No. F-15-AAA-0000

مطالعه و بررسی چالش‌ها و نیازمندی‌های مخابراتی زیرسیستم‌های شبکه هوشمند

معصومه رحمانی
گروه زیرساخت مخابرات
پژوهشگاه نیرو
تهران، ایران
mrahmani@nri.ac.ir

چکیده — با توجه به اهمیت ایجاد بستر مخابراتی موثر بین مولفه‌های مختلف شبکه هوشمند، لازم است که نیازمندی‌های مخابراتی زیرسیستم‌های شبکه هوشمند به طور صحیح استخراج شود و بر پایه آن انتخاب تکنولوژی ارتباطی تحقق یابد. بنابراین این مقاله با محوریت زیرساخت ارتباطی شبکه هوشمند، به موضوع چالش‌های طراحی زیرساخت ارتباطی و نیازمندی مخابراتی زیرسیستم‌های شبکه هوشمند می‌پردازد و در آخر تکنولوژیهای مخابراتی قابل طرح در بخش‌های مختلف شبکه هوشمند با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی — شبکه هوشمند؛ QOS؛ تاخیر؛ پهنای باند؛ امنیت؛ سازگارپذیری؛ گسترش‌پذیری

۱. مقدمه

شبکه برق سنتی، شبکه‌ای وسیع است که نقش تحویل انرژی الکتریکی از نیروگاه به مصرف‌کنندگان را برعهده دارد. چالشهای شبکه سنتی مشتمل بر روند رو به رشد تقاضا برای انرژی، زیر ساخت فرسودهٔ منابع انرژی تجدید ناپذیر، تأمین قابلیت اطمینان و مسائل شبکه برق، باعث شده است در دنیا، موضوع شبکه هوشمند و چالشها و نیازمندی‌های آن، با توجهات گسترده‌ای مواجه شود.

شبکه هوشمند با هدف تحقق سه موضوع اساسی بهینه‌سازی توان‌الکتریکی، بهینه‌سازی تقاضا و بهینه‌سازی سرمایه تعریف شده است. بهینه‌سازی توان‌الکتریکی، به موضوع افزایش بازدهی و بالا بردن قابلیت اطمینان تحویل توان الکتریکی به مشترکان می‌پردازد. بهینه‌سازی تقاضا در پایانه مشترکان، برای مدیریت تقاضا و به منظور برقراری تعادل بین فیدرهای توزیع مطرح می‌شود و بهینه‌سازی سرمایه، شامل تکنولوژی‌های تشخیصی و مانیتوری برای کمک به حفظ سلامت و ایمنی تجهیزات و کاهش زیانهای ناشی از ایجاد نقص در زیرساخت الکتریکی می‌شود[۳].

از جمله اهداف اصلی شبکه هوشمند، ایجاد برقراری ارتباط لازم برای یکپارچه سازی مؤثر منابع تولید توان پراکنده می‌باشد. این عملکردهای هوشمند با اصلاح جزئی شبکه سنتی برق موجود قابل تحقق نمی‌باشد و نیاز به ایجاد ارتباط مؤثر بین حوزه‌های مختلف ضروری می‌باشد.

شبکه هوشمند در واقع، شبکه الکتریکی است که در آن دیتای مرتبط بخشهای تولید، توزیع و انتقال توان الکتریکی جمع‌آوری می‌شود تا تصمیم‌های ضروری برای برقراری تعادل بین تقاضا و تولید توان الکتریکی اتخاذ شود[۲].

در شبکه هوشمند، ایجاد سبک معماری ارتباطی مطمئن و کارامد برای انتقال اطلاعات دو طرفه بین مشترکان و صنعت برق، نقش اساسی را ایفا می‌کند[۱،۲،۴].

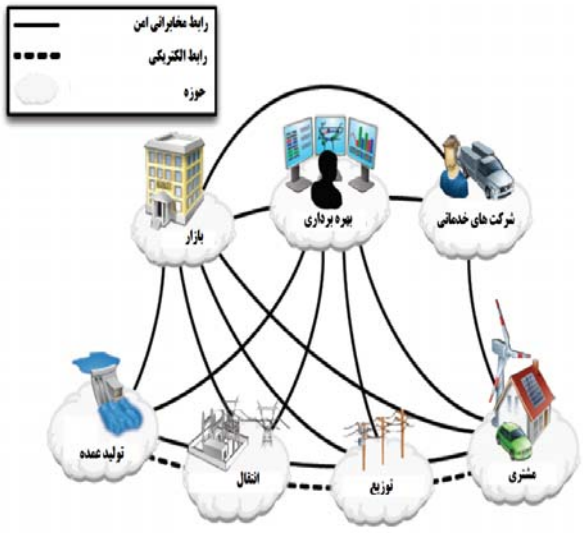
شبکه هوشمند در مجموع دارای دو ویژگی عمده می‌باشد.

۱. جریان اطلاعات مشتمل بر جمع‌اوری، پردازش و انتشار دیتا

۲. جریان الکتریکی مشتمل بر تولید، انتقال و توزیع الکتریکی [۲]

جریان اطلاعات، با هدف مانیتور و کنترل جریان الکتریکی در سیستم شبکه هوشمند می‌باشد. با دو ویژگی مذکور، شبکه هوشمند توانایی یکپارچه‌سازی منابع تولید پراکنده و کنترل شبکه را خواهد داشت.

مؤسسه بین‌المللی NIST، مدل مفهومی کلی شکل ۱ را برای تعاملات بخش های مختلف شبکه هوشمند پیشنهاد کرده است[۱-۲] که در آن نیاز به برقراری ارتباط، در داخل هر domain و بین domainهای مختلف با هم وجود دارد. از آنجایی که هر مشترک می‌تواند انرژی الکتریکی را تولید، ذخیره و مصرف کند domain مصرف‌کننده، تبدیل به domain مشترک می‌شود. اطلاعات domain بازار برق، در هر لحظه در دسترس می‌باشد؛ اپراتورها وظیفه مدیریت توان الکتریکی تولید شده را برعهده دارند؛ Service providerها در تولید انرژی نقش دارند.



شکل ۱- مدل مفهومی شبکه هوشمند برق

با توجه به اهمیت ایجاد بستر مخابراتی موثر بین مولفه‌های مختلف شبکه هوشمند، نیاز است که نیازمندی‌های مخابراتی زیرسیستم‌های شبکه هوشمند به طور صحیح استخراج شود و بر پایه آن انتخاب تکنولوژی ارتباطی تحقق یابد. بنابراین این مقاله با محوریت زیرساخت ارتباطی شبکه هوشمند، به موضوع چالشهای طراحی زیرساخت ارتباطی و مخابراتی، و نیازمندی مخابراتی زیرسیستم‌های شبکه هوشمند می‌پردازد.

۲.چالشهای طراحی زیرساخت ارتباطی در شبکه هوشمند

زیرساخت ارتباطی شبکه هوشمند دارای سه قابلیت مهم اندازه‌گیری، انتقال اطلاعات و کنترل را می باشد. اندازه‌گیری از طریق سنسورها و کنتورهای هوشمند انجام می‌شود و وضعیت نقاط مختلف شبکه به صورت real-time مشخص می‌شود. لینک‌های ارتباطی دو طرفه برای انتقال اطلاعات بین سنسورها و مراکز کنترلی احتیاج می‌باشد. دستورهای کنترلی به کنتور/سنسورهای هوشمند در نقاط مختلف تحویل داده می‌شود، یا توسط آنها صادر می‌شود تا عملیات مورد نیاز شبکه هوشمند و دسترسی مطمئن به تمام المانهای شبکه پشتیبانی شود.

با توجه به وسعت محدودهٔ جغرافیایی شبکه هوشمند، زیرساختهای چند لایه‌ای مخابراتی مشتمل بر HAN (یا BAN یا IAN)، NAN (یاFAN) و WAN با کنترل مرکزی یا غیرمرکزی برای برقراری ارتباط در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، در [۱]، زیرساخت سه لایه‌ای HAN، NAN و WAN با سیستم کنترلی مرکزی برای شبکه هوشمند پیشنهاد شده است. لکن در مجموع چالشهای زیادی برای طراحی سبک معماری مخابراتی شبکه هوشمند وجود دارد که مهمترین موارد آن به شرح زیر است.

حجم زیاد دیتا: برطبق آمار مرکز تحقیقاتی SBI، سطح دیتا در شبکه هوشمند از ۱۰۷۸۰ ترابایت در سال ۲۰۱۰ میلادی به ۵۷۲۰۰ ترابایت در سال ۲۰۱۵ افزایش می‌یابد.

ترافیک متغیر: با توجه به حجم وسیع دیتای real-time در شبکه هوشمند، شرایط ترافیکی دیتا در طول روز بسیار متغیر می‌باشد مثلا انرژی خورشیدی در طی ساعاتی از روز در دسترس می‌باشد و فرمانهای سوئیچ تجهیزات مرتبط با این منبع تجدیدپذیر بسته به در دسترس بدون انرژی خورشیدی ارسال می‌شوند و با ترافیک ماهیت متغیر می‌دهند.

یکپارچه‌سازی: با توجه به تنوع تکنولوژیهای مخابراتی قابل استفاده در شبکه هوشمند، موضوع یکپارچه‌سازی بین زیرشبکه‌ها، از مسائل مهم توپولوژی‌های چند تکنولوژیکی می‌باشد.

کیفیت خدمات (QOS): دیتاهای مختلف دارای نیازمندی‌های متفاوت در پارامترهایی چون تأخیر، پهنای باند، قابلیت اطمینان و امنیت می‌باشند و سیستم مخابراتی شبکه هوشمند باید به گونه‌ای طراحی شود که این نیازمندی‌های مختلف را پوشش دهد.

امنیت: مقابله با حملات بیرونی به شبکه داده که وظیفه مانیتور و کنترل شبکه هوشمند را دارند از چالشهای اساسی شبکه هوشمند می‌باشد [۱].

شبکه هوشمند، برنامه‌های کاربردی شبکه سنتی برق را پشتیبانی می‌کند. SCADA ، اتوماسیون توزیع (DA)، سیستم مدیریت انرژی (EMS)، مدیریت سایت تقاضا (DSM) و AMR از جمله این برنامه‌ها می‌باشند. علاوه بر این، برنامه‌های کاربردی جدید مانند AMI، اتوماسیون پست‌ها (SA)، میکروگریدها، تولید برق توزیع شده، کنترل و مانیتورینگ شبکه برق، ذخیره سازی و آنالیز دیتا نیز باید توسط شبکه هوشمند، پوشش داده شود[۴]. داده‌های ایجاد شده توسط این برنامه‌ها، دارای انواع مختلف می‌باشند:

- دیتای broadcast که دیتای پاسخ به تقاضا (demand Response)، سیگنالهای قیمت برق، دیتای مربوط به رخداد اضطراری از این نوع هستند. این نوع دیتا، کم حجم می‌باشد و به طور مکرر تکرار نمی‌شود.

- دیتای مصرف برق به صورت Real-time که هم برای کنترل real-time شبکه مفید است و هم برای مشترکان، این نوع دیتا، به طور مکرر تکرار می‌شود و دارای حجم بزرگی می‌باشد.

- دیتای خام صورتحساب که در هنگام تغییر قیمت برق ایجاد می‌شود و توسط اپراتورهای شبکه برق استفاده می‌شود.

- دیتای Aggregate شده که با مقایسه رفتار مصرفی همسایه‌ها در زمانهای مختلف و شناسایی الگوی مصرفی، باعث انجام عملیات اصلاحی در تولید و توزیع برق می‌شود. اطلاعات خلاصهٔ ایجاد شده، در برقراری پایداری شبکه و از جنبه امنیتی بسیار کم ریسک می‌باشد و می‌تواند از بستر عمومی اینترنت استفاده کنند.

- دیتای مربوط به انتقال و توزیع که نقاط جمع‌آوری دیتا در آن نسبت به سایر انواع تعداد کمتری دارد و عمدتا در پستها می‌باشد. اطلاعات این نوع دیتا از جنس مأموریت بحرانی می‌باشد و همیشه بستر ارتباطی باید مهیا باشد[۵].

این انواع دیتا در برنامه‌های کاربردی مختلفی استفاده می‌شود و شاخصه ها، الزامات و نیازمندی‌های مخابراتی متفاوتی دارند. برخی از پارامترهای مهم نیازمندی مخابراتی، شامل تأخیر انتقال داده، پهنای باند مورد نیاز، مقیاس پذیری، امنیت مورد نیاز، استانداردها، سازگاری با دیگر تکنولوژیها و قابلیت اطمینان می‌باشد.

۳.نیازمندی‌های مخابراتی زیر سیستم‌های شبکه هوشمند

نیازمندیهای مخابراتی مختلف به استفاده از تکنولوژیهای مخابراتی متفاوتی منتهی می‌شود. بنابراین درک درست نیازمندی‌های مخابراتی هریک از زیر سیستم‌های شبکه هوشمند در پیاده‌سازی و بهره‌برداری آن نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند بعنوان مثال برای دیتای مرتبط با زیرسیستم Demand-response تأخیر کمتر از یک دقیقه [۶] مطلوب می‌باشد و دیتای آن از نوع (multicast/ broadcast) می‌باشد و این زیر سیستم در لایه FAN/NAN کاربرد دارد بنابراین انتخاب تکنولوژی مخابراتی که فاقد قابلیت multicast و broadcast باشد و تأخیر بالا داشته باشد، نیل به اهداف این زیر سیستم را ناممکن می‌سازد و همچنین با توجه به اینکه بسیار از زیرسیستم‌های سمت مشترک از طریق لایه FAN/NAN، دیتای خود را به سیستم کنترلی می‌رسانند پس تکنولوژی انتخابی لایه FAN/NAN، باید ظرفیت و پهنای باند لازم و مکفی را برای ایجاد ارتباط را فراهم سازد. در ادامه این مقاله تلاش شده است که نیازمندی مخابراتی زیرسیستم‌های مختلف به طور اجمالی بررسی شود.

۳.۱. تاخیر

در شبکه هوشمند، سیگنالهای حفاظتی و کنترل کیفیت توان از جمله مصادیقی هستند که احتیاج به ارتباطات real-time دارند. در این ارتباطات، سیگنال دیتا باید در اسرع وقت و با حداکثر مقدار تاخیر مجاز مشخصی به مقصد برسد. حداکثر مقدار تاخیر مجاز سیگنال کنترل کیفیت توان در کاربرد SCADA/EMS تا مرکز کنترل، ۱۵ ثانیه می‌باشد. اطلاعات Breaker باید حداکثر ظرف ۲ ثانیه بعد از وقوع رخداد به مرکز کنترل برسد. تاخیر مجاز سیگنال حفاظتی با توجه به اینکه ناپیوستگی جریان fault در حدود ۱۰۰ میلی ثانیه می‌باشد در محدوده ۱۲–۲۰ میلی ثانیه می‌باشد. مقدار مجاز تاخیر، از عوامل تاثیرگذار طراحی زیرساخت ارتباطی می‌باشد. واضح است که برای در سیگنال‌های real-time، پیغام‌ها باید در فریم‌های زمانی به اندازه کافی کوتاه ارسال شوند[۷].

۳.۲. پهنای باند

با تکامل تدریجی شبکه هوشمند و اضافه شدن اجزای هوشمند در شبکه برق، زیر ساخت مخابراتی باید توانایی ارسال پیغام‌های بیشتر را طوری که تأخیر ارسال زیادتر نشود داشته باشد. در مجموع ظرفیت

مخابراتی باید رشد سریعتری از تقاضای اتصال اجزای هوشمند به شبکه برق داشته باشند. نویسندگان [۸]، نیازمندی پهنای باند مخابراتی را برای یک سیستم توزیع برق با اندازه متوسط مدل کرده‌اند. در این مدل، یک پست توزیع به ۱۰/۰۰۰ فیدر متصل می‌شود. هز فیدر به ۱۰ مشترک وصل می‌شود. اگر همه کنتورها بخواهند به پست توزیع، پیغامهایشان را برسانند، در مجموع ۱۰۰/۰۰۰ پیغام به پست توزیع فرستاده می‌شود. فیدرها نیز برای خودشان و برای پست توزیع، پیغامهایی را ارسال می‌کنند بنابراین در ساعت اوج ترافیک، حدود یک میلیون پیغام به طور همزمان وجود دارد. با فرض طول متوسط ۱۰۰ بیت برای هر پیغام و متوسط تأخیر مجاز ۱۰ میلی‌ثانیه، پهنای باند مجاز می‌تواند براساس تئوری صف محاسبه شود. اگر این پیغامها در شبکه برق، که به سروری که در مراکز کنترل قرار داده شده است ارسال می‌شوند، به صورت مدل ترافیکی M/M/1 مدل شوند پهنای باند 100Mbps لازم است. استفاده از پهنای باند 100 Mbps برای این حجم ترافیک، در بسیاری از بازه‌های زمانی، اتلاف ظرفیت است اما متأسفانه متوسط تأخیر مجاز این سیستم، این مقدار پهنای باند را به سیستم الزام می‌کند. در مثالی دیگر، نویسندگان [۹] بررسی کرده‌اند که در صورتی که برای متوسط تاخیر 10msec و پیغامهای با طول ۴۰۰ بیت از خط T1 استفاده شود تنها از ۶٪ ظرفیت T1، استفاده شده است. بنابراین رعایت کردن الزام متوسط تأخیر مجاز، خود عاملی تأثیرگذار در اختصاص پهنای باند مطلوب برای سیستم می‌باشد. این الزام در دو مثال بالا، باعث شده است که ترافیک درصد کمی از ظرفیت ارتباطی را تصرف کند.

۳.۳. سازگارپذیری

سازگارپذیری در شبکه هوشمند، به توانایی سیستمهای گوناگون برای کارکردن باهم و انجام فعالیتهای مشارکتی گفته می‌شود به نحوی که یکپارچه سازی، همکاری مؤثر و ارتباطات دو طرفه بین المانهای مختلف در شبکه هوشمند برقرار شود. موسسه NIST، اولین هماهنگ‌کننده بین‌المللی برای موضوع سازگارپذیری شبکه هوشمند می‌باشد و چارچوبی مشتمل بر استانداردها و پروتکل‌های مدیریت اطلاعات بنا نهاده است تا سیستم‌ها و تجهیزات شبکه هوشمند با همدیگر سازگارپذیر باشند. مدل مفهومی بسیار مشهور NIST برای شبکه هوشمند، هفت حوزه تولید، انتقال، توزیع، بازار برق، عملیات، فراهم آورنده سرویس، مشتری را تعریف می‌کند و بازیگرهای اصلی و کاربردهای هریک را تعیین می‌کند. این مدل در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین، واسطهای بین حوزه‌ها و اینکه چه اطلاعاتی و چه استانداردهای سازگارپذیری در هر واسط باید استفاده شوند در این مدل مشخص شده است. از طـــرف دیگر ANSI C12.22 برای سازگارپذیر بودن شبکه مخابراتی داده همگام با به‌روزشدن تکنولوژی‌های مخابرات نوری و ارتباطات مدرن تلفنی تشکیل شده است که پروتکل باز و جامعی را برای انتقال دیتای استاندارد کنتورها (که توسط ANSI C12.19 تعریف شده است) را تعیین می‌کند.

۳.۴. مقیاس پذیری

زیر ساخت ارتباطی شبکه هوشمند باید قادر به تجمیع تجهیزات و سرویسهای جدید بین خود و کنتورهای انرژی باشد. یک شبکه بر پایه IP، راه حلی مؤثر برای نیازهای ارتباطی شبکه هوشمند می‌باشد. شبکه بر پایه IP، استفاده از تکنولوژی‌های جدید را از سرویس‌های پیاده شده در شبکه توزیع، مستقل می‌سازد. هزینه نگهداری و گسترش شبکه با تکنولوژی‌های بر پایه IP به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۳.۵. امنیت

بر طبق گزارش EPRI [۹]، برقراری امنیت سایبری در شبکه هوشمند بسیار حیاتی است از آنجایی که پتانسیل حملات سایبری با گسترش ارتباطات بیشتر می‌شود. در موضوع امنیت سایبری، فقط مباحث حملات عمدی پوشش داده نمی‌شود بلکه هر گونه اختلال غیرعمدی زیرساخت ارتباطی که می‌تواند از خطاهای کاربر یا معیوب شدن تجهیزات نشات گیرد نیز در این حوزه می‌گنجد. کمیته های زیادی از جمله ISA، IEEE(14020)، NIPP و NIST به موضوع تعیین نیازمندی امنیتی شبکه هوشمند می‌پردازند. در همه این کمیته‌ها امنیت سایبری در سه بخش احراز هویت، صدور مجوز و تکنولوژی‌های حفظ حریم خصوصی بررسی می‌شود.

۴.تکنولوژیهای مخابراتی

زیرساخت مخابراتی شبکه هوشمند دارای سبک معماری سلسله مراتبی می‌باشد که از سه بخش HAN/BAN/IAN، NAN/FAN و WAN تشکیل شده است. نرخ دیتا و نیازمندی های مخابراتی هر سه بخش با هم متفاوت است. در بخش HAN/BAN/IAN، دیتا از تجهیز به کنترل‌کننده در سمت مشترک ارسال و در جهت عکس دریافت می‌شود. در این بخش نرخ دیتای بالا احتیاج نمی‌باشد؛ مصرف توان پایین، قیمت پایین، سادگی و ارتباط امن از نیازمندی‌های زیرساخت مخابراتی این بخش می‌باشد.

حداکثر نرخ دیتای 100Kbps و محدوده پوشش حداکثر ۱۰۰ متر رای این بخش در نظر گرفته شده است. Zigbee، WiFi، Z-wava، PLC، Bluetooth و اترنت در این بخش مکررا استفاده شده‌اند.

بخش NAN/FAN، کاربردهایی چون قرائت کنتور، پاسخ به تقاضا و اتوماسیون توزیع را در بر می‌گیرد که در آن داده‌ها از تعداد زیادی از تجهیزات به ایستگاه مرکزی یا جمع کننده ارسال و در جهت عکس دریافت می‌شود. نرخ دیتای 100Kbps تا 10Mbps با محدوده پوشش حداکثر 10Km برای این بخش در نظر گرفته شده است. شبکه مش Zigbee، شبکه مش WiFi، PLC، WiMAX، سلولار، DSL و کابل کواکسیال از تکنولوژی‌های مخابراتی استفاده شده در این بخش می‌باشد. بخش WAN، کاربردهایی چون کنترل مناطق وسیع، حفاظت و مانیتورینگ را در بر می‌گیرد. در این بخش تعداد نقاط ارتباطی بسیار زیاد است و نرخ دیتای بالایی نیز برای کنترل سیستم قدرت احتیاج می‌باشد.

تکنولوژی مخابراتی با نرخ بیت 10Mbps تا 1Gbps و محدوده پوشش حداکثر 100Km در این بخش استفاده می‌شود. شبکه نوری، WiMAX، سلولار، مخابرات ماهواره‌ای در این بخش استفاده می‌شوند. در جدول ۱ مقایسه تکنولوژیهای مخابراتی مختلف در زیرسیستمهای شبکه هوشمند ارائه شده است.

۵.نتیجه گیری

با توجه به تنوع زیاد تکنولوژیهای مخابراتی بی سیم مانند Wi-Fi، سلولار نسل سه و چهار، رادیوی Zigbee، رادیوهای طیف گسترده از طرفی و تکنولوژیهای سیمی مانند BPL، ADSL، شبکه مخابرات نوری و ... از طرف دیگر و دارا بودن مشخصات فنی متفاوت در آنها لازم است که برای انتخاب نوع تکنولوژی مخابراتی در هر زیرسیستم شبکه هوشمند پارامترهایی چون گستردگی ارتباط ها، پهنای باند مورد نیاز، تاخیر مجاز و امنیت اطلاعات مورد نیاز برای هر زیرسیستم در شبکه هوشمند بررسی شود. از آنجایی که ایجاد ارتباطات داده با بازدهی بالا نقش مهمی را در کارآمدی شبکه هوشمند ایفا می کند انتخاب غیر دقیق تکنولوژی علاوه بر ناکارآمد شدن شبکه هوشمند می تواند اتلاف سرمایه بسیار هنگفتی را در کشور به بار آورد؛ بنابراین صرف هزینه و زمان مناسب برای انتخاب دقیق تکنولوژی در هر زیرسیستم شبکه هوشمند با توجه به فاکتورهای مطرح شده مذکور توصیه می‌شود.

جدول ۱: مقایسه تکنولوژیهای مخابراتی در شبکه هوشمند

Network			حداکثر نرخ بیت	محدوده پوشش	استاندارد/پروتکل	تکنولوژی
HAN/BAN/IAN	NAN/FAN	WAN				
						تکنولوژی مخابراتی سیمی
		x	155 Mbps–2.5 Gbps	Up to 60 km	PON	Fiber optic
			40 Gbps	Up to 100 km	WDM	
			10 Gbps	Up to 100 km	SONET/SDH	
	x		1–8 Mbps	Up to 5 km	ADSL	DSL
			2 Mbps	Up to 3.6 km	HDSL	
			15–100 Mbps	Up to 1.5 km	VDSL	
	x		172 Mbps	Up to 28 km	DOCSIS	Coaxial Cable
x			14–200 Mbps	Up to 200 m	HomePlug	PLC
	x		10–500 kbps	Up to 3 km	Narrowband	
x	x		10 Mbps–10 Gbps	Up to 100 m	802.3x	Ethernet
						تکنولوژی مخابراتی بی سیم
x			40 kbps	Up to 30 m	Z-Wave	Z-Wave
x			721 kbps	Up to 100 m	802.15.1	Bluetooth
x	x		250 kbps	Up to 100 m	ZigBee	ZigBee
			250 kbps	Up to 1600 m	ZigBee Pro	
x	x		2–600 Mbps	Up to 100 m	802.11x	WiFi
	x	x	75 Mbps	Up to 50 km	802.16	WiMAX
x	x		Depending on selected protocols	Depending on deployment	Various (e.g., RF mesh, 802.16)	
	x	x	14.4 kbps	Up to 50 km	2G	Cellular
			144 kbps		2.5G	
			2 Mbps		3G	
			14 Mbps		3.5G	
			100 Mbps		4G	
		x	1 Mbps	100–6000 km	Satellite Internet	Satellite

منابع

[1] Yu, Rong, et al. "Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid." Network, IEEE 25.5 (2011): 6-14.

[2] Khan, Zeeshan Ali, and Yasir Faheem. "Cognitive radio sensor networks: Smart communication for smart grids—A case study of Pakistan." Renewable and Sustainable Energy Reviews 40 (2014): 463-474.

[3] Flynn, B. R., and P. Energy. "Key smart grid applications." Protection and Control Journal 8 (2009): 29-34.

[4] Flynn, B. R., and P. Energy. "Key smart grid applications." Protection and Control Journal 8 (2009): 29-34.

[5] Hu R, Yi Q, Wang J (2012) Recent advances in wireless technologies for smart grid [Guest Editorial]. IEEE Wirel Commun 19(3):12–13

[6] Kuzlu, Murat, Manisa Pipattanasomporn, and Saifur Rahman. "Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN." Computer Networks 67 (2014): 74-88.

[7] Yan, Ye, et al. "A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges." Communications Surveys & Tutorials, IEEE 15.1 (2013): 5-20.

[8] A. Aggarwal, S. Kunta, P. K. Verma, “A proposed communications infrastructure for the smart grid,” in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010, pp. 1-5.

[9] C. H. Hauser, D. E. Bakken, I. Dionysiou, K. H. Gjermundrod, V. S.Irava, J. Helkey, A. Bose, “Security, trust, and QoS in Next generation control and communication for large power systems,” Int. J. Critical Infrastructures, Vol. 4, 2008.