTE-M که پیش‌تر و برای ارتباطات ماشین-به-ماشین[11] توسط 3GPP ارایه شده بود، توان مصرفی پایین‌تر، هزینه کمتر و ناحیه پوشش وسیع‌تری را دارا می‌باشد(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 فروسو و فراسو بکار گرفته شده است(Li et al. 2018).

SC-FDMA نیاز به گیرنده پیچیده‌تری دارد. از این‌رو، به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی تجهیزات انتهایی، از این تکنیک جهت دسترسی به رسانه در مسیر فراسو استفاده می شود. هر دو روش OFDMA و SC-FDMA در LTE به کار گرفته می شوند و از تقسیم باند فرکانسی به بخش‌های کوچک‌تر به نام زیرحامل استفاده می‌کنند که باعث انعطاف‌پذیری اختصاص منابع می‌شود. به عبارت دیگر کاربران با نرخ بیت متفاوت، تعداد زیر حامل‌های متفاوتی را در اختیار می‌گیرند. عمود بودن زیرحامل ها در این دو روش دسترسی، امکان استفاده از

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 SIG[12] به عنوان یکی دیگر از توسعه‌دهندگان LPWAN، پروتکل منبع باز Weightless را جهت کاربردهای مختلف در سه فناوری تحت نام های Weightless-W، Weightless-N و Weightless-P ارائه نموده است(Bembe et al. 2019).

فناوری Weightless-W برای ارتباطات دوسویه و کار کردن در طیف فرکانسی سفید تلوزیون بکار گرفته می شود. طیف سفید به آن دسته از فرکانس‌های اختصاص داده شده به یک سرویس پخش‌کننده 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. فرکانس‌کاری در این فناوری نیز کمتر از 1GHz می‌باشد. این فناوری در مقایسه با دو فناوری دیگر، دارای رنج ارسال و 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 اشیاء معرفی شده است(Bembe et al. 2019). در این فناوری، دو روش مختلف دسترسی چندگانه، یکی بر مبنای تقسیم کد متعامد[13](CDMA) و دیگری با فاز تصادفی (RPMA)[14] به ترتیب جهت دسترسی به رسانه در مسیر فرو سو و فرا سو 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 بهبود پیدا کرده، زمان هر تایم اسلات افزایش یافته، یک کد واحد به همه نود ها اختصاص داده شده است و زمان ارسال هر نود در طول یک تایم اسلات می‌تواند متفاوت باشد. یکی از مزیت‌های این فناوری، توسعه‌پذیری بالای 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 انتقال 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 نرخ های ارسال 9.6Kbps و 166.67 Kbps مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری از معدود 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-Fi[15]

فناوری NB-Fi در سال ۲۰۱۱ توسط شرکت آمریکایی WAVIOT ارائه شده است(Bembe et al. 2019). فرکانس‌کاری 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 نرم‌افزار[16] صورت می پذیرد(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 انعطاف پذیری فرستنده وگیرنده را در بکارگیری طیف گسترده‌ای از فرکانس‌ها افزایش می‌دهد. با توجه به مطالبی که تا اینجا در خصوص فناوری‌های برد بلند بیان شد، شباهت ها 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، فناوری های 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

این فناوری‌ها را از نظر معیارهای کیفی انتخاب فناوری مورد بررسی قرار داد. در ادامه به معرفی و بررسی هر کدام از معیارها براساس اولویتی 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 اندازه‌گیری و مدیریت انرژی (فهام) در حال اجرا می‌باشد. در این طرح، جهت انتقال اطلاعات اندازه‌گیری کنتورهای مشترکین صنعتی و کشاورزی به سرویس‌دهنده شبکه، از بستر GPRS شبکه سلولی اپراتور های همراه اول و ایرانسل استفاده می گردد. یکی از مشکلات اجرایی این طرح، جدا از وابستگی به اپراتورهای مذکور، عدم آنتن‌دهی و یا آنتن‌دهی نامناسب شبکه سلولی در برخی از مناطق مورد نظر می‌باشد. در بعضی از شرکت های توزیع نیروی برق، برای برقراری ارتباط با کنتورهای هوشمند خانگی و مجتمع‌های بزرگ به صورت آزمایشگاهی و در سطح محدود از سایر فناوری‌های بیسیم استفاده می‌گردد. به عنوان نمونه، در شرکت توزیع برق شیراز و زنجان از فناوری LoRaWAN و در اردبیل از فناوری Zigbee بهره می‌گیرند. بکارگیری فناوری‌های بیسیم متعدد جهت زیرساخت مخابراتی فراسامانه اندازه‌گیری در کشور، نشان‌دهنده سردرگمی شرکت‌های ذینفع در انتخاب فناوری مناسب و نقش پر اهمیت این انتخاب می‌باشد.

از دیگر فعالیت‌های صورت گرفته جهت هوشمندسازی شبکه برق کشور، سامانه مدیریت داده‌های اندازه‌گیری شده مستمر (مدام) است. این سامانه، در بازه‌های متناوب (۱۵ دقیقه‌ای) با جمع‌آوری اطلاعات کنتورهای نصب شده بر روی فیدرهای ۲۰ کیلوولت پست‌های برق کل کشور، امکان ایجاد گزارش‌گیری از میزان تولید و مصرف برق به عنوان نمونه بر حسب نام پست و یا نام شرکت‌های توزیع را فراهم می‌آورد. بستر مخابراتی مورد استفاده در این سامانه، شبکه فیبرنوری اختصاصی صنعت برق و سرویس Private APN[۱۷] شرکت ایرانسل و همراه اول می‌باشد. این سرویس مجموعه‌ای از پروتکل‌ها است که باعث افزایش امنیت در ارسال داده توسط شبکه سلولی می‌شود.

یک فناوری هر اندازه کاربردی و دارای قابلیت‌های 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 می‌باشد. همه فناوری‌های برد کوتاه و متوسطی که در این مقاله به آنها اشاره شده است، در ایران قابل بکارگیری می‌باشند. ولی از میان فناوری‌های برد بلند اشاره شده در این مقاله، تنها فناوری های Sigfox، NB-IoT و LoRaWAN تاکنون در ایران از پشتیبانی برخوردار بوده‌اند.

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

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

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

تا چندی پیش، شرکت پارس نت نماینده انحصاری Sigfox به شمار می‌آمد که بعد از شروع تحریم ها 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 اشیاء 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). هرچند 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 در صد آن ها 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 کاملا 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 بروزرسانی 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 راه اندازی زیر ساخت فرا سامانه 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 می شود. همچنین بر خی از شرکت های کنتورسازی در کشور مانند " توس فیوز" امکان نصب و پشتیبانی ماژول‌های فناوری NB-IoT و LoRaWAN را در محصولات خود قرار داده‌اند(https://www.toosfuse.com/news/960801/).

۳-۲- 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 لایه های مدل ارتباطی آن‌ها به صورت انحصاری بوده و بخش دیگر به صورت منبع باز می‌باشد و قابلیت دسترسی به اسناد طراحی آن و جود دارد. فناوری Sigfox تمام فناوری از بخش داده‌ها و سرویس‌دهنده ابری تا نرم‌افزار سمت تجهیزات انتهایی را به صورت کامل و انحصاری در 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 کاملا به صورت منبع باز هستند. با توجه به اینکه کشور ما با تحریم های مختلف مواجه است، استفاده از فناوری‌های مخابراتی که تحت انحصار یک شرکت می‌باشند قابل توجیه 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 این‌رو، استفاده از این فناوری ها برای پوشش مناطقی با وسعت کم می‌تواند مفید واقع شود. برخلاف اغلب فناوری‌های برد بلند که دارای رنج ارسال چندین کیلومتری است، رنج ارسال فناوری های Weightless-P و Dash7 به ترتیب حداکثر۲ و ۵ کیلومتر می‌باشد. از این‌رو، 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 زیر ساخت مخابراتی فناوری‌های مبتنی بر شبکه سلولی، هزینه راه‌اندازی اولیه شبکه‌های بزرگ مبتنی بر این فناوری ها نسبت به فناوری های LPWAN کمتر می‌باشد. البته این که آیا با احتساب سایر هزینه های بعدی مربوط به استفاده از این فناوری‌ها، مانند پرداخت هزینه آبونمان به اپراتورهای شبکه سلولی، در مجموع استفاده از این فناوری ها 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 شرکت های برق در مدیریت زیر ساخت 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

۳-۴- 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 LoRaWAN و Weightless-P
- دسته ۳: نرخ ارسال بین 100Kbps تا 200Kbps، مانند Dash7
- دسته ۴: نرخ ارسال بین 200Kbps تا 1Mbps، مانند 802.15.4g، NB-IoT و RPMA
- 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 فناوری های مخابراتی با نرخ ارسال در حد bps 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 اندازه گیری 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.

۳-۵- تداخل

فناوری های مبتنی بر شبکه سلولی مانند NB-IoT در مقابل فناوری‌هایی مانند LPWAN که از باند فرکانسی بدون نیاز به مجوز استفاده می‌نمایند، کمتر دچار مشکل تداخل با سایر شبکه ها 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 بی سیم خانگی و عمومی نظیر Bluetooth و اینترنت اراته شده توسط مودم های Wi-Fi می‌باشد. اما محدوده فرکانسی کمتر از 1GHz نیز با گسترش کاربردهای اینترنت اشیاء به زودی با مشکل تداخل مواجه خواهد شد. در میان فناوری های بررسی شده در این مقاله، فناوری های EC-GSM-IoT، LTE-M و NB-IoT در باند فرکانسی شبکه سلولی و فناوری های Sigfox، LoRaWAN، Dash7، Nb-Fi، Weightless-P و 802.11ah در باندفرکانس کمتر از 1GHz و فناوری های Bluetooth، 802.11s و RPMA در باندفرکانسی 2.4GHz کار می‌کنند. فناوری 802.14.5g نیز قابلیت کار در هر دو باندفرکانسی 2.4GHz و کمتر از 1GHz را دارد. از دیگر محدودیت‌های استفاده از باند فرکانسی بدون مجوز، احتمال تداخل کانال‌های دو شبکه بیسیم با یکدیگر می‌باشند. به عنوان نمونه می‌توان به تداخل برخی از کانال های LoRaWAN با 802.154g اشاره نمود(Orfanidis et al. 2017).

۳-۶- 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 ارسال 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. اینکه کدام یک از این روش های رمزنگاری بکار گرفته شده در این فناوری ها عملکرد بهتری 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 فناوری هایی مانند DASH7 و Sigfox که از فضای ابری به عنوان شبکه واسط ارتباطی استفاده می‌کنند، است. از این‌رو، استفاده از این‌گونه فناوری ها به عنوان زیرساخت مورد نیاز جهت راه‌اندازی فراسامانه اندازه‌گیری از لحاظ مباحث مربوط به پدافند غیرعامل توصیه نمی شود (https://rc.majlis.ir/fa/law/show/1033103/).

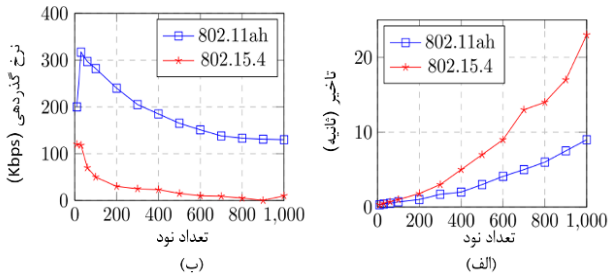
۳-۷- سهولت طراحی و توسعه‌پذیری شبکه

یکی از محدودیت‌های طراحی شبکه ارتباطی، انتخاب و محدودیت‌های فرکانس‌کاری 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 فناوری های 802.11af و Weightless-W، با توجه عدم مجوز استفاده از محدوده فرکانسی سفید تلوزیون در اکثر کشورها اشاره نمود.

طراحی، عیب‌یابی و توسعه شبکه‌های مبتنی بر فناوری هایی که از توپولوژی ستاره استفاده می‌نمایند نسبت به فناوری هایی 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 روش های حل این مشکل استفاده از توپولوژی مش می‌باشد.

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 توپولوژی ها بر خوردار می‌با شد. بدین‌سبب، طراحی و توسعه‌پذیری شبکه‌های مبتنی بر فناوری های 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 ا ستفاده می‌کنند ساده تر می‌با شد. فناوری 802.11ah در کنار توپولوژی ستاره قابلیت بکارگیری در ساختار درختی را نیز دارد. نکته محدود کننده در این فناوری، تعداد رله ها در ساختار درختی است. افزایش رله‌ها تا بیش از ۲ رله، با عث کاهش کارایی، افزایش پیچیدگی شبکه و مصرف انرژی می‌شود (Ahmed et al. 2016).

به طور کلی، با تو سعه یک شبکه ارتباطی و ا فزایش 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 ا فزایش و کاهش تاخیر و نرخ گذردهی متفاوت می‌با شد. به عنوان نمونه، همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شده است با افزایش تعداد نود ها (کنتور های هوشمند) عملکرد فناوری 802.11ah در مقایسه با 802.15.4g از لحاظ تاخیر و نرخ گذردهی شبکه بهتر می باشد (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).

۳-۸- سازوکار دسترسی به رسانه

از جنبه سازوکار دسترسی به رسانه، احتمال تصادم در ارسال داده در سازوکارهایی مانند ALOHA و CSMA/CA که در آن تجهیزات (کنتورهای هوشمند) برای دسترسی به رسانه با یکدیگر رقابت می‌کنند در مقایسه با سازوکارهایی مانند 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. در شبکه‌های مبتنی بر فناوری هایی مانند 802.11ah و Dash7 که از سازوکار CSMA/CA استفاده می‌نمایند به دلیل استفاده از روش پیشگیری از تصادم در مقابل فناوری هایی مانند Sigfox و LoRaWAN که از سازوکار ALOHA استفاده می‌کنند به ازای افزایش تاخیر در ارسال پیام، نرخ خطای بیت کمتری دارند.

۳-۹- 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، فناوری های مخابراتی بیسیم کاربردی در فراسامانه اندازه‌گیری براساس معیار های 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 بیج در سطح جهانی، شامل Bluetooth، Wi-Fi، Z-Wave، 802.15.4، 802.11ah، 802.15.4g، Sigfox، LoRaWAN، NB-IoT، RPMA، NB-Fi، Weightless-P و Dash7 معرفی می شوند. پارامتر های لایه فیزیکی و دسترسی به رسانه این فناوری ها، شامل توپولوژی، میزان پوشش‌دهی، نرخ بیت داده، فرکانس‌کاری، سازوکار دسترسی به رسانه و انحصاری یا منبع باز بودن اجزای فناوری با هم مقایسه می‌گردند. سپس، براساس اولویت‌های عملی و اجرایی، معیار های زیر برای مقایسه این فناوری‌ها پیشنهاد می شوند: 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

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

معیارانتخاب فناوری / نام 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 توسعه‌پذیری	دسته بندی نرخ ارسال داده	حداکثر طول عمر باتری	تداخل پذیری
Bluetooth	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	ساده	دسته۴	در اینجا مطرح نمی باشد	زیاد
802.11s	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	پیچیده	دسته۵	در اینجا مطرح نمی باشد	زیاد
IEEE802.15.4	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	پیچیده	دسته۴	در اینجا مطرح نمی باشد	متوسط / زیاد (وابسته به فرکانس کاری)
IEEE802.15.4g	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	پیچیده	دسته۴	در اینجا مطرح نمی باشد	متوسط / زیاد (وابسته به فرکانس کاری)
802.11ah	دارد	منبع باز از لحاظ فرکانس کاری	زیاد	دارد	ساده	دسته۵	در اینجا مطرح نمی باشد	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	دسته۴	۱۰ سال	کم
EC-GSM-IoT	اعلام نشده	انحصاری	کم	ندارد(وابسته به شبکه سلولی است)	ساده	دسته۴	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	دسته۳	۱۰ سال	متوسط
NB-Fi	ندارد	انحصاری	متوسط	دارد	ساده	دسته ۱	بیش از ۱۰ سال	متوسط

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 می گردد، ولی با توجه به این که نیازمندی های در بخش های 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 راه اندازی فراسامانه اندازه‌گیری توصیه می گردد. با این وجود، تصمیم‌گیری قطعی در مورد این که کدام یک و تا چه محدوده جغرافیایی از یک فناوری استفاده گردد، نیازمند ارزیابی اقتصادی و بهینه‌سازی پارامترهای شبکه است.

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

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, speringer, 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., Prabaharan, 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 چالش‌ها و نیازمندی‌های مخابراتی زیرسیستم‌های شبکه هوشمند، سی امین کنفرانس بین المللی برق.

شریف پور، زهرا؛ علی بخشی، مهدیه، مظفری، مهدیه، (۱۳۹۶). طراحی زیرساخت مخابراتی شبکه هوشمند در پایلوت نمونه، سی و دومین کنفرانس بین المللی برق ایران.

عزیزی، سعدون؛ کسری رشیدی، (۱۳۹۷). بررسی و مقایسه جامع فناوری‌های بیسیم برای اینترنت اشیاء، 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).تکنولوژی‌های مخابراتی در سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند و طرح فهام، کنفرانس شبکه های هوشمند.

نغزعلی، مظهره؛ (پاییز ۱۳۹۸). پیاده سازی اینترنت اشیاء 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 نیازمندی‌های ارتباطی شبکه هوشمند برق، فصل نامه عصر برق، (۲)۱، صص ۲۴-۲۲.

زیرنویس‌ها

[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)