

سیر تکاملی مخابرات خطوط قدرت: از یک سیستم تلفن ثابت تا فناوری مخابراتی شبکه هوشمند انرژی

محسن شیخ حسینی^۱

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۸/۲۲)، (پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸)

DOI: 10.22047/ijee. 2019.156087.1591

چکیده: فناوری مخابرات خطوط قدرت با بهره‌گیری از شبکه قدرت و سیم‌کشی‌های آن در همه سطوح و لذا به‌عنوان یک بستر مخابراتی نسبت به ارسال و دریافت اطلاعات اقدام می‌کند. بی‌نیازی به سیم‌کشی و نصب زیرساخت جدید برای پیاده‌سازی این فناوری به همراه ضریب نفوذ بالای شبکه برق در سطح دنیا و دسترسی آسان به آن از جمله مهم‌ترین دلایل روی‌آوری به این فناوری و گسترش روزافزون آن در طی سالیان متمادی بوده‌اند. امروزه، با گذشت بیش از یک قرن از عمر این فناوری، سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت موجود در قالب سه دسته عمده سیستم‌های فوق‌باریک‌باند، باریک‌باند و پهن‌باند قابل تقسیم‌بندی است که طراحی هر کدام بر مبنای کاربرد و استاندارد خاص است. این مقاله به بررسی جامع سیر تکاملی این فناوری در قالب دسته‌بندی فوق‌اختصاص دارد که شامل مباحث مختلفی از تاریخچه، مزایا، چالش‌های مخابراتی و گستره وسیع کاربری این فناوری تا معرفی پروژه‌های استانداردسازی جهانی، تجهیزات و سازندگان آنها و نقش کلیدی آن در هوشمندسازی شبکه قدرت است.

واژگان کلیدی: پهنای باند فرکانسی، نرخ بیت، سیستم‌های فوق‌باریک‌باند، باریک‌باند و پهن‌باند، شبکه هوشمند انرژی، فناوری مخابرات خطوط قدرت

۱- استادیار گروه پژوهشی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. m.sheikhhosseini@kgut.ac.ir

۱. مقدمه

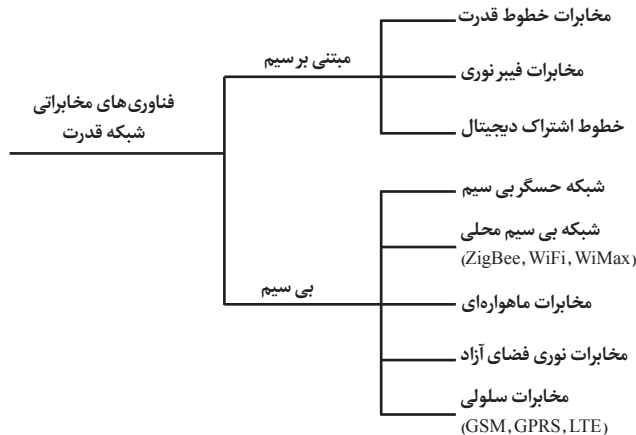
شبکه قدرت به عنوان یکی از گسترده‌ترین زیرساخت‌های دست‌ساز بشر شامل مجموعه بسیار زیادی از تأسیسات و تجهیزات الکتریکی شامل نیروگاه، پست‌های الکتریکی، سیم‌کشی‌های هوایی و زیرزمینی و... است که وظیفه تولید انرژی الکتریکی، انتقال و توزیع آن در سطح مشترکان را بر عهده دارد. سطوح ولتاژ مورد استفاده در این شبکه به سه دسته ولتاژ بالا، متوسط و پایین قابل تقسیم بندی هستند که شبکه ولتاژ بالا برای اتصال نیروگاه‌ها به شبکه ولتاژ متوسط استفاده می‌شود؛ شبکه ولتاژ بالا از طریق یک مبدل کاهنده به شبکه ولتاژ متوسط متصل می‌شود که این شبکه وظیفه تأمین توان مورد نیاز شهرهای و صنایع بزرگ را به عهده دارد و نهایتاً شبکه ولتاژ متوسط از طریق مبدل توزیع به شبکه ولتاژ پایین متصل می‌شود که مبتنی بر ولتاژهای کمتر از یک کیلوولت است.

هرگونه مدیریت، کنترل و برنامه‌ریزی برای این ساختار گسترده نیازمند الزامات و دسترسی به برخی زیرساخت‌های موازی است که یکی از مهم‌ترین آنها، وجود بسترهای قابل اطمینان مخابراتی و اطلاعاتی است. از طرف دیگر، آنچه در گذر زمان لزوم تجهیز شبکه قدرت به این زیرساخت‌ها را پررنگ‌تر کرده، است در ظهور و پیدایش مفاهیمی همچون تولیدات پراکنده، منابع تجدیدپذیر انرژی، خودروهای الکتریکی، سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی، زیرساخت قرائت از دور^۱ و زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته^۲ نهفته است که تمامی آنها در قالب یک مفهوم جامع‌تر تحت عنوان شبکه هوشمند^۳ در شبکه قدرت امروزی و نسل آینده مطرح است (فتوحی فیروزآبادی و رستگار، ۱۳۹۳) و (Farhangi, 2010; Fang et al., 2012). در شرایط حاضر در لزوم حرکت شبکه قدرت از شکل سنتی به سمت یک شبکه هوشمند اجماع جهانی وجود دارد و شبکه هوشمند براساس تعریف سازمان انرژی ایالات متحده امریکا تحت عنوان یک شبکه مدرن انرژی تعریف شده است که در آن انتقال توان الکتریکی و تبادل اطلاعات به صورت دوطرفه صورت می‌گیرد و این شبکه قابلیت پایش و پاسخگویی را به هر نوع تغییرات شبکه را دارد. (The U.S. Department of Energy's Report, 2008; Electric Power Research Institute, 2009). مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک^۴ نیز شبکه هوشمند را شبکه‌ای یکپارچه تعریف کرده است که ساختار موجود شبکه قدرت را با زیرساخت‌های مخابراتی و فناوری اطلاعات تجمیع می‌کند (IEEE Std 2030, 2011). بنابراین گسترش زیرساخت‌های مخابراتی و اطلاعاتی شبکه قدرت همواره مدنظر بوده است و با مطرح شدن مفهوم شبکه هوشمند این مسئله در کانون توجه بیشتری قرار گرفته است. در این راستا فناوری‌های مخابراتی مختلفی برای شبکه هوشمند پیشنهاد شده است و همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، این فناوری‌ها در یک دسته‌بندی کلی در قالب دو دسته فناوری‌های مبتنی بر سیم و بی‌سیم قابل تقسیم بندی هستند. دسته بی‌سیم فناوری‌های مختلفی همچون نسل‌های مختلف

1- Automatic Meter Reading (AMR)
3- Smart Grid

2- Advanced Metering Infrastructure (AMI)
4- The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

مخابرات سلولی^۱، مخابرات ماهواره‌ای^۲، مخابرات نوری فضای آزاد^۳، شبکه حسگر بی سیم^۴ و شامل انواع مختلف شبکه‌های بی سیم همچون WiFi، ZigBee و WiMax می‌شود. فناوری‌های مبتنی بر سیم نیز شامل سیستم‌هایی همچون مخابرات فیبر نوری^۵، خطوط اشتراک دیجیتال رقمی^۶ و مخابرات خطوط قدرت^۷ می‌شود (Yan et al., 2013; Usman & Shami, 2013; Kuzlu et al., 2014; Ancillotti et al., 2013).



شکل ۱: فناوری‌های مختلف مخابراتی شبکه هوشمند

باتوجه به تنوع قابل توجه این فناوری‌ها و ماهیت کاملاً متفاوت آنها با یکدیگر از یک سو و نیازمندی‌های متنوع مخابراتی شبکه قدرت از سوی دیگر، می‌توان با قطعیت بالایی بیان کرد که هیچ‌کدام از این فناوری‌ها نمی‌توانند به تنهایی پاسخگوی اهداف شبکه قدرت و الزامات هوشمندسازی آن باشد و ترکیبی از آنها گزینه مطلوب‌تری خواهد بود. اما بر مبنای حجم مطالعات و سرمایه‌گذاری در ارتباط با هر فناوری، می‌توان نسبت به نقش پررنگ‌تر برخی از آنها در بازار شبکه قدرت هوشمند قضاوت کرد که فناوری مخابرات خطوط قدرت یکی از آنها است. این فناوری از بدو پیدایش تاکنون همواره در کانون توجه بوده است و سرمایه‌گذاری قابل توجهی را به خود جلب کرده است. دلیل استقبال گسترده از این فناوری از یک طرف ناشی از این است که این فناوری مبتنی بر ساختار خود شبکه قدرت است و تماماً تحت کنترل شرکت‌های برق است که این به معنای حذف وابستگی شرکت‌های برق از اپراتورهای مخابراتی است. از طرف دیگر مطابق ضریب نفوذ بالای شبکه قدرت و عدم نیاز به نصب ساختار و سیم‌کشی جدید در پیاده‌سازی این فناوری، بهره‌گیری از آن از منظر هزینه‌های مالی و زمانی نیز کاملاً توجیه پذیر است.

1- Cellular Communications

2- Satellite Communications

3- Free Space Optical Communications

4- Wireless Sensor Networks

5- Fiber Optical Communications

6- Digital Subscriber Line (DSL)

7- Power Line Communications

علیرغم ویژگی‌های منحصربه‌فرد ذکرشده، پیاده‌سازی و بهره‌گیری از فناوری مخابرات خطوط در عمل همواره با چالش‌های زیادی مواجه بوده است و این فناوری در طی سالیان متمادی دستخوش تغییر و تحولات زیادی شده و نسل‌های متفاوتی از این فناوری برای کاربردهای خاص مطرح و به بازار عرضه شده است. به‌طور کلی، سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت فعلی در قالب سه دسته عمده سیستم‌های فوق‌باریک‌باند^۱، باریک‌باند^۲ و پهن‌باند^۳ قابل تقسیم‌بندی هستند که نکته مهم این است که تولید تجهیزات هر دسته بر مبنای یک استاندارد یکسان صورت نپذیرفته است. لذا، تجهیزات تولیدکنندگان مختلف سازگاری و هم‌زیستی لازم را با یکدیگر ندارند (Galli et al., 2011; Dzung et al., 2011).

هدف این مقاله بررسی جامع سیر تکاملی فناوری مخابرات خطوط در قالب دسته‌بندی فوق است که در قسمت اول آن تجهیزات لازم برای پیاده‌سازی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت معرفی می‌شود و مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی این سیستم‌ها بر شمرده می‌شود. در ادامه بر مبنای گستره کاربری سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت، این سیستم‌ها در قالب سه نسل مختلف طبقه‌بندی می‌شوند و مشخصات هر نسل همچون نرخ بیت، پهنای باند فرکانسی، گستره کاربری، پروژه‌های استانداردسازی و تجهیزات مربوط در قالب قسمت‌های جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بر این مبنای ساختار باقیمانده این مقاله به این صورت است که ابتدای بخش دوم به نحوه پیاده‌سازی فناوری مخابرات خطوط قدرت و مزایا و چالش‌های مخابراتی این پیاده‌سازی اختصاص دارد و در قسمت انتهایی این بخش به دسته‌بندی سیستم‌های مختلف این فناوری پرداخته می‌شود و این سیستم‌ها در قالب سه نسل طبقه‌بندی می‌شوند. سه بخش بعدی یعنی بخش‌های سوم، چهارم و پنجم نیز اختصاص به معرفی جامع این نسل‌بندی یعنی نسل‌های اول، دوم و سوم سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت اختصاص دارد. بخش ششم مقاله معطوف به تفسیر و ارزیابی وضعیت فعلی فناوری مخابرات خطوط قدرت در سطح جهان و مقایسه آن با کشور ایران و پیش‌بینی بازار آن است و نهایتاً در بخش ششم نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲. فناوری مخابرات خطوط قدرت: پیاده‌سازی، چالش‌ها و دسته‌بندی‌ها

۲-۱. پیاده‌سازی فناوری مخابرات خطوط قدرت

گسترده‌گی و ضریب نفوذ بالا شبکه قدرت در سطح جهان در اوایل قرن بیستم میلادی شرکت‌های برق را بر آن داشت که از این ساختار به‌عنوان یک بستر مخابراتی برای ارسال اطلاعات استفاده کنند و این امر به ظهور و بروز فناوری مخابرات خطوط قدرت منجر شد. اما ارسال نشانک‌های^۴/سیگنال‌های

1- Ultra-Narrowband-PLC (UNB-PLC)

2- Narrowband-PLC (NB-PLC)

3- Broadband-PLC (BB-PLC)

۴- برابر نهاد فارسی واژه «سیگنال»، مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی، لازم به ذکر است که هردوی این واژه‌ها کاربرد دارند.

مخابراتی روی این بستر شبکه قدرت مستلزم تجهیز این شبکه به برخی تجهیزات واسط است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

- ایستگاه پایه مخابرات خطوط قدرت: ایستگاه پایه به‌عنوان رابط بین شبکه‌های مختلف مخابراتی و شبکه قدرت عمل می‌کند و با دریافت سیگنال این شبکه‌ها آن را به فرم قابل ارسال بر روی شبکه قدرت تبدیل می‌کند. علاوه بر این، ایستگاه پایه به‌عنوان گره اصلی و مرکزی شبکه مخابرات خطوط محسوب می‌شود و وظیفه تقسیم منابع بین سایر گره‌ها را برعهده دارد.
- مودم مخابرات خطوط قدرت: مودم‌های مخابرات خطوط قدرت در سمت مشترکان مورد استفاده قرار می‌گیرند و نقش گره‌های مختلف شبکه مخابرات خطوط قدرت را بازی می‌کنند. در واقع، تجهیزات مختلف مشترکان نظیر رایانه‌های شخصی و دستگاه‌ها و تجهیزات خانگی از طریق این مودم‌ها به پریزهای شبکه برق متصل می‌شوند و ارتباط سمت مشتری را با شبکه‌های مخابراتی فراهم می‌آورند.
- تزویج‌کننده‌های مخابرات خطوط قدرت: اتصال ایستگاه پایه و مودم‌های مخابرات خطوط قدرت به شبکه قدرت از طریق تزویج‌کننده‌ها انجام می‌پذیرد. در واقع تزویج‌کننده مخابرات خطوط قدرت به‌عنوان یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند که از یک طرف سیگنال‌های مخابراتی فرکانس بالای خروجی ایستگاه پایه و مودم‌ها را از خود عبور می‌دهد و باعث تزویج آنها به شبکه قدرت می‌شود و از طرف دیگر، با تضعیف فرکانس‌های پایین نظیر فرکانس ۵۰-۶۰ هرتز شبکه برق عملاً مانع نفوذ سیگنال قدرت به ایستگاه پایه و مودم‌های سطح شبکه می‌شود.
- تله‌های خط مخابرات خطوط قدرت^۱: نحوه عملکرد تله‌های خط برعکس تزویج‌کننده‌ها است. بدین معنا که اگر بنا به دلایلی علاقه‌مند به عدم نفوذ سیگنال‌های مخابراتی در یک بخش خاصی از شبکه قدرت باشیم، آن بخش با یک تله خط از شبکه مخابرات خطوط قدرت مجزا می‌شود. در واقع، تله خط یک فیلتر پایین‌گذر است که ضمن عبور فرکانس اصلی شبکه قدرت مانع نفوذ سیگنال‌های فرکانس بالای سیستم مخابرات خطوط قدرت می‌شود.
- تکرارکننده‌های مخابرات خطوط قدرت: سطح توان ارسالی در سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت به‌علت برخی محدودیت‌ها پایین است که این امر باعث کاهش فاصله سرویس دهی این سیستم‌ها می‌شود. بنابراین از تکرارکننده‌ها برای تقویت سیگنال ارسالی و افزایش فاصله سرویس دهی شبکه مخابرات خطوط قدرت استفاده می‌شود.
- دروازه‌های مخابرات خطوط قدرت^۲: عملکرد ایمن شبکه مخابرات خطوط قدرت وابسته به فراهم‌آوری جداسازی مناسب بین بخش‌های مختلف آن است که این امر توسط دروازه‌های

مخابرات خطوط انجام می‌پذیرد. به‌عنوان مثال، در شبکه قدرت ولتاژ پایین، یک دروازه مخابرات خطوط قدرت با جداسازی فرکانسی بخش داخل خانه و خارج خانه جداسازی لازم بین این دو بخش را فراهم می‌کند (Carcelle, 2009; Ferreira et al., 2010; Chen et al., 2009).

۲-۲. مزایا و چالش‌های مخابرات خطوط قدرت

همانطور که اشاره شد، فناوری‌های مخابراتی شبکه هوشمند به دو دسته عمده فناوری‌های مبتنی بر سیم و بی‌سیم قابل تقسیم‌بندی هستند. مزیت اصلی فناوری مخابرات خطوط قدرت در مقایسه با سایر فناوری‌های سیمی نظیر فیبر نوری و خطوط تلفن در گستردگی و ضریب نفوذ بسیار بالای شبکه قدرت، و دسترسی آسان به آن در تمام نقاط ساختمان از طریق پریزهای موجود است. علاوه بر این، به دلیل موجود بودن زیرساخت شبکه قدرت، پیاده‌سازی مخابرات خطوط قدرت نیازمند نصب ساختار و سیم‌کشی جدید نیست و از این منظر هزینه و سرعت پیاده‌سازی مخابرات خطوط قدرت کمتر از سایر فناوری‌ها سیمی موجود است و این فناوری با کمترین تغییرات در محیط قابل پیاده‌سازی است (Kuzlu et al., 2014; Ancillotti et al., 2013; Galli et al., 2011). در مقایسه با فناوری‌های بی‌سیم، مخابرات خطوط قدرت تنها فناوری سیمی است که می‌تواند هزینه پیاده‌سازی قابل مقایسه با سیستم‌های بی‌سیم داشته باشد که دلیل این امر در استفاده از ساختار موجود شبکه قدرت است. (همان). نکته مهم دیگر در قابلیت فناوری مخابرات خطوط قدرت در مرتفع کردن برخی نقایص شبکه‌های بی‌سیم است. زیرا این شبکه‌ها بی‌سیم با مشکلاتی نظیر پوشش‌دهی و عبور نشانک/سیگنال از دیوارهای ضخیم و موانع در طبقات مختلف ساختمان مواجه هستند. اما سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت به دلیل عبور سیگنال از طریق سیم‌کشی موجود در تمام نقاط ساختمان عملاً با این مشکل مواجه نیستند و می‌توانند به‌عنوان جایگزین سیستم‌های بی‌سیم یا به‌صورت ترکیبی با آنها در جهت رفع این نواقص استفاده شوند (Cano et al., 2016).

علی‌رغم این مزایا، پیاده‌سازی فناوری مخابرات خطوط قدرت از بدو پیدایش تاکنون در عمل با چالش‌های زیادی مواجه بوده است که بسیاری از آنها تاکنون مرتفع شده است و برخی از آنها همچنان به قوت خود باقی است و تلاش‌ها برای مرتفع کردن آنها در جریان است. این چالش‌ها را می‌توان به دو دسته چالش‌ها در طراحی و چالش‌ها در پیاده‌سازی تقسیم‌بندی کرد که در ادامه هرکدام جداگانه تشریح می‌شود.

عمده‌ترین چالش در پیاده‌سازی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت وجود استانداردهای متعدد و به‌تبع آن ناسازگاری تجهیزات مبتنی بر این استانداردها با یکدیگر است. در واقع، این امر اصلی‌ترین دلیل محقق نشدن سهم مخابرات خطوط قدرت از بازار فناوری‌های مخابرات خطوط قدرت مطابق پیش‌بینی‌های اولیه است. البته لازم به ذکر است که فعالیت‌هایی در جهت رفع این

مشکل انجام پذیرفته یا در حال انجام است که مهم‌ترین آنها معطوف به فعالیت‌های استانداردسازی جهانی همچون مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک و اتحادیه بین‌المللی ارتباطات راه دور^۱ است که در قسمت‌های بعد به آنها اشاره خواهد شد.

اولین چالش از دسته محدودیت‌های مرتبط با طراحی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت ناشی از مسئله سازگاری الکترومغناطیسی است. گفتنی است که کابل‌ها و سیم‌کشی شبکه قدرت همانند یک آنتن عمل می‌کند و ارسال نشانک‌ها/ سیگنال‌ها مخابراتی فرکانس بالا روی بستر این شبکه باعث پخش تشعشعات الکترومغناطیسی در محیط اطراف می‌شود. اما با توجه به اینکه محدوده فرکانسی مورد استفاده در سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت عملاً برای این منظور در نظر گرفته نشده است، محدودیت‌هایی برای سطح توان ارسالی این سیستم‌ها از جانب «سازمان‌های تنظیم مقررات رادیویی» در سطح جهان اعمال شده است که باید در طراحی و استانداردسازی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت مدنظر قرار گیرد.

اما مهم‌ترین چالش در طراحی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت به وضعیت بسیار نامطلوب کانال این سیستم‌ها برمی‌گردد و برخلاف تصور، رفتار کانال مخابرات خطوط قدرت بسیار متفاوت‌تر از سایر ساختارهای سیمی نظیر خطوط تلفن است و از آن به‌عنوان کانال وحشتناک یاد شده است (Biglieri, 2003). دلیل اصلی این مسئله در این است که شبکه قدرت و سیم‌کشی‌های مربوط به منظور تولید، انتقال و توزیع نیروی الکتریسیته در فرکانس پایین ۵۰-۶۰ هرتز طراحی شده‌اند و نه برای ارسال سیگنال‌های فرکانس بالای مخابراتی.

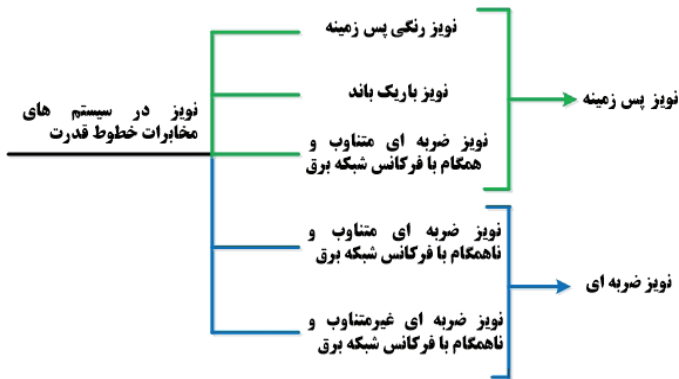
تضعیف شدید، انتشار چندمسیره سیگنال و آغستگی به انواع مختلف نوفه^۲ سه عامل اصلی محدودیت‌کننده در ارسال سیگنال‌های مخابراتی در کانال‌های مخابرات خطوط قدرت است (Biglieri, 2003; Zimmermann & Dostert, 2002). در واقع، تضعیف سیگنال در هر تکه کابل قدرت بدون انشعاب ضمن وابستگی به عوامل همچون جنس کابل، با افزایش طول کابل و افزایش فرکانس سیگنال اعمالی به آن افزایش می‌یابد. اما مشکل اصلی در تعدد انشعابات در ساختار شبکه قدرت و عدم تطبیق امپدانس در این ناپیوستگی‌ها است که باعث انعکاس بخشی از توان ارسالی در شبکه می‌شود. این پدیده که در مخابرات تحت عنوان «پدیده انتشار چندمسیره سیگنال» شناخته شده است، باعث می‌شود که از هر سیگنال ارسالی چندین نسخه تضعیف‌شده مختلف با تأخیرهای متفاوت در گیرنده دریافت شود. از دیدگاه پاسخ فرکانسی، پدیده انتشار چندمسیره پاسخ فرکانسی هموار کانال را به یک پاسخ فرکانسی پرنوسان مبدل می‌کند که در برخی فرکانس‌ها تضعیف شدید سیگنال رخ می‌دهد. از طرف دیگر با توجه به اینکه توپولوژی و ساختار شبکه قدرت معمولاً از مکانی

1- International Telecommunication Union (ITU)

۲- برابر نهاد فارسی واژه «نویز»، مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی

به مکان دیگر متفاوت است و تجهیزات و بار شبکه دائماً در حال تغییر است، تغییرپذیری با زمان و مکان از دیگر مشخصات این کانال است.

چالش مهم مخابراتی دیگر سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در وجود منابع مختلف داخلی و خارجی نوفه و آغستگی به انواع مختلفی از آن همچون نوفه ضربه‌ای است. در واقع، برخلاف اکثر سیستم‌های مخابراتی، یک فرایند طبیعی سفید به‌تنهایی قابلیت مدل‌سازی نوفه در کانال‌های مخابرات خطوط قدرت را ندارند، بلکه همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است نوفه این کانال‌ها متشکل از پنج منبع مختلف نوفه است که این منابع نوفه در یک دسته‌بندی جامع‌تر در قالب دو دسته کلی مدل‌سازی می‌شوند.

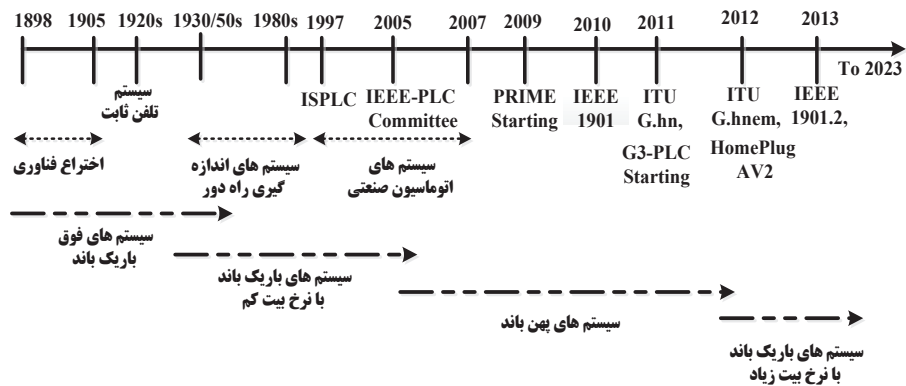


شکل ۲: منابع مختلف نوفه در سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت

۲-۳. سیر تکامل مخابرات خطوط قدرت و دسته‌بندی‌های آن

شکل ۳ معرف سیر تاریخی تکامل فناوری مخابرات خطوط قدرت و نقاط عطف آن است و همانطور که ملاحظه می‌شود، پیشینه تاریخی فناوری مخابرات خطوط قدرت به اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم میلادی برمی‌گردد که چند اختراع در ارتباط با معرفی این فناوری به ثبت رسید (Brown, 1999). در واقع اولین اختراع در سال ۱۸۹۸ در انگلستان گزارش شد (Routin & Brown, 1989) که به قابلیت شبکه قدرت در فراهم آوردن یک بستر مخابراتی جهت اندازه‌گیری از راه دور اشاره دارد و اختراع دوم در ارتباط با قابلیت شبکه قدرت در مدیریت راه دور بار و راه‌اندازی یک سیستم تلفن ثابت در سال ۱۹۰۱ گزارش شد (Loubery, 1901). علاوه بر این، در سال ۱۹۰۵ قابلیت اندازه‌گیری از راه دور خطوط قدرت به‌عنوان یک اختراع در آمریکا به ثبت رسید (Thordarson, 1905). با ثبت این اختراع‌ها و جلب توجه‌ها به این حوزه، نهایتاً اولین سیستم مخابرات خطوط قدرت در دهه ۱۹۲۰ میلادی توسط شرکت‌های برق به‌منظور ایجاد یک بستر تلفن ثابت راه‌اندازی شد؛ که دلیل راه‌اندازی آن در پوشش دهی ناقص سیستم‌های معمول تلفن ثابت در آن زمان بود (Schwartz, 2009; IEEE Standards 643-2004, 2005).

پس از آن در حوالی ۱۹۳۰، اولین سیستم‌های یک طرفه مخابرات خطوط قدرت به منظور مدیریت و کنترل بار شبکه در سطوح ولتاژ بالای شبکه راه‌اندازی شدند. این سیستم‌ها به علت استفاده از فرکانس‌های بسیار نزدیک به فرکانس شبکه قدرت مشکل عبور نشانک/سیگنال از مبدل توزیع را نداشتند و قابلیت فراهم آوردن از یک سیستم مخابراتی یک طرفه در فواصل طولانی برخوردار بودند (Dzung et al., 2011). در سال‌های ۱۹۸۰، سیستم‌های مخابراتی دوطرفه آنها با قابلیت‌های قرائت از دور و خودکارسازی شبکه قدرت، محیط‌های خانگی و صنعتی به بازار معرفی شدند که دربرگیرنده نسل اول سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت شامل سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت فوق باریک باند و باریک باند هستند.



شکل ۳: نمودار سیر تاریخی تکامل فناوری مخابرات خطوط قدرت و نقاط عطف آن

تقاضای گسترده نسبت به سرویس‌های باند وسیع نظیر اینترنت پرسرعت و لزوم پیاده‌سازی شبکه‌های رایانه‌ای در محیط‌های اداری و خانگی، مجدداً در دهه آخر قرن بیستم میلادی توجه شرکت‌های برق را به بازار پروتوکول‌های باند وسیع و ارائه آنها از طریق شبکه ولتاژ پایین قدرت معطوف کرد. در این راستا، شرکت‌های مختلف فعالیت‌های گسترده‌ای را شروع کردند که برخلاف سیستم‌های باند باریک مبتنی بر محدوده فرکانسی بیشتر از یک مگاهرتز بود. این تلاش‌ها در نهایت به ظهور نسل جدیدی از این سیستم‌ها یعنی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت پهن باند انجامید (Galli & Logvinov, 2008; Lampe et al., 2016).

از جمله نقاط عطف دیگر در سیر تکاملی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت می‌توان نخست راه‌اندازی کنفرانس اختصاصی این سیستم‌ها در سال ۱۹۹۷ توسط محققان دانشگاهی و صنعتی تحت عنوان ISPLC^۱ و نیز به تأسیس کمیته علمی مخابرات خطوط قدرت توسط اتحادیه بین‌المللی

1- International Symposium on PLC and Its Applications (ISPLC)

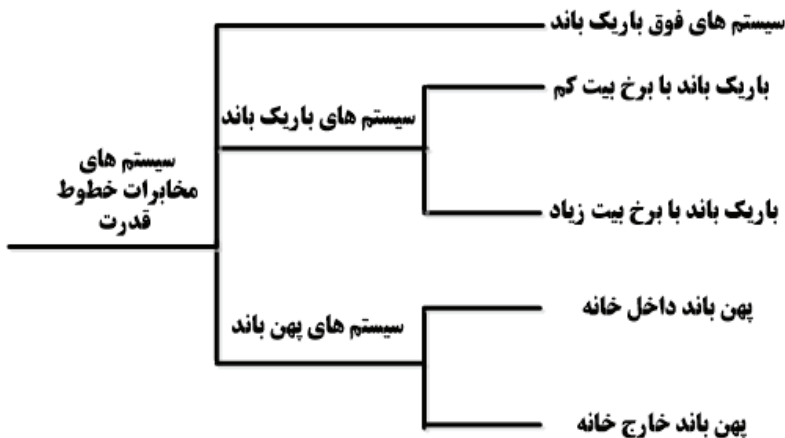
ارتباطات راه دور تحت عنوان IEEE TC-PLC^۱ اشاره کرد که این کمیته کنفرانس ISPLC را از سال ۲۰۰۶ به بعد تحت حمایت علمی و مالی خود برگزار کرده است (Lampe et al., 2016).

آخرین نقطه برجسته در سیر تکاملی این فناوری به رجوع و اقبال مجدد به سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت باریک‌بند در سال‌های اولیه قرن ۲۱ میلادی برمی‌گردد که به ظهور و بروز نسل جدیدی از این سیستم‌ها تحت عنوان سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت باریک‌بند با نرخ بیت بالا منجر شده است که صرفاً برای کاربردهای شبکه هوشمند طراحی شدند (Brown, 1999).

بر مبنای این سیر تحول و همانطور که در جدول ۱ و شکل ۴ نمایش داده شده است، سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در قالب سه دسته عمده سیستم‌های فوق باریک‌بند، باریک‌بند و پهن‌بند تقسیم می‌شوند که دسته باریک‌بند نیز به دو گروه با نرخ بیت کم و نرخ بیت بالا تقسیم‌بندی می‌شود. مطابق حوزه کاربری هرکدام از این سیستم‌ها و سیر تکاملی آنها، در ادامه این سیستم‌ها در قالب سه نسل مختلف دسته‌بندی می‌شوند و مشخصات هر نسل به همراه استانداردهای موجود و ذکر برخی مثال‌های عملی به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱: طیف فرکانسی، مدوله‌سازی و نرخ بیت سیستم‌های مختلف مخابرات خطوط قدرت

نرخ بیت	مدوله‌سازی	طیف فرکانسی (کیلوهرتز)	نوع سیستم
تا چندصد بیت بر ثانیه	تک حامل	۳-۰/۱۵	سیستم‌های فوق باریک‌بند
تا چندکیلو بیت بر ثانیه	تک حامل	۵۰۰-۳	سیستم‌های باریک‌بند با نرخ بیت کم
تا چندصد مگابیت بر ثانیه	چندحامل	۱۰۰۰۰-۲۰۰۰	سیستم‌های پهن‌بند
تا چندصدگیلوبیت بر ثانیه	چند حامل	۵۰۰-۳	سیستم‌های باریک‌بند با نرخ بیت زیاد



شکل ۴: دسته‌بندی‌های مختلف فناوری مخابرات خطوط قدرت

۳. نسل اول: از ارسال صوت و داده تا سیستم‌های خودکارسازی

نسل اول سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت دربرگیرنده سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت فوق باریک‌باند و باریک‌باند با نرخ بیت کم است که هر دو دسته مبتنی بر استفاده از مدوله‌سازی تک‌حامل هستند و فناوری مخابرات خطوط قدرت عملاً با پیاده‌سازی نسخه‌های اولیه از این سیستم‌ها به دنیا معرفی شد. این نسل از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در طی سالیان متمادی به خوبی گسترش یافته‌اند و در حال حاضر نسخه‌های متفاوتی از این نسل در سطوح مختلف ولتاژ شبکه قدرت در سراسر جهان مورد استفاده است. حوزه کاربری این نسل از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت نیز نسبتاً گسترده است و از کاربردهای اولیه به منظور مدیریت و کنترل بار شبکه و انتقال صوت تا پیاده‌سازی زیرساخت‌های قرائت از دور، سیستم‌های خودکارسازی صنعتی و خانگی نظیر سیستم‌های هشدار دزدی و آتش را شامل می‌شود.

جزئیات طیف فرکانسی و مدوله‌سازی مورد استفاده در هر دسته از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت به همراه نرخ بیت آنها در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، طیف فرکانسی نسل اول این سیستم‌ها محدود به فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ کیلوهرتز است که از این بین محدوده فرکانسی ۱۵۰ تا ۳۰۰۰ هرتز مختص به سیستم‌های فوق باریک‌باند است و محدوده ۳ تا ۵۰۰ کیلوهرتز به سیستم‌های باریک‌باند با نرخ بیت کم اختصاص دارد. سیستم‌های فوق باریک‌باند به علت استفاده از فرکانس‌های نزدیک به فرکانس شبکه قدرت مشکل عبور نشانک / سیگنال از مبدل را ندارند و قابلیت پوشش دهی فاصله عملیاتی زیادی را در سطوح ولتاژ بالا و متوسط شبکه و در رنج‌های بیشتر از صد کیلومتر دارند. علی‌رغم نرخ بیت پایین، معمولاً با پیاده‌سازی ساختارهای موازی از این سیستم‌ها امکان افزایش تعداد مشتریان تا سطح چندصد هزار وجود دارد (Galli et al., 2011). از جمله معروف‌ترین سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت فوق باریک‌باند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

● RCS^۱:

تاریخچه این سیستم‌ها به سال‌های ۱۹۵۰ میلادی برمی‌گردد که برای مدیریت بار شبکه توسط شرکت‌های برق و به صورت ویژه برای اصلاح اوج بار و خاموش کردن تجهیزات پرمصرف در هنگام وقوع اوج بار شبکه راه‌اندازی شدند و در بسیاری از کشورهای اروپایی در حال استفاده هستند (Neuberg, 2009). این سیستم مبتنی بر استفاده از محدوده فرکانسی ۱۲۵-۲۰۰۰ هرتز و مدولاسیون ASK است که قابلیت فراهم آوردن یک مسیر ارتباطاتی یک‌طرفه با سرعتی برابر با چندین بیت بر ثانیه را دارد (Galli et al., 2011; Dzung et al., 2011).

● System Turtle:

علاوه بر کاربردهای مدیریت بار، سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت فوق باریک‌بند به مرور زمان کاربردهای دیگری در راه‌اندازی زیرساخت قرائت از دور و زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته پیدا کردند. سیستم Turtle معروف‌ترین سیستم برای پیاده‌سازی زیرساخت قرائت از راه دور است که یک مسیر مخابراتی یک‌سویه با نرخ بیت بسیار کم در حد یک هزارم بیت بر ثانیه را برای شرکت‌های برق جهت قرائت از راه دور فراهم می‌کند (Galli et al., 2011; Dzung et al., 2011). البته لازم به ذکر است که نسخه‌های دوطرفه این سیستم نیز از سال ۲۰۰۲ به بعد به بازار عرضه شده‌اند (Galli et al., 2011).

● TWACS¹:

این سیستم یک مسیر مخابراتی دوطرفه بین مشترک و شرکت‌های برق فراهم می‌آورد و بیشتر در ایالات متحده آمریکا برای پیاده‌سازی زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته و خودکار سازی توزیع مورد استفاده است. این فناوری قابلیت ارائه نرخ بیتی برابر با دوبرابر فرکانس شبکه برق دارد (Mak & Reed, 1982; 1984). محدوده فرکانسی دسته دوم از نسل اول سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت یعنی سیستم‌های باریک‌بند با نرخ بیت کم معطوف به ۳ تا ۵۰۰ کیلوهرتز است. بر این مبنا، محدوده عملیاتی مورد استفاده در نقاط مختلف جهان به صورت زیر است:

● آمریکا: کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا^۲ محدوده فرکانسی ۱۰-۴۹۰ کیلوهرتز را برای فرکانس کاری سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت تخصیص داده است.

● اروپا: در اروپا محدوده فرکانسی این سیستم‌ها توسط مؤسسه CENELEC^۳ به ۳-۱۴۸/۵ کیلوهرتز محدود شده است که خود متشکل از چهار زیربند مختلف: باند A: ۳-۹۵ کیلوهرتز، باند B: ۹۵-۱۲۵ کیلوهرتز، باند C: ۱۲۵-۱۴۰ کیلوهرتز، و باند D: ۱۴۰-۱۴۸/۵ کیلوهرتز است. ● ژاپن: این باند در ژاپن توسط ARIB^۴ در محدوده فرکانس‌های ۱۰-۴۵۰ کیلوهرتز تخصیص داده شده است.

● چین: در چین نیز محدوده کلی ۳-۵۰۰ کیلوهرتز برای این منظور لحاظ شده است.

کاربرد سیستم‌های باریک‌بند با نرخ بیت کم اغلب معطوف به شبکه قدرت و خودکار سازی صنعتی و خانگی می‌شد و استانداردهای متفاوتی از این دسته سیستم‌ها در دسترس است که مشهورترین آنها عبارت‌اند از:

● X-10:

این فناوری در سال ۱۹۷۵ در کشور اسکاتلند برای ایجاد یک بستر مخابراتی بین تجهیزات مخابراتی داخل خانه و کنترل آنها همچون کنترل سیستم روشنایی و وسایل صوتی و تصویری معرفی شد و به

1- Two-Way Automatic Communications System (TWACS) 2- Federal Communications Commission (FCC)

3- European Committee for Electrotechnical Standardization 4- Association of Radio Industries and Business

خاطر هزینه پیاده‌سازی کم و حجم بالای استفاده در سطح جهان از جمله محبوب‌ترین سیستم‌های خودکارسازی خانگی محسوب می‌شود (Dzung et al., 2011; Galli et al., 2011). این سیستم با استفاده از محدوده فرکانسی ۹۵-۱۲۵ کیلوهرتز توانایی ارسال ۶۰ بیت بر ثانیه اطلاعات را فراهم می‌آورد. به‌عنوان مثال، XM10 یک مودم (فرستنده و گیرنده) مبتنی بر این قرارداد است که از یک طرف به پریز برق متصل می‌شود و از طرف دیگر با اتصال به کنترل‌کننده تجهیزات مشترک، امکان ارسال نشانک‌ها/سیگنال‌ها کنترلی از طریق سیم‌کشی ساختمان را فراهم می‌آورد (Mlynek et al., 2015).

● **ISO/IEC 14908-3 (LonWorks):**

این استاندارد توسط کمیته بین‌المللی الکتروتکنیک^۱ برای پیاده‌سازی سیستم‌های خودکارسازی خانگی و صنعتی توسط سیم‌کشی قدرت ارائه شده است و به دلیل اینکه طراحی آن بر هر هفت لایه سازمان بین‌المللی استانداردسازی^۲ است. تحت عنوان ISO / IEC شناخته می‌شود. تجهیزات مبتنی بر این استاندارد به نحوی طراحی شده‌اند که بر مبنای محیط مورد استفاده (شبکه قدرت یا محیط‌های خانگی و تجاری)، قابلیت سوییچ بین دو فرکانسی کاری مختلف را داراست. مودم‌های PL ۳۱۲۰ و PL3150 از جمله تجهیزات مبتنی بر این استاندارد هستند که نرخ بیت‌های در محدوده ۳ تا ۶ کیلوبیت بر ثانیه را با استفاده از مدوله‌سازی PSK باینری فراهم می‌آورند (Lampeet al., 2016).

● **ISO/IEC 14543-3-5 (KNX):**

استاندارد دیگر کمیته بین‌المللی الکتروتکنیک برای خودکارسازی است که بر مبنای هر هفت لایه سازمان بین‌المللی استانداردسازی طراحی شده است و علاوه بر ساختار شبکه قدرت و سیم‌کشی آن، قابلیت پیاده‌سازی بر روی ساختارهای دیگری همچون زوج سیم تلفن ثابت و حتی محیط‌های بی‌سیم را دارد (Dzung et al., 2011; Galli et al., 2011). این استاندارد مبتنی بر مدوله‌سازی FSK باینری است و قابلیت ارائه نرخ بیت برابر با ۱۲۰۰ بیت بر ثانیه را در فرکانس کاری ۱۱۰ کیلوهرتز دارد (Lampe et al., 2016).

● **IEC 61334:**

استاندارد دیگر کمیته بین‌المللی الکتروتکنیک برای سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت باریک‌بند است که از ساختار استاندارد هفت لایه سازمان بین‌المللی استانداردسازی پیروی نمی‌کند و نسخه‌های متفاوتی از آن از جمله IEC 61334-3-1 و IEC 61334-5-2 در دسترس است. این استانداردها مبتنی بر مدوله‌سازی‌های FSK و S-FSK هستند و در حال حاضر به صورت گسترده‌ای در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله تجهیزات مبتنی بر این استاندارد می‌توان به STV۵۷۰ و AMIS-۴۹۵۸۷ اشاره کرد (Mlynek et al., 2015).

● KONNEX EN50065-1:

استاندارد مؤسسه CENELEC برای سیستم‌های باریک باند ولتاژپایین است که در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است (CENELEC Std. EN 50065-1, 1992). از جمله تجهیزات مبتنی بر این استاندارد می‌توان به ST7540 اشاره کرد که توسط STMicroelectronics طراحی شده است (Mlynek et al., 2015).

۴. نسل دوم: از شبکه دسترسی بیرون خانه تا سرویس‌های پرسرعت خانگی

این نسل شامل سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت پهن باند است که تاریخچه آن به اقبال شرکت‌های برق به ارائه سرویس‌های پهن باند از طریق زیرساخت شبکه قدرت در دهه آخر قرن بیستم برمی‌گردد. با توجه به نرخ بیت بالای مورد نیاز برای ارائه سرویس‌های پرسرعت، محدوده فرکانسی مورد استفاده در این سیستم‌ها معطوف به فرکانس‌های بیشتر از یک مگاهرتز و بازه ۲-۳ مگاهرتز شد که قابلیت ارائه نرخ‌های ۲۰۰ تا ۲۰۰ مگاهرتز بر ثانیه دارد. ضمناً، به منظور افزایش نرخ بیت‌های در جهت استفاده از محدوده‌های فرکانسی بالاتر تا فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز انجام پذیرفته است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. اولین نتیجه این افزایش فرکانس شدت تضعیف نشانک/سیگنال است که باعث کاهش فاصله پوشش‌دهی سیستم‌های پهن باند در مقایسه با سیستم‌های باریک باند و فوق باریک باند می‌شود. لذا، گرچه برخی تلاش‌ها برای مطالعه و بررسی عملکرد سیستم‌های پهن باند در شبکه ولتاژ متوسط انجام پذیرفته است، این سیستم عملاً منحصر به بخش ولتاژ پایین شبکه قدرت است (Galli et al., 2011; Dzung et al., 2011).

سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت پهن باند به دو دسته تقسیم می‌شوند: سیستم‌های خارج از خانه و سیستم‌های داخل خانه. سیستم‌های خارج از خانه در قسمت بیرون از خانه شبکه ولتاژپایین از مبدل توزیع تا کنتور مشترک پیاده‌سازی می‌شوند و کاربردهایی نظیر پیاده‌سازی شبکه دسترسی شبکه‌های مختلف مخابراتی دارند. سیستم‌های داخل خانه در داخل ساختمان‌ها، اداره‌ها و صنایع پیاده‌سازی می‌شوند و کاربردهایی نظیر ایجاد شبکه‌های رایانه‌ای باندوسیع، ارائه اینترنت پرسرعت و انواع سرویس‌های باندوسیع صوت و ویدئو نظیر سیستم‌های نظارت ویدیویی و ویدئوکنفرانس دارند (Galli et al., 2011; Lampe et al., 2016).

با توجه به افزایش فرکانس کاری سیستم‌های پهن باند و تعدد انشعابات و ناپیوستگی‌ها در شبکه ولتاژپایین قدرت، پدیده‌های تضعیف و انتشار چندمسیره نشانک/سیگنال در سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت پهن باند نمود بیشتری دارند؛ بنابراین روش‌های کدگذاری و روش‌های مدوله‌سازی جدیدی برای این سیستم‌ها مطرح شده است که از بین آنها مدوله‌سازی تقسیم فرکانس عمودبرهم^۱ یا همان OFDM به علت ویژگی‌هایی نظیر مقاوم بودن در برابر اثرات انتشار چندمسیره و نوفه ضربه‌ای

1- Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)

برگزیده و استاندارد شده است. اساس کار این روش بر مبنای تقسیم بندی دنباله سری اطلاعات ورودی با نرخ بالا به تعدادی دنباله موازی با نرخ کمتر، مدوله کردن تعدادی فرکانس حامل متعامد توسط هرکدام از این زیردنباله ها و ارسال هم زمان آنها از طریق زیرکانال های سیستم است (Biglieri, 2003). مهم ترین فعالیت های استاندارد سازی در بازار سیستم های پهن باند معطوف به تلاش های چهار شرکت یا مؤسسه IEEE، HD-PLC، HomePlug و ITU است که در ادامه عمده فعالیت های استاندارد سازی آنها معرفی می شود.

● HomePlug¹:

مؤسسه HomePlug در سال ۲۰۰۰ میلادی با مشارکت بیش از ۶۰ شرکت مختلف از شرکت های انرژی گرفته تا سازندگان مودم های مخابراتی تأسیس شد و در سال ۲۰۰۱ اولین استاندارد این مؤسسه برای سیستم های پهن باند تحت عنوان HomePlug 1.0 ارائه شد که مبتنی بر استفاده از FFT-OFDM در محدوده فرکانسی ۴-۲۱ مگاهرتز است و قابلیت ارائه نرخ بیت های ۱۴ مگابیت بر ثانیه دارد. در سال ۲۰۰۵، استاندارد دیگری تحت عنوان HomePlug AV توسط این شرکت ارائه شد که معطوف به محدوده فرکانسی ۱/۸-۳۰ مگاهرتز است و از قابلیت ارائه سرویس هایی با نرخ بیت ۲۰۰ مگابیت بر ثانیه برخوردار است. اخیراً، این مؤسسه با افزایش محدوده فرکانسی تا ۸۶ مگاهرتز و استفاده از روش ارسال چندگانه روی ساختار سه سیمه داخل خانه، استاندارد HomePlug AV2 را روانه بازار کرده است که نرخ بیت آن از ۲۰۰ مگابیت بر ثانیه نیز بیشتر است (www.homeplug.org). به عنوان یک مثال از تجهیزات می توان به مودم PLA-400 از شرکت ZyXEL اشاره کرد که از استاندارد HomePlug AV پیروی می کند (https://www.zyxel.com/uk/en/products_services/pla_400.shtml).

● HD-PLC²:

استاندارد HD-PLC که استاندارد مهم دیگری در بازار سیستم های مخابرات خطوط قدرت پهن باند است، به عنوان رقیب استانداردهای HomePlug محسوب می شود و قابلیت همزیستی با آنها ندارد. دلیل این ناسازگاری در استفاده استاندارد HD-PLC از روش wavelet-OFDM و محدوده فرکانسی ۲-۲۸ مگاهرتز است که قابلیت ارائه نرخ بیت ۲۱۰ مگابیت بر ثانیه دارد (www.hd-plc.org). شرکت پاناسونیک از جمله سازندگان تجهیزات HD-PLC است که اطلاعات آنها موجود است^۳.

● IEEE1901:

ناسازگاری استانداردها و تجهیزات موجود در بازار، سازمان های استاندارد سازی جهانی را بر آن داشت که نسبت به ارائه یک استاندارد واحد برای سیستم های پهن باند اقدام کنند. مهم ترین این فعالیت ها تشکیل گروه کاری IEEE P1901 در سال ۲۰۰۵ با هدف ارائه یک استاندارد واحد برای سیستم های PLC

1- HomePlug Power Line Alliance

2- High Definition Power Line Communication

3- <http://www.hdplc.org/modules/products/panasonic.html>

پهن باند داخل خانه و بیرون از خانه در محدوده فرکانسی کمتر از ۱۰۰ مگاهرتز است که قابلیت سازگاری و هم‌زیستی با استانداردهای موجود را داشته باشد. تلاش این گروه به ارائه استاندارد IEEE P1901 برای سیستم‌های PLC پهن باند انجامید که در دسامبر ۲۰۱۰ توسط کمیته استانداردسازی مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک مورد تصویب قرار گرفت. در این استاندارد برای فراهم کردن امکان هم‌زیستی با استانداردهای HomePlug و HD-PLC قابلیت عملکرد بر مبنای دو لایه فیزیکی متفاوت OFDM-FFT و wavelet-OFDM پیش‌بینی شده است (Carcelle, 2009; Ferreira et al., 2010).

● ITU G.hn:

اتحادیه بین‌المللی ارتباطات راه دور سازمان استانداردسازی دیگری است که نسبت به استانداردسازی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت اقدام کرده است و استانداردهای خود برای سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت پهن باند را تحت عنوان G.hn روانه بازار کرده است. لازم به ذکر است که استاندارد G.hn در سال ۲۰۰۹ توسط اتحادیه مذکور برای پیاده‌سازی شبکه خانگی ارائه شده است و برخلاف استانداردهایی که تاکنون به آنها اشاره شده است، فقط مختص به خطوط قدرت نیست؛ بلکه تجهیزات مبتنی بر استاندارد G.hn قابلیت عملکرد در تمامی ساختارهای سیمی داخل خانه نظیر خطوط تلفن، کابل هم‌محور و خطوط قدرت را دارد. این استاندارد مبتنی بر استفاده از روش OFDM-FFT است. ضمناً در استاندارد IEEE P1901 یک سازوکار هم‌زیستی پیش‌بینی شده است که امکان هم‌زیستی آن با استانداردهای اتحادیه بین‌المللی ارتباطات راه دور را فراهم می‌آورد (Carcelle, 2009; Ferreira et al., 2010).

۵. نسل سوم: زیرساخت اختصاصی شبکه هوشمند

با مطرح شدن مفهوم شبکه هوشمند و لزوم پیاده‌سازی یک ساختار مخابراتی دوسویه به موازات شبکه قدرت، بار دیگر توجه شرکت‌های برق به فناوری مخابرات خطوط قدرت معطوف شد. اما مشکل اصلی در این بود که نسل اول سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت از نرخ بیت کمی برخوردار بودند و نمی‌توانستند پاسخگوی الزامات و نیازمندی‌های شبکه هوشمند باشند و سیستم‌های نسل دوم نیز به بخش ولتاژ پایین شبکه و اغلب به محیط‌های داخل خانه معطوف بودند و از فاصله پوشش‌دهی کم رنج می‌بودند. لذا طراحی نسل جدیدی از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در کانون توجه قرار گرفت که باید ضمن ارسال اطلاعات با سرعتی چندین برابر سرعت نسل اول، از فاصله پوشش‌دهی بیشتری نسبت به نسل دوم برخوردار باشد و فقط معطوف به بخش ولتاژ پایین شبکه نباشد.

بنابراین مطالعات بر روی نسل سوم این سیستم‌ها تحت عنوان سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت باریک باند با نرخ بیت بالا معطوف شد که این سیستم‌ها از یک طرف همانند سیستم‌های باریک باند با نرخ بیت کم از محدوده فرکانسی ۳-۵۰۰ کیلوهرتز استفاده می‌کردند که به آنها اجازه

افزایش فاصله پوشش دهی می‌داد و از طرف دیگر بهره‌مندی از مدوله‌سازی OFDM افزایش سرعت ارسال اطلاعات را برای این نسل به ارمغان می‌آورد. با توجه به اینکه این نسل از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت به منظور پاسخگویی به نیازمندی‌های شبکه قدرت طراحی شده‌اند، کاربرد آنها بیشتر معطوف به شبکه قدرت و کاربردهایی همچون پیاده‌سازی کنتور هوشمند، زیرساخت قرائت از راه دور، زیرساخت دوطرفه‌اندازه‌گیری پیشرفته، شبکه‌سازی وسایل و تجهیزات برقی مشترکان و فراهم آوردن مسیر ارتباطی بین شبکه قدرت و خودروهای هیبریدی برای خرید شارژ است (Yigit et al., 2014). اغلب سرمایه‌گذاری‌های اولیه در حوزه این نسل از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت با حمایت و مدیریت شرکت‌های برق انجام پذیرفته است و به مرور زمان سازمان‌های استانداردسازی جهانی به بازار این نسل از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت ورود کرده‌اند و نسبت به استانداردسازی آن اقدام کرده‌اند که اهم فعالیت‌های این حوزه عبارت‌اند از:

● PRIME¹:

شروع این پروژه به سال ۲۰۰۷ برمی‌گردد که هدف آن تهیه یک استاندارد مبتنی بر مدوله‌سازی OFDM برای سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت باریک‌بند در باند فرکانسی CENELEC A یعنی همان ۳-۹۵ کیلوهرتز بود. در سال ۲۰۰۸، مشخصات این استاندارد منتشر شد و در سال ۲۰۰۹ مؤسسه PRIME تحت مدیریت شرکت برق اسپانیایی Iberdrola و با مشارکت بیش از ۵۰ مؤسسه دیگر همچون STMicroelectronics و Texas Instruments با هدف فراهم آوردن مسیر مخابراتی بین کنتور مشترک و ایستگاه پایه در سمت مبدل ولتاژ پایین توزیع راه‌اندازی شد. در حال حاضر، تجهیزات مختلف این استاندارد علاوه بر استفاده در صنعت برق، در سایر حوزه‌ها نظیر قرائت از راه دور کنتور گاز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، این استاندارد در سال ۲۰۱۲ تحت حمایت اتحادیه بین‌المللی ارتباطات راه دور قرار گرفت و با عنوان ITU-T G9904 به چاپ رسید. تجهیزات این استاندارد مبتنی بر مدولاسیون OFDM و استفاده از محدوده فرکانسی ۴۲-۸۹ کیلوهرتز هستند و قابلیت ارائه نرخ بیت تا ۱۲۸/۶ کیلوبیت بر ثانیه را داراست و از جمله این تجهیزات می‌توان به ST7590 از STMicroelectronics اشاره کرد (www.prime-alliance.org).

● G3-PLC:

مشخصات این استاندارد در سال ۲۰۰۹ توسط شرکت Texas Instruments و به منظور دستیابی به نیازمندی‌های شرکت برق فرانسوی ERDF^۲ جهت کاربردهای هوشمندسازی شبکه نظیر زیرساخت‌های قرائت از راه دور و اندازه‌گیری پیشرفته، خرید شارژ خودروهای برقی و خودکارسازی خانگی منتشر شد و سپس در سال ۲۰۱۱ مؤسسه G3-PLC تحت مدیریت ERDF و با مشارکت بیش از ده عضو دیگر نظیر

Maxim Integrated Products و Texas Instruments برای تجاری‌سازی این مشخصات تأسیس شد و در طی سال‌های بعد تجهیزات آن روانه بازار شد. این استاندارد نیز در سال ۲۰۱۲ تحت حمایت اتحادیه بین‌المللی ارتباطات راه دور قرار گرفت و با عنوان ITU-T G9903 به چاپ رسید. تجهیزات این استاندارد مبتنی بر مدوله‌سازی OFDM و محدوده‌های فرکانسی CENELEC A و کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا را پوشش می‌دهد و قابلیت ارائه نرخ بیت تا ۲۴۰ کیلوبیت بر ثانیه را دارد. از جمله این تجهیزات می‌توان به MAX2992 از Maxim Integrated Products اشاره کرد (www.g3-plc.com).

● IEEE 1901.2:

گروه کاری IEEE 1901.2 در سال ۲۰۱۰ با هدف طراحی و تعریف یک استاندارد واحد با پیچیدگی کم برای سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت باریک‌بند با نرخ بیت بالا در محدوده فرکانسی کمتر ۵۰۰ کیلوهرتز جهت کاربردهای شبکه هوشمند تأسیس شد و قابلیت عملکرد در خطوط ولتاژ مستقیم و متناوب و همچنین در محیط‌های داخل خانه و بیرون از خانه ولتاژ پایین، عبور از مبدل توزیع و خطوط ولتاژ متوسط از اهداف این استاندارد بود. این گروه کاری با مبنای قرار دادن استاندارد G3-PLC، در نهایت در سال ۲۰۱۳ موفق به دریافت تأییدیه کمیته استانداردسازی مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک و چاپ استاندارد IEEE1901.2 شد. انتظار می‌رود که تجهیزات مبتنی بر این استاندارد نرخ بیت‌هایی تا ۵۰۰ کیلوبیت بر ثانیه را فراهم آورند (Carcelle, 2009; Ferreira et al., 2010).

● ITU Gh.nem:

اتحادیه بین‌المللی ارتباطات راه دور نیز همانند مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک و با هدفی مشابه با استاندارد IEEE1901.2 در سال ۲۰۱۰، فعالیت استانداردسازی این نسل از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت را شروع کرد و در ابتدا دو بسته استاندارد ITU-T G.9955 و ITU-T G.9956 را منتشر کرد که حاوی مشخصات لایه‌های فیزیکی و داده سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت باریک‌بند با نرخ بیت بالا بود و دربرگیرنده استانداردهای PRIME و G3-PLC. برای جلوگیری از ابهام، این اتحادیه بسته استانداردسازی خود را در قالب سه دسته مجزا ITU-T G.9904، ITU-TG.9903 و ITU-T Gh.nem منتشر کرد که دوتای اول همان مشخصات PRIME و G3-PLC هستند و توسط این دو مؤسسه به تأیید رسیده‌اند و بسته سوم نیز استاندارد خود این اتحادیه برای این نسل از سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت است (Carcelle, 2009; Ferreira et al., 2010).

۶. ارزیابی وضعیت فعلی و پیش‌بینی بازار فناوری مخابرات خطوط قدرت

همانطور که در قسمت‌های پیشین اشاره شد، فناوری‌های مخابراتی خطوط قدرت به دو دسته عمده فناوری‌های سیمی و بی‌سیم تقسیم می‌شوند که عملکرد هر کدام از آنها از جنبه‌های مختلف قابل بررسی و مقایسه با یکدیگر است. باتوجه به اینکه این مقاله صرفاً معطوف به مخابرات خطوط قدرت است و

پرداختن به جزئیات همه این فناوری‌ها از حوصله این بحث خارج است، در قسمت‌های قبلی به برخی از ویژگی‌ها و مزایای فناوری مخابرات خطوط قدرت در مقایسه با سایر فناوری‌ها اشاره شد. علاوه بر این، جدول ۲ نیز معرف یک جمع‌بندی و مقایسه اجمالی بین این فناوری‌ها است که بر مبنای اطلاعاتی تهیه شده است و جزئیات مفصل‌تر آن در این مراجع در دسترس است (Kabalci, 2016; Kuzlu et al., 2014). همانطور که اشاره شد و از جدول ۲ نیز مشخص است، فناوری مخابرات از ویژگی‌های منحصر به فردی همچون حفظ استقلال شرکت‌های برق، وجود دسته‌بندی‌های مختلف و متناسب با سطوح مختلف ولتاژ شبکه و ... برخوردار است و از این رو شرکت‌های برق توجه گسترده‌ای را معطوف به این حوزه کرده‌اند که به مهم‌ترین آنها در قالب قسمت‌های پیشین اشاره شد. در ادامه نیز برخی پروژه‌های مهم این حوزه به همراه وضعیت بازار جهانی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد و از این رهگذر به وضعیت و جایگاه این فناوری در کشور ایران به بحث گذاشته می‌شود.

جدول ۲: مقایسه اجمالی فناوری‌های مخابراتی شبکه هوشمند

فناوری	استاندارد	نرخ بیت (مگابیت بر ثانیه)	فاصله پوشش دهی	مزایا	معایب
مخابرات خطوط قدرت	NB-PLC	۰/۵-۰/۰۱	تا ۱۵۰ کیلومتر	حفظ استقلال شرکت‌های برق، هزینه پیاده‌سازی و نگهداری کم	تضعیف کانال، وجود تجهیزات ناسازگار
	BB-PLC	۲۰۰-۱۰	تا ۲ کیلومتر		
فیبر نوری	PON	۲۵۰۰-۱۵۵	تا ۶۰ کیلومتر	نرخ بیت بالا و فاصله پوشش دهی مناسب	از دست رفتن استقلال شرکت‌های برق، هزینه پیاده سازی بسیار بالا
	ADSL	۸-۱	تا ۵ کیلومتر		
خطوط اشتراک رقمی / دیجیتال	VDSL	۱۰۰-۱۵	تا ۱/۵ کیلومتر	استفاده از ساختار موجود و نسبتاً گسترده تلفن ثابت	از دست رفتن استقلال شرکت‌های برق، هزینه شارژ بالا
	IEEE ۸۰۲,۱۱x	بسته به نسخه فناوری تا ۶۰۰	بسته به نسخه تا ۱ کیلومتر	هزینه پیاده‌سازی کم، مناسب برای مایل آخر	از دست رفتن استقلال شرکت‌های برق، فاصله پوشش دهی کم، مصرف بالایی توان
بی سیم	IEEE ۸۰۲,۱۶	بسته به نسخه تا ۷۵	بسته به نسخه تا ۵۰ کیلومتر	فاصله پوشش دهی نسبتاً بالا	از دست رفتن استقلال شرکت‌های برق، هزینه نسبتاً بالا و مدیریت پیچیده شبکه

ادامه جدول ۲

از دست رفتن استقلال شرکت‌های برق، هزینه بالا و نرخ بیت کم	سرویس دهی به تعداد زیادی کاربر، توان کم و انعطاف پذیری بالا	تا ۵۰ کیلومتر	تا ۱۴/۴	نسل دوم	مخابرات سلولی	بی سیم
از دست رفتن استقلال شرکت‌های برق، هزینه بالا و تأخیر زیاد	فاصله پوشش دهی و قابلیت اعتماد بسیار بالا	۱۰۰-۶۰۰ کیلومتر	تا ۱	Satellite Internet	ماهواره	

پروژه‌های متعددی از پیاده‌سازی نسل‌های مختلف سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در سطح دنیا وجود دارد و می‌توان گفت سیستم‌های نسل اول کنونی مورد استفاده گسترده شبکه قدرت و صنعت هستند. در ارتباط با نسل‌های دوم و سوم نیز موارد متعددی از پیاده‌سازی‌های آزمایشی و عملی گزارش شده است (شیخ‌حسینی، ۱۳۹۷) و (Galli & Lys, 2015) که به معرفی کاربردهای سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت و به‌ویژه نسل سوم آنها در سطوح مختلف ولتاژ شبکه اختصاص دارد. برخی از این کاربردها با تأکید بر شبکه هوشمند در جدول ۳ ارائه شده است. بر مبنای اطلاعات (Galli & Lys, 2015) نسل سوم سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت به‌صورت آزمایشی و در سطح در کشورهای مختلف پیاده‌سازی شده است که نام این کشورها در جدول ۴ ذکر شده است. در ارتباط با سیاستگذاری اتحادیه اروپا نسبت به کاهش بیست درصدی تشعشعات کربنی و نصب نزدیک به ۲۰۰ میلیون کنتور هوشمند، برخی منابع^۱ به بررسی پروژه‌های نصب کنتور هوشمند مبتنی بر مخابرات خطوط قدرت در کشورهای مختلف این اتحادیه اقدام کرده‌اند که طبق آن فقط تا سال ۲۰۱۳ بیش از ۳۶ میلیون کنتور هوشمند مبتنی بر مخابرات خطوط قدرت در کشور ایتالیا نصب شده است. علاوه بر این، مطابق اطلاعات مرجع^۲ پروژه‌های مرتبط با هوشمندسازی شبکه قدرت در سطح اتحادیه اروپا را معرفی می‌کند که دربرگیرنده پروژه‌های مرتبط با مخابرات خطوط قدرت نیز است. منابعی نیز معطوف به معرفی فعالیت‌های استانداردسازی، تجهیزات و اطلاعات قیمت آن‌ها و پروژه‌های مختلف سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در سطح دنیا می‌باشند (Masood & Baig, 2016; Uribe-Perez et al., 2017; Sharma & Saini, 2017) که از این بین (Masood & Baig, 2016) اختصاصاً به بررسی نسل سوم سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت پرداخته است. به‌عنوان یک مثال از فعالیت‌های فناوری مخابرات خطوط قدرت در حوزه کشورهای شرق آسیا نیز می‌توان به پی‌سپان و همکاران^۳ (۲۰۱۸) اشاره کرد که معطوف به بررسی نقش این فناوری در مدیریت سیستم انرژی خانگی در تایلند اختصاص دارد. در ارتباط با تست تجهیزات در سطح شبکه‌های برق دنیای نیز

1- Haidine et al. & Barzola & Rubini

2- Andreadou et al.

3- Pisman et al.

مطالعات متعددی گزارش شده است (Aruzuaga et al., 2010; Depari et al., 2013; Sendin et al., 2012) به تست تجهیزات مبتنی بر استاندارد PRIME اختصاص دارد و در نتایج مربوط به آزمایش مودم‌های PLC-G³ گزارش شده است (Razazian et al., 2010; 2011; Park et al., 2012). ضمناً ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که بررسی و ارزیابی عملکرد ترکیب فناوری مخابرات خطوط قدرت با سایر فناوری‌ها همچون فناوری مخابرات بی‌سیم WiFi از دیگر موضوعات مهم در حوزه فناوری‌های مخابراتی شبکه قدرت است که به‌عنوان نمونه پژوهش‌های (Dib et al., 2018; Moaveninejad et al., 2017) معطوف به ارزیابی این ترکیب برای شبکه هوشمند و اینترنت اشیا هستند.

جدول ۳: کاربردهای سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در هوشمند^۱

کاربردها	سطح ولتاژ
<ul style="list-style-type: none"> ارسال صوت و داده اهداف حفاظتی همچون آشکارسازی شکستگی و اتصال کوتاه عایق بندی تخمین حالت نظارت راه دور پست‌ها 	ولتاژ بالا
<ul style="list-style-type: none"> آشکارسازی خطا و پایش شبکه زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته خودکار پست‌ها و برقراری ارتباط بین تجهیزات الکترونیکی پست‌ها ممانعت از جزیره‌ای شدن شبکه 	ولتاژ متوسط
<ul style="list-style-type: none"> اندازه‌گیری هوشمند زیرساخت مخابراتی بین شبکه و خودروها پاسخگویی بار سیستم مدیریت انرژی خانگی سیستم‌های خودکارسازی خانگی 	ولتاژ پایین

جدول ۴: فعالیت‌های پیاده‌سازی نسل سوم سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت

فناوری	پیاده‌سازی در سطح وسیع	پیاده‌سازی در سطح آزمایشی
PRIME	<ul style="list-style-type: none"> اسپانیا لهستان 	<ul style="list-style-type: none"> اروپا: لوکزامبورگ، انگلیس، پرتغال و روسیه استرالیا
PLC-G ³	<ul style="list-style-type: none"> ژاپن فرانسه لوکزامبورگ 	<ul style="list-style-type: none"> آسیا: چین، کره، مالزی، هند و تایوان اروپا: آلمان، نروژ، فنلاند و بلژیک استرالیا مکزیک الجزایر
IEEE 1901.2	-	<ul style="list-style-type: none"> هنگ گنگ

بر مبنای یک گزارش از بازار جهانی فناوری مخابرات خطوط قدرت از وبگاه www.marketsandmarkets.com، بازار این فناوری در سال ۲۰۱۷ برابر با ۵/۴۷ میلیارد دلار آمریکا برآورد شده است و پیش بینی شده است که ارزش این بازار با نرخ رشد ۹/۵۳ سالانه، در نهایت در سال ۲۰۲۳ به ۹/۴۵ میلیارد دلار برسد. در این گزارش از کاربردهای فناوری مخابرات خطوط قدرت در شبکه هوشمند به همراه افزایش تقاضا برای فناوری پهن باند مخابرات خطوط قدرت جهت پیکربندی شبکه‌های خانگی به عنوان دو دلیل اصلی این رشد نام برده شده است که در واقع این دلایل ریشه در نسل‌های دوم و سوم این فناوری دارد. برای بررسی وضعیت بازار فناوری مخابرات خطوط قدرت در این گزارش نقاط مختلف جهان بر مبنای نواحی جغرافیایی اروپا، آسیای شرقی و اقیانوسیه، آمریکای شمالی و سایر مناطق (شامل آمریکای جنوبی، خاورمیانه و آفریقا) تقسیم بندی شده است و اشاره شده است که اروپا اولین منطقه‌ای است که این فناوری را در مقیاس بزرگ پیاده‌سازی کرده است و پیش بینی شده است تا سال ۲۰۲۳ نیز بیشترین سهم بازار را به خود اختصاص دهد. پس از اروپا، بیشترین سهم بازار مخابرات خطوط قدرت به ترتیب آسیای شرقی و اقیانوسیه، و آمریکای شمالی اختصاص دارد و در نهایت سایر مناطق جهان از این بازار سود می‌برند که کشورمان نیز جزو آنها خواهد بود. طبق یک گزارش دیگر در وبگاه (www.alliedmarketresearch.com) پیش بینی شده است که بازار جهانی فناوری مخابرات خطوط قدرت با نرخ رشد ۱۸/۴ درصدی سالانه از سال ۲۰۱۶، نهایتاً در سال ۲۰۲۲ به ۱۴/۹ میلیارد دلار برسد که در این گزارش نیز، همانند گزارش قبل، اروپا پیش‌تاز این بازار معرفی شده است و پس از آن کشورهای آسیای شرقی همچون چین، ژاپن، کره جنوبی و هند نام برده شده است.

گزارش‌های مشابه دیگری نیز در سایر وبگاه معتبر همچون (www.researchandmarkets.com) می‌توان یافت که همگی مؤید رشد سریع این بازار به واسطه ظهور نسل‌های دوم و سوم این فناوری و سهم عمده مناطق مختلف جهان همچون اروپا و آسیای شرقی و اقیانوسیه و آمریکای شمالی از آن هستند. اما علی‌رغم این رویکرد جهانی، متأسفانه فناوری مخابرات خطوط قدرت در کشور ایران مغفول مانده است و بنابر اطلاعات موجود همچون گزارش دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو^۱ گستره کاربری آن معطوف به سیستم‌های نسل اول این فناوری است و سرمایه‌گذاری در حوزه نسل‌های دیگر آن در قالب پروژه‌های تحقیقاتی، آزمایشگاهی و پیاده‌سازی گزارش نشده است. این در حالی است که موفقیت در این بازار مطابق گزارش‌های فوق در گرو سرمایه‌گذاری بر روی نسل‌های دوم و سوم مخابرات خطوط قدرت است. لذا این تحلیل تردیدی در اهمیت و ضرورت سرمایه‌گذاری در این حوزه و ورود سریع به بازار و بومی‌سازی فناوری مخابرات خطوط قدرت باقی نمی‌گذارد و امید می‌رود که این امر در سطح کلان توسط وزارتخانه‌ها و سازمان‌های مربوط مدنظر قرار گیرد و این خلأ پوشش داده شود.

۷. نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی و مرور جامع سیر تکامل فناوری مخابرات خطوط قدرت به‌عنوان یکی از فناوری‌های مهم مخابراتی مطرح در بازار انرژی و شبکه هوشمند اختصاص دارد. برای این منظور در قسمت اول این مقاله تجهیزات مورد استفاده برای پیاده‌سازی سیستم‌های مخابرات معرفی شد و مزایای استفاده از این سیستم‌ها در مقایسه با سایر فناوری‌های مخابراتی به‌همراه چالش‌های آنها به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با تقسیم‌بندی سیستم‌های مخابرات خطوط قدرت در قالب سه دسته عمده سیستم‌های فوق‌باریک‌باند، باریک‌باند و پهن‌باند، سیر تاریخی تکامل آنها در قالب سه نسل مختلف به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت و در معرفی هر نسل به ویژگی‌ها، کاربردها و پروژه‌های استانداردسازی آن نسل پرداخته شد و در طی آن سعی شد که نسبت به معرفی برخی تجهیزات، ویژگی‌ها و سازندگان آنها اقدام شود؛ بر مبنای نتایج بررسی سیر تکامل فناوری مخابرات خطوط قدرت، وضعیت فعلی و آینده آن نخست مشخص شد که این فناوری قطعاً سهم عمده‌ای از بازار فناوری‌های مخابراتی شبکه هوشمند را به خود اختصاص خواهد داد و این بازار در سال‌های آتی رشد چشمگیری را شاهد خواهد بود؛ دوم اینکه مشخص شد که دلایل اصلی این رشد ریشه در ظهور و پیدایش نسل‌های دوم و سوم این فناوری دارد. این در حالی است که استفاده از این فناوری در ایران تقریباً معطوف به نسل اول آن است و هرگونه پیشرفت در این حوزه در گرو سرمایه‌گذاری و توجه به نسل‌های جدید دوم و سوم آن است.

مراجع

- شناسایی فناوری‌های جدید در زمینه تولید، انتقال و توزیع برق انتقال اطلاعات از طریق خطوط برق به مصرف‌کننده نهایی، (۱۳۸۷). مجری: مؤسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی به سفارش دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو.
- شیخ حسینی، محسن (۱۳۹۷). پیشرفت‌های فناوری مخابرات خطوط قدرت در جهت هوشمندسازی شبکه برق. کنفرانس پیشرفت‌های اخیر در مهندسی و علوم نوین، مرکز همایش‌های بین‌المللی صداوسیما، تهران.
- فتوحی فیروزآبادی، محمود و رستگار، محمد (۱۳۹۳). شبکه هوشمند؛ نظامی نوین در صنعت برق، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، ۱۲(۶۲)، ۷۹-۴۷.

- Ancillotti, E.; Bruno, R. and Conti, M. (2013). The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges. *Computer Networks*, 36(17), 1665-1697.
- Andreadou, N.; Guardiola, M. O. and Fulli, G. (2016). Telecommunication technologies for smart grid projects with focus on smart metering applications. *Energies*, 9(5).
- Aruzaga, A.; Berganza, I.; Sendin, A.; Sharma, M. and Varadarajan, B. (2010). PRIME interoperability tests and results from field. In: *Proceedings of IEEE SmartGridComm 2010*, Gaithersburg, MD, USA.
- Barzola J. and Rubini, L. (2017). A Hypothetical Migration Analysis of the PLC based on IEEE 1901.2 Standard, In: *Proceedings of 1st World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, Orlando; United States.

- Biglieri, E. (2003). Coding and Modulation for a Horrible Channel. *IEEE Communications Magazine*, 41(5), 92-98.
- Brown, P. A. (1999). Power line communications—past present and future. In: *Proceedings of IEEE ISPLC 1999*, Lancaster, UK.
- Cano, C.; Pittolo, A.; Malone, D.; Lampe, L.; Tonello, A. M. and Dabak, A. G. (2016). State-of-the-art in power line communications: From the applications to the medium. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(7), 1935-1952.
- Carcelle, X. (2009). Power line communications in practice, Artech House, Boston.
- CENELEC Std. EN 50065-1, (1992). Signaling on Low-Voltage Electrical Installations in the Frequency Range 3 kHz–148.5 kHz.
- Chen, S.; Setta, M.; Chen, X. and Parini, C. G. (2009). Ultra-Wideband Powerline Communication (PLC) above 30MHz. *IET Communications*, 3(10), 1587-1596.
- Depari, A.; Ferrari, P.; Flammini, A.; Rinaldi, S.; Sisinni, E. and Vezzoli, A. (2013). On the use of prime powerline communication in industrial applications: Modbus a first test case. In: *Proceedings of IEEE MTC 2013*, Minneapolis, MN, USA.
- Dib, L. d. M. B. A.; Fernandes, V.; Filomeno, M. D. L. F. and Ribeiro, M. V. (2018). Hybrid PLC/ Wireless communication for smart grids and internet of things applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 655-667.
- Dzung, D.; Berganza, I. and Sendin, A. (2011). Evolution of powerline communications for smart distribution: From ripple control to OFDM. In: *Proceeding of IEEE ISPLC 2011*, Udine, Italy.
- Electric Power Research Institute (EPRI) (2009). Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap.
- Farhangi, F. (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power Energy Magazine*, 8(1), 18–28.
- Fang, X.; Misra, S.; Xue, G. and Yang, D. (2012). Smart grid—the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 14(4), 944–980.
- Ferreira, H. C.; Lampe, L.; Newbury, J. and Swart, T. G. (2010). Power line communications: Theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines, 1st edition, New York: Wiley.
- Galli, S.; Scaglione A. and Wang Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *Proceedings of the IEEE*, 99, 998–1027.
- Galli, S. and Lys, T. (2015). Next generation narrowband (Under 500 kHz) power line communications (PLC) standards. *China Communications*, 12(3), 1-8.
- Galli, S. and Logvinov, O. (2008). Recent developments in the standardization of power line communications within the IEEE. *IEEE Communications Magazine*, 46, 64-71.
- Haidine, A.; Tabone, A. and Muller, J. (2013). Deployment of power line communication by European utilities in advanced metering infrastructure. In: *Proceeding of IEEE ISPLC 2013, Johannesburg, South Africa*.
- IEEE Standards 643-2004, (2005). IEEE guide for power-line carrier applications.
- IEEE Std 2030, (2011). Guide for smart grid interoperability of energy technology and information technology operation with the electric power system, End-Use applications, and loads.
- Kabalci, Y. (2016). A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 302–318.
- Kuzlu, M.; Pipattanasomporn, M. and Rahman, S. (2014). Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN. *Computer Networks*, 67, 74–88.
- Lampe, L.; Tonello, A.M. and Swart, T. G. (2016). Power line communications: Principles, standards and applications from multimedia to smart grid, 2nd Edition, John Wiley.
- Loubery, C. R. (1901). Improved method of telegraphing, indicating time, or actuating mechanism electrically, British Patent GB 190 000 138.

- Mak S. and Reed, D. (1982). TWACS, a newviable two-way automatic communicationsystem for distribution networks. Part I: Outbound communication. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(8), 2941–2949.
- Mak S. and Reed, D. (1984). TWACS, a newviable two-way automatic communicationsystem for distribution networks. Part II: Inbound communication. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103(8), 2141–2147.
- Masood, B. and Baig, S. (2016). Standardization and deployment scenario of next generation NB-PLC technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1033-1047.
- Mlynek, P.; Misurec, J.; Kolka, Z.; Slacik, J. and Fujdiak, R. (2015). Narrowband power line communication for smart metering and street lighting control. *IFAC-PapersOnLine*, 48(4), 215-219.
- Moaveninejad, S.; Saad, A. and Magarini, M. (2017). Enhancing the performance of WiNPLC smart grid communication with MIMO NB-PLC. In: *Proceeding of IEEE IEEEIC2017*, Milan, Italy.
- Neuberg, A. (2009). Ripplc control in the Czech Republic and demand side management. In: *Proceeding of IEEE CIRED 2009*, Prague, Czech Republic.
- Park, C. U.; Lee, J. J.; Oh, S. K.; Bae, J. M. and Seo, J. K. (2012). Study and field test of power line communication for an electric-vehicle charging system. In: *Proceedings of IEEE ISPLC 2012*, Beijing, China.
- Pisapan, P.; Rakwichian, W.; Wongpanyo, W.; Vichanpol, B. and Chailuecha, C. (2018). The principle of power line communications for home energy management system of smart grid technology in Thailand. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 13(1), 1-12.
- Razazian, K.; Umari, M.; Kamalizad, A.; Loginov, V. and Navid, M. (2010). G3-plc specification for powerline communication: Overview system simulation and field trial results. In: *Proceedings of IEEE ISPLC 2010*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Razazian, K.; Kamalizad, A.; Umari, M.; Qu, Q.; Loginov, V. and Navid, M. (2011).G3-plc field trials in US distribution grid: Initial results and requirements. In: *Proceedings of IEEE ISPLC 2011*, Udine, Italy.
- Routin, J. and Brown C. E. L. (1989), Improvements in and relating to electricity meters, British Patent GB 189 724 833.
- Schwartz, M. (2009). Carrier-wave telephony over power lines: Early history. *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 14–18.
- Sendin, A.; Berganza, I.; Arzuuaga, A.; Pulkkinen, A. and Kim, I. H. (2012). Performance results from 100,000+ PRIME smart meters deployment in Spain. In: *Proceedings of IEEE SmartGridComm 2012*, Tainan, Taiwan.
- Sharma, K. and Saini, L. M. (2017). Power-line communications for smart grid: Progress, challenges, opportunities and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 704–751.
- The U.S. Department of Energy’s Report (2008).The smart grid: An introduction.
- Thordarson, C. H. (1905).Electric central station recoding mechanism for meters, U.S. Patent US 784 712.
- Uribe-Perez, N.; Angulo, I.; Vega, D. D. L.; Arzuaga, T.; Fernandez, I. and Arrinda, A. (2017). Smart Grid Applications for a Practical Implementation of IP over Narrowband Power Line Communications. *Energies*, 10(11), <https://doi.org/10.3390/en10111782>.
- Usman A. and Shami A.H. (2013). Evolution of communication technologies for smart grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 191–199.
- www.alliedmarketresearch.com
- www.g3-plc.com
- www.homeplug.org
- www.hd-plc.org
- www.hdplc.org/modules/products/panasonic.html

- www.marketsandmarkets.com
- www.prime-alliance.org
- www.researchandmarkets.com
- www.zyxel.com/uk/en/products_services/pla_400.shtml
- X-10 protocol for the Marmitek XM10 OEM Controller. Available <https://www.pahedomotica.nl/pdf/xm10.pdf>
- Yan, Y.; Qian, Y.; Sharif, H. and Tipper D. (2013). A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1), 5–20.
- Yigit, M.; Gungor, V. C.; Tuna, G.; Rangoussi, M. and Fadel, E. (2014). Power line communication technologies for smart grid applications: A review of advances and challenges. *Computer Networks*, 70, 366–383.
- Zimmermann, M. and Dostert, K. (2002). A multipath model for the powerline channel. *IEEE Transactions on Communications*, 50(4), 553-559.
- Zimmermann, M. and Dostert, K. (2002). Analysis and modeling of impulsive noise in broadband powerline communications, *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, 44(1), 248-258.



◀ **محسن شیخ حسینی:** استادیار پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان است. ایشان مدرک دکتری تخصصی خود را از دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۳ دریافت نموده است. علایق پژوهشی وی در حوزه سیستم‌های مخابراتی و شبکه‌های هوشمند می‌باشد.