



ASR-E-BARQ
ISSN: 2588-3828

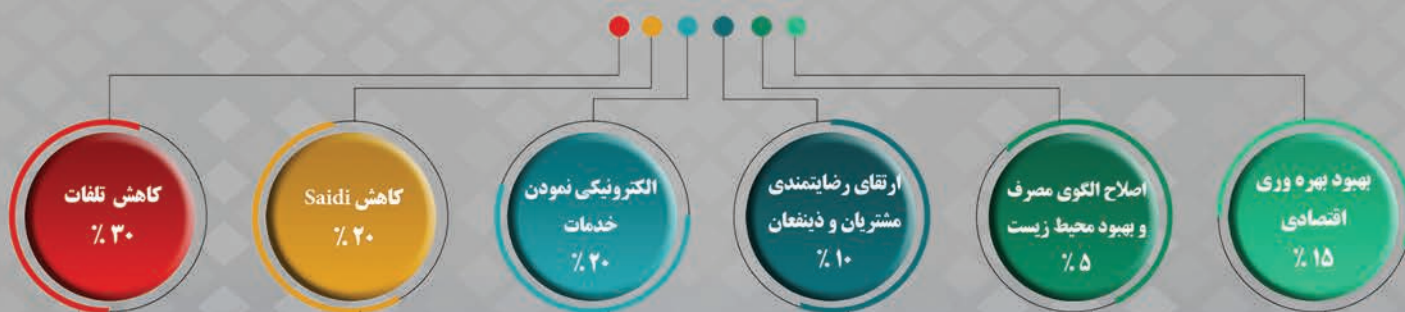
عصر برق ۱۷

فصلنامه علمی انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران، شاخه خراسان سال نهم • شماره ۱۷ • تابستان ۱۴۰۱ قیمت ۳۵,۰۰۰ تومان



نیاز به توجه ویژه به حفاظت شبکه‌ای در سیستم قدرت/ مدیریت تداخل سرویس‌های پهن‌بند ماهواره‌ای متحرک و چالش‌های پیش رو/ ابر منظومه‌های ماهواره‌ای و بومی‌سازی مدل‌های انتشار امواج رادیویی/ تاب‌آوری ریزشبکه‌ها: چالش‌ها، معیارهای ارزیابی و روش‌های بهبود/ مروری بر استانداردهای بین‌المللی در حوزه تولید، انتقال و توزیع در شبکه برق/ بررسی روش‌های استخراج پیک R در سیگنال ECG/ مروری بر روش‌های ریاضی سنتز منطقی مدارهای کوانتومی

۵ درصد حداکثر تلفات انرژی
۵ دقیقه حداکثر میانگین زمان خاموشی به ازای هر مشترک در ماه
۵ درصد حداکثر فعالیت های غیرالکترونیکی مرتبط با مردم



۱۴۰۵ در ۵۵۵



صاحب امتیاز: انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران
مدیر مسئول: دکتر حبیب رجبی مشهدی
سر دبیر: دکتر جواد ساده

شورای سیاست گذاری:

دکتر ایمان احدی اخلاقی، مهندس حسن اروچی،
مهندس محمدعلی چمنیان، دکتر حبیب رجبی مشهدی،
دکتر مصطفی رجبی مشهدی، دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد
شکوه صارمی، دکتر جعفر عبادی، دکتر مهدی علومی بایگی،
دکتر مصطفی عیديانی، مهندس علی کارگزار، دکتر عبداله
کامیاب، دکتر محمد منفرد، دکتر محمد مولوی کاخکی،
مهندس مجید مهدیزاده، مهندس غلامرضا یزدانی شواکند

شورای نویسندگان:

دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی، دکتر سید هاشم اورعی
میرزمانی، دکتر حمید تولیت، دکتر سید حسین حسینی،
دکتر حبیب رجبی مشهدی، دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد
شکوه صارمی، دکتر امیررضا عطاری، دکتر مصطفی عیديانی،
دکتر گئورگ قره‌پتیان، دکتر خلیل مافی‌نژاد،
دکتر محمد منفرد، دکتر محمد مولوی کاخکی

مدیر اجرایی:

مهندس غلامرضا یزدانی شواکند

روابط عمومی:

مهندس فریده سعادت، مهندس سمیرا شمس

مدیر برنامه ریزی:

دکتر مصطفی رجبی مشهدی

صفحه آرایی و امور گرافیک:

امواج برتر (۰۵۱-۳۸۹۴۰۱۲۰)

لیتوگرافی و چاپ: زبرجد (۰۵۱-۳۱۶۶۶)

صحافی: حافظ (۰۵۱-۳۳۹۲۹۱۱۱)

به نام دوست

فهرست مطالب

۲	یادداشت سردبیر؛ نیاز به توجه ویژه به حفاظت شبکه‌ای در سیستم قدرت
۳	آشنایی با فعالیت‌ها و برنامه‌های شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی
۷	مدیریت تداخل سرویس‌های پهن‌بند ماهواره‌ای متحرک و چالش‌های پیش رو
۱۸	ابر منظومه‌های ماهواره‌ای و بومی‌سازی مدل‌های انتشار امواج رادیویی
۲۹	تاب‌آوری ریزشبکه‌ها: چالش‌ها، معیارهای ارزیابی و روش‌های بهبود
۳۵	مروری بر استانداردهای بین‌المللی در حوزه تولید، انتقال و توزیع در شبکه برق ۳۵
۴۴	طراحی و بهینه‌سازی نانو آنتن‌های آرایه‌ای نوری ... (چکیده رساله دکتری)
۴۴	کاهش هزینه دوربری کوانتومی در طراحی مدارهای کوانتومی ... (چکیده رساله دکتری)
۴۵	توسعه تئوری، طراحی و پیاده‌سازی ساختار جدید ... (چکیده رساله دکتری)
۴۵	بهبود هم‌زمان شفافیت و پایداری در تعامل دو طرفه انسان و ... (چکیده رساله دکتری)
۴۶	بررسی روش‌های استخراج پیک R در سیگنال ECG
۵۶	مروری بر روش‌های ریاضی سنتز منطقی مدارهای کوانتومی

● از مطالب و نوشته‌های شما استقبال می‌کنیم:

- «عصر برق» در استفاده، ویرایش و کوتاه کردن مطالب ارسالی آزاد بوده و مطالب ارسالی شما نزد ما به یادگار می‌ماند.
- نظرات و عقاید نویسندگان مطالب ممکن است دیدگاه «عصر برق» نباشد.
- استفاده از مطالب «عصر برق» با ذکر منبع آزاد است.
- ترتیب آثار چاپ شده بر حسب ملاحظات فنی و رعایت تناسب بوده و به معنای درجه‌بندی نیست.
- مقاله‌های ارسالی از طریق پست الكترونيك و يا سايت نشریه حتماً به دو صورت PDF و Word باشد.
- ترجمه‌ها همراه با نسخه اصلی ارسال شود.
- مسئولیت حقوقی آثار ارسالی بر عهده نویسندگان مقاله‌ها می‌باشد.

فرخوان سال



نشانی: مشهد، بلوار جلال آل احمد، جلال آل احمد ۶۴

دانشگاه صنعتی سجاد

تلفن: ۰۵۱-۳۶۰۲۹۰۰۰

وب سایت: www.kiaeee.ir

پست الكترونيك: info@kiaeee.ir



نیاز به توجه ویژه به حفاظت شبکه‌ای در سیستم قدرت

یادداشت سردبیر

عملکرد، حفاظت‌های شبکه‌ای به دو دسته عملکرد بر مبنای پاسخ و عملکرد بر مبنای رخداد تقسیم می‌شوند. در حفاظت شبکه‌ای بر مبنای پاسخ با اندازه‌گیری برخی از پارامترهای شبکه از جمله اندازه ولتاژ، زاویه ولتاژ شینه‌ها، فرکانس، درجه حرارت برخی از تجهیزات خاص و غیره و مقایسه آنها با مقادیر حدی از پیش تعریف شده به محض خارج شدن یک یا تعدادی از این پارامترها از محدوده خود حفاظت شبکه‌ای وارد عمل شده و بر اساس دستورالعمل‌های موجود پاسخ مناسب را اتخاذ و در شبکه اعمال می‌کند. اما حفاظت شبکه بر مبنای رخداد در صورت وقوع رخدادها از پیش مشخص شده مانند خروج یک یا چند نیروگاه خاص یا خروج یک یا چند خط خاص و یا هر اتفاقی که تهدیدی برای امنیت شبکه بوده و انجام اعمال اصلاحی پس از آنها برای پایدار نگه داشتن شبکه در مطالعات و شبیه‌سازی‌های انجام شده ضروری تشخیص داده شود وارد عمل می‌شوند و تغییرات لازم را در سیستم قدرت ایجاد می‌کنند. حفاظت شبکه‌ای بر مبنای پاسخ دارای سرعت کمتری نسبت به حفاظت شبکه‌ای بر مبنای رخداد است، زیرا باید منتظر پاسخ پارامترهای سیستم به حادثه ایجاد شده بماند. در مقابل حفاظت شبکه‌ای بر مبنای رخداد علی‌رغم داشتن پاسخ سریع‌تر، تنها برای تعداد محدودی اتفاق خاص تعریف شده‌اند و ممکن است در مقابل حوادث در نظر گرفته نشده کارایی خود را از دست دهند.

شبکه‌ی برق کشور اکنون در شرایط ناترازی تولید و مصرف انرژی الکتریکی قرار دارد و با بحران تامین انرژی الکتریکی در هنگام اوج مصرف روبه‌رو است. ناترازی تولید و مصرف در صنعت برق کشور به گفته‌ی کارشناسان و دست‌اندرکاران آن حاصل عدم توسعه‌ی نیروگاه‌ها و شبکه‌های برق متناسب با نیاز مصرف شده است. از سوی دیگر سرمایه‌گذاری‌های کلان در بخش تولید و انتقال با توجه به منحنی بار کشور که اوج مصرف تنها ساعات محدودی از سال را شامل می‌شود، از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست و همین موضوع سبب گرایش برنامه‌ریزان به سمت طرح‌های مدیریت مصرف و دیگر طرح‌ها مانند ذخیره‌ی عملیاتی صنایع برای جبران کمبود انرژی شده است. اگر با طرح‌های در دست اجرا و ایجاد نیروگاه‌های جدید که فرایندی زمان‌بر است کمبود انرژی جبران شود، ظرفیت انتقال انرژی در پست‌ها و خطوط انتقال هم باید با احداث پست‌ها و خطوط انتقال جدید متناسب با تولید افزایش یابد و ناگفته پیداست که تحقق این دو حتی با فرض تامین سرمایه‌های کلان، بسیار زمان‌بر است و دست‌کم در کوتاه‌مدت کشور را در تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز خود دچار مشکل می‌نماید.

در این شرایط بکارگیری طرح‌های حفاظت شبکه‌ای برای استفاده بهینه از شبکه‌ی برق کشور و رساندن ظرفیت بارگذاری خطوط انتقال به بیشترین مقدار ممکن با کاهش نگرانی از فروپاشی شبکه، یکی از مهم‌ترین راهکارهای فنی و اقتصادی به‌شمار می‌رود. برنامه‌های از پیش تعیین شده در طرح‌های حفاظت شبکه‌ای که لازمه آن انجام مطالعات دقیق سیستمی است، این امکان را فراهم خواهد کرد تا بتوان با دغدغه‌ای کمتر تاخیرهای ایجاد شده در احداث خطوط، پست‌ها و نیروگاه‌های جدید را دست کم برای مدتی جبران نموده تا فرصتی برای برنامه‌ریزان انرژی کشور فراهم شود و راهکارهای اساسی برطرف نمودن ناترازی انرژی را اجرایی نمایند.

جواد ساده
سردبیر

تأمين پیوسته و با کیفیت انرژی الکتریکی به منظور پاسخگویی به تقاضای در حال رشد بار، همواره یکی از دغدغه‌های مهندسان و مدیران صنعت برق بوده است. رخداد خطا در سیستم‌های قدرت امری اجتناب‌ناپذیر است گرچه می‌توان با تمهیداتی در طراحی و بهره‌برداری نرخ رخداد آن را کم کرد. به هر حال برای جلوگیری از آسیب رسیدن به تجهیزات در زمان رخداد خطا، حفاظت‌های لازم برای تجهیزات در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که در کمترین زمان ممکن حداقل تجهیزات از سیستم جدا شده تا باقیمانده سیستم بتواند بدون مشکل به کار خود ادامه دهد. رشد مصرف انرژی الکتریکی از یک سو، خصوصی‌سازی تولید برق از سوی دیگر و الزام به رعایت مسائل زیست محیطی و کمبود منابع مالی از سویی دیگر باعث شده است تا سیستم‌های قدرت از تولید تا انتقال و توزیع نتوانند متناسب با نیاز مصرف گسترش یابند و همین موضوع سبب می‌شود ظرفیت بارگذاری سیستم‌های قدرت به بیشترین مقدار ممکن خود نزدیک شود و به این ترتیب آسیب‌پذیری شبکه‌ها در برابر وقوع خطا، افزایش یافته است. در چنین شرایطی رخداد خطا علی‌رغم وجود رله‌های حفاظتی تجهیزات سیستم، ممکن است باعث فروپاشی کلی و یا جزئی سیستم شده و خاموشی بزرگی را در بخش‌هایی از سیستم قدرت رقم بزند. در صورت بروز این حالت باز-وصل (Restoration) شبکه مستلزم عملیات دشوار، زمان‌بر و پیچیده‌ای خواهد بود، ضمن اینکه برخی از مصرف‌کنندگان در این مدت با خاموشی مواجه خواهند شد.

حفاظت‌های سنتی که در شمار نسل نخست سیستم‌های حفاظتی قرار می‌گیرند برای تصمیم‌گیری‌های محلی کاربرد دارند اما پایداری و امنیت کل سیستم نیازمند اقدام‌ها و تصمیم‌گیری‌هایی فراتر از اقدام‌های محلی هستند. بنابراین برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت و پیشگیری از آثار و نتایج زیانبار خاموشی‌های گسترده یا فروپاشی شبکه باید سیستم‌های حفاظت خاصی طراحی و پیاده‌سازی شوند. حفاظت شبکه‌ای که در ابتدا به‌عنوان طرح‌های حفاظتی خاص (Special Protection Schemes (SPS)) معرفی گردیده بودند در واقع نسل دوم حفاظت سیستم‌های قدرت می‌باشد و فلسفه استفاده از آن‌ها با حفاظت تجهیزات به‌عنوان نسل اول حفاظت تفاوت اساسی دارد. حفاظت‌های شبکه‌ای طرح‌هایی هستند که با پیش‌بینی شرایط خاصی که در شبکه باعث ایجاد فشارهایی بر سیستم قدرت می‌شود، وارد عمل شده و بر اساس یکسری عملکردهای از پیش تعیین شده این شرایط خاص را کنترل می‌کنند. شرایط مذکور شامل ناپایداری سیستم قدرت، اضافه بار خطوط، فروپاشی ولتاژ و ... بوده و عملکرد از پیش تعیین شده برای طرح‌های حفاظتی ممکن است به صورت خروج و یا ورود یک یا چند خط، خروج و یا ورود واحدها تولیدی، کاهش توان تبدیلی از خطوط انتقال، حذف برخی از بارهای مصرفی از شبکه، جزیره‌ای نمودن شبکه به قسمت‌های از قبل مشخص شده و ... باشد.

استفاده از حفاظت شبکه‌ای اگر چه دلایل مختلفی دارد اما بهبود عملکرد یا بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، امکان بهره‌برداری و استفاده از سیستم‌های قدرت در نزدیکی حدود پایداری آن، افزایش ظرفیت انتقال شبکه هم‌زمان با تامین امنیت شبکه، جبران تاخیرها در احداث خطوط، پست‌ها و نیروگاه‌های جدید، افزایش پایداری و امنیت سیستم در برابر رخدادهای شدیدی که باعث فروپاشی شبکه می‌شوند، از مهم‌ترین دلایل استفاده از طرح‌های حفاظت ویژه هستند.

حفاظت‌های شبکه‌ای از دیدگاه‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. از نظر

آشنایی با فعالیت‌ها و برنامه‌های؛ شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی پیشرو در صنعت برق کشور

در گفت‌وگو با مهندس حسن چاهی / مدیرعامل شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی

شرکت توزیع نیروی برق خراسان شمالی در شمار شرکت‌های توزیع نیروی برق پیشرو در صنعت برق کشور قرار دارد و در سال‌های اخیر توانسته است با کسب رتبه‌های برتر در جشنواره‌های مختلف مانند «جشنواره شهید رجایی» جایگاه ویژه‌ای پیدا کند و در ارتقای شاخص‌های زیربنایی صنعت برق در ردیف استان‌های پیشرو قرار گیرد. کسب عنوان نخستین استان سبز و برخوردار از شبکه فشار ضعیف سازگار با محیط زیست به دلیل تبدیل کابل‌های سیمی به کابل‌های خودنگهدار با جایگزینی ۱۰۰ درصد سیم‌های هوایی فرسوده با کابل خود نگهدار بدون اعمال خاموشی، از دیگر افتخارات این شرکت توزیع نیروی برق است. برای آشنایی با برنامه‌ها و عملکرد شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی گفت‌وگویی با مهندس حسن چاهی مدیرعامل این شرکت انجام شده است که حاصل این گفت‌وگو در ادامه آمده است.



۵۵۵ در سال ۱۴۰۵

بهبود وصول مطالبات شرکت، توجه ویژه به سلامت اداری، مدیریت هوشمند هزینه‌ها، استقرار مهندسی ارزشی، تهیه طرح‌های مطالعاتی شبکه و مطالعات مهندسی و تهیه طرح‌های جامع الکتریکی و پیگیری مصوبات سفر ریاست جمهوری در زمینه مقاوم‌سازی شبکه و تامین برق شهرک‌ها و روستاهای بی‌برق و مسکن ملی بخش دیگری از این برنامه‌ها است.

از آن‌جا که برنامه‌ی راهبردی شرکت با شعار «۵۵۵ در سال ۱۴۰۵» تعیین شده است برنامه‌هایی برای بسیج توانمندی‌ها و منابع شرکت برای تحقق این شعار انجام شده است تا در حوزه‌هایی مانند رضایتمندی مشترکان، شاخص‌های شرکت ارتقا یابد و با سیاست‌های دولت در اعتمادسازی و حضور

انگیزه نیروی انسانی بسیار مهم است به همین دلیل توجه به رضایت شغلی و بهبود کیفیت زندگی کاری کارکنان و افزایش همدلی و هماهنگی کار گروهی برای بهره‌گیری از ظرفیت و توانمندی نیروها در اولویت نخست این شرکت قرار دارد. هم‌زمان با این موضوع برنامه‌ریزی فنی برای کاهش تلفات و کاهش زمان خاموشی‌های خواسته یا ناخواسته با تمرکز بر شفافیت اطلاعات دنبال می‌شود و شعاع تغذیه فیدرهای فشار متوسط با توسعه فیدرها و ایجاد پست‌های فوق توزیع کمتر خواهد شد. گسترش استفاده از ترانس‌های کم‌تلفات و هوشمندسازی شبکه هم از دیگر برنامه‌های فنی و سخت‌افزاری در دست اجرا می‌باشد.

چه برنامه‌هایی در شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی برای حرکت به سمت شرکت توزیع ناب در دستور کار قرار دارد؟

تمرکز بر برنامه‌ها و موضوع‌های راهبردی شرکت برای رسیدن به سازمان ناب با استفاده از منابع انسانی ارزشمند و جوان و بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع و توسعه زیرساخت‌ها و بهبود فرایندهای نظارتی در بخش‌های مهندسی و بهره‌برداری و مشترکان در دستور کار قرار دارد تا در چارچوب سیاست‌ها و برنامه‌های وزارت نیرو به سمت تامین برق پایدار گام‌هایی برداشته شود.

تجهیزات و امکانات پشتیبانی اگر چه اجرای برنامه‌ها را آسان‌تر می‌کند اما



مهندس حسن چاهی
مدیر عامل شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی

در میان مردم برای آگاهی از مشکلات مردم و رفع آن‌ها هماهنگی لازم صورت پذیرد و به یاری خدا با امیدآفرینی و امانت‌داری و صداقت در گفتار بتوانیم به ارایه خدمات مطلوب به مردم بپردازیم.

به برنامه‌ی راهبردی شرکت و شعار «۵۵۵ در سال ۱۴۰۵» اشاره کردید، این شعار به چه معنا است؟

صنعت برق یک صنعت زیرساختی است و برای رسیدن به شاخص‌های مهم آن باید برنامه‌ریزی‌های مهم و دقیقی صورت پذیرد. بر همین اساس در سال ۱۳۹۵ با استفاده از خدمات شرکت‌های مشاور برای افق ۱۴۰۵ چشم‌اندازی تعریف شده است تا با برنامه‌ریزی و استفاده از منابع و امکانات بتوان پایداری و شاخص‌های کیفی مورد انتظار برای شهروندان فراهم شود. عدد ۵۵۵ از سه ۵ تشکیل شده است که هر یک شاخص‌های مورد نظر برای دستیابی به این چشم‌انداز را روشن می‌نماید.

بر اساس این چشم‌انداز باید در سال ۱۴۰۵ شاخص خاموشی که به شاخص ساییدی معروف است برای هر مشترک به ۵ دقیقه در ماه یا ۶۰ دقیقه در سال کاهش یابد، این شاخص در حال حاضر در استان خراسان شمالی به ۷۸ دقیقه رسیده است و میانگین آن در بین شرکت‌های توزیع نیروی برق کشور ۴۵۰ دقیقه است. همچنین در چشم‌انداز ۱۴۰۵ باید میزان هدررفت انرژی الکتریکی در شبکه‌های

توزیع به ۵ درصد کاهش یابد و میزان مراجعه‌ی حضوری مشتریان به شرکت برق هم با الکترونیکی کردن فرایندها به ۵ درصد برسد.

برای کاهش میزان خاموشی‌ها چه اقدام‌های فنی صورت گرفته است؟

نخستین اقدام در این زمینه توسعه‌ی اتوماسیون در ۱۲ هزار کیلومتر شبکه‌ی توزیع بود. این شبکه باید در مرکز دیسپاچینگ با استفاده از تجهیزات سخت‌افزاری مورد پایش قرار گیرد و فرمان‌های قطع و وصل و هرگونه مانوری در شبکه به‌صورت کنترل از راه دور صورت پذیرد و این موضوع نیازمند توسعه‌ی اتوماسیون برای افزایش نقاط کنترل‌پذیر روی هر فیدر است. در حال حاضر از مجموع ۷۰۵ کلید تحت اتوماسیون، ضریب پایش ۹،۴۵، ضریب فرمان ۶،۹ و ضریب قطع‌کننده ۱۰،۱۶ است در حالی که هدف‌گذاری توانیر برای همه‌ی شرکت‌ها تا پایان سال عدد ۱،۵ نقطه کنترل‌پذیر به ازای هر فیدر است.

دومین اقدام برای کاهش خاموشی‌ها استفاده از سامانه‌های خط گرم بود تا با استفاده از آن بتوان بدون اعمال خاموشی، عملیات سرویس و نگهداری و تعمیرات شبکه‌ی توزیع را انجام داد. اکنون با استفاده از هفت سامانه‌ی خط گرم، بدون قطع برق با خاموشی برنامه‌ریزی شده، عملیات روی شبکه‌ی برق‌دار انجام می‌شود. اقدام دیگری که انجام شده است، شناسایی و تعویض مقره‌های معیوب در شبکه‌ی توزیع برق است تا پایداری شبکه‌ی هوایی به بیشترین مقدار خود برسد که در همین راستا تعویض ۲۱ هزار مقره تا پایان سال در دستور کار قرار دارد.

چهارمین اقدام در این زمینه استفاده از پوشش‌های عایقی یا به عبارت دیگر کاورینگ شبکه‌ی فشار متوسط برای افزایش قابلیت ایمنی در برابر برخورد پرندگان، بارش باران و حوادث گذرا بود که در نقاط شناسایی شده، انجام شد.

برای کاهش تلفات شبکه و هدر رفت انرژی به ۵ درصد چه کارهایی صورت گرفته است؟

برخی از اقدام‌های انجام شده روی شبکه چند هدف را به‌طور هم‌زمان برآورده می‌کند. به‌عنوان مثال جایگزینی هادی‌های خودنگهدار به شبکه‌ی سیمی

فرسوده، توسعه‌ی شبکه و ایجاد مدار موازی هم برای کاهش شاخص ساییدی اثرگذار بود و هم مزیت‌های دیگری مانند حفظ مبلمان شهری، پیشگیری از شاخه‌زنی درختان، جلوگیری از سرقت هادی‌های شبکه و مقابله با انشعاب‌های غیرمجاز را به دنبال داشت و افزون بر آن کاهش تلفات شبکه توزیع را در پی داشت. در سال ۱۳۹۵ تلفات شبکه‌ی توزیع ۱۲،۲۸ درصد بود که در پایان سال ۱۴۰۰ به ۷،۸ درصد رسید و تا پایان سال ۱۴۰۱ به ۷،۵ درصد خواهد رسید که با توجه به ساختار و گستردگی شبکه توزیع نیروی برق خراسان شمالی عدد مطلوبی به نظر می‌رسد.

هوشمندسازی شبکه توزیع، نصب کنتور هوشمند برای مشتریان پر مصرف استان با قابلیت پایش ۱۵ دقیقه‌ای انرژی از اقدام‌های دیگری بود که در این زمینه اثرگذار بود و اکنون از مرکز پایش فهم، نزدیک به ۵۶ درصد انرژی الکتریکی مصرفی به‌صورت بر خط قابل پایش است. به‌طور خلاصه تبدیل شبکه سیمی به خودنگهدار، کاهش شعاع تغذیه پست‌ها، توسعه فیدرها، کاهش طول فیدرها، اجرای پروژه‌های نقاط رینگ شبکه، استفاده از ترانسفورماتورهای کم تلفات، پایش وضعیت شبکه در قالب طرح پاکت (پایش آنلاین کیفیت توان) از مهم‌ترین برنامه‌های شرکت توزیع نیروی برق استان است.

دستیابی به خدمات الکترونیکی و غیر حضوری در شرکت توزیع نیروی برق خراسان شمالی در حال حاضر چقدر به چشم‌انداز نزدیک شده است و میزان رضایتمندی مشتریان از خدمات این شرکت چقدر است؟

بر اساس چشم‌انداز در افق ۱۴۰۵ باید شهروندان ۹۵ درصد خدمات را به‌صورت غیرحضوری از طریق برون‌سپاری و سامانه‌های ۱۲۱، ۱۵۲۱ دفاتر پیشخوان دولت، اپلیکیشن برق من و وب‌سایت شرکت دریافت کنند و تنها در ۵ درصد موارد نیاز به مراجعه‌ی حضوری داشته باشند. خوشبختانه در حال حاضر ۸۵ درصد خدمات به صورت غیرحضوری ارایه می‌شود و به امید خدا تا پایان سال ۱۴۰۵ به عدد ۹۵ درصد خواهد رسید. یکی از شاخص‌های مهم برای افزایش رضایتمندی مشتریان، کاهش زمان انتظار



ولتاژ نقاط انتهایی فیدرهای فشار ضعیف در قالب طرح چاوش (چشم‌انداز ولتاژ شبکه) و تهیه طرح‌های اصلاحی شبکه متناسب با وضعیت پایش شده از اقدام‌های انجام شده در این زمینه است.

چه برنامه‌هایی برای آینده در شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی تدوین شده است؟

در حوزه منابع انسانی شرکت برای افزایش کارایی و بهره‌وری و افزایش شاخص‌های رضایت شغلی و فرصت‌های رشد و ارتقای تخصص‌های فردی طرح‌هایی مانند طرح پیشرفته مسیر پیشرفت و افزایش امنیت شغلی، بهبود روابط با کارکنان، مدیریت مشارکتی و افزایش همدلی و انسجام، مشاوره‌های روانشناختی و برقراری تعادل بین زندگی شخصی و کاری در دست اجرا است و تغییر راهبرد در منابع انسانی و اجرای برنامه‌های «کیفیت زندگی کاری» (QWL) اجرا خواهد شد. همچنین توجه ویژه‌ای به ایمنی کارکنان صورت گرفته است که توسعه و استقرار نظام HSE و تهیه طرح جامع زیست محیطی و توجه ویژه به رفع حريم‌ها و افزایش ایمن‌سازی شبکه و استمرار پیشگیری از حوادث مردمی از این جمله هستند.

در حوزه‌ی مسایل فنی هم مسیرهایی مشخص شده است که در برنامه‌های آینده قرار دارد. از جمله حرکت در مسیر هوشمندسازی شبکه با رویکرد رويت‌پذیری بهینه و کنترل‌پذیری دقیق بار و انرژی شبکه است که باعث ارتقاء اثربخشی و استفاده بیشینه تجهیزات و به‌کارگیری خرد نرم‌افزاری در تصمیم‌سازی و بهره‌برداری

از این‌رو برای ارایه خدمات مطلوب و در دسترس روستاییان، ۲۱ مرکز با عنوان «دفتر برق روستایی» در استان با احداث ساختمان‌های جدید و امکانات اداری مناسب راه‌اندازی شده است و دو تا سه نیروی اجرایی با خودروهای مناسب هم در اختیار آن‌ها قرار گرفته است تا درخواست خدمات به سرعت پاسخ داده شود.

در زمینه‌ی بهبود کیفیت توان شبکه‌ی توزیع استان خراسان شمالی و همچنین کیفیت روشنایی گذرگاه‌های شهری چه کارهایی صورت پذیرفته است؟

با به‌روزرسانی ساختار روشنایی گذرگاه‌های شهری در پنج سال گذشته اقدام‌های ارزشمندی صورت گرفته است. نزدیک به ۳۸ هزار دستگاه چراغ ال‌ای‌دی جایگزین چراغ‌های کم‌بازده و پر مصرف شده است که باعث کاهش مصرف انرژی به میزان ۲ درصد و افزایش ۳۰ درصدی کیفیت روشنایی در شهرهای بزرگ استان گردیده است و همین برنامه برای دیگر نقاط استان هم اجرا خواهد شد.

طرح «پاکت» (پایش آنلاین کیفیت توان شبکه) برای پست‌های عمومی تا ۲۰۰ KVA در بیشتر نقاط شهر بجنورد با هدف ۱۰۰۰ دستگاه برنامه‌ریزی شده است و در فاز نخست در نظر است در ۳۰۰۰ فیدر فشار ضعیف عمومی استان به‌صورت بر خط شاخص‌های کیفیت انرژی الکتریکی مورد پایش قرار گیرد. در حال حاضر ۴۷۰ دستگاه ترانسفورماتور با ۲۰۰۰ فیدر فشار ضعیف پایش می‌شوند. نصب کنتورهای هوشمند در انتهای فیدرها برای بررسی وضعیت افت

نصب انشعاب از شبکه بود. در حال حاضر این زمان برای شبکه‌های موجود به کمتر از ۴ روز در مناطق شهری و روستایی رسیده است که با متوسط ۱۵ روز کشوری فاصله‌ی زیادی دارد. همچنین زمان انتظار برای احداث شبکه‌ی شهری به کمتر از ۳۶ روز و در روستاها به کمتر از ۴۵ روز رسیده است.

البته شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان برای اطمینان از رضایتمندی شهروندان از نحوه و کیفیت خدمات ارایه شده و اصلاح و بهبود روش‌های ارایه خدمات به انجام نظرسنجی و دریافت نظرات مردم می‌پردازد. عدد رضایت حاصله از عملکرد شرکت در حوزه رفع خاموشی‌ها و نصب انشعاب: ۸۵٫۷۵ درصد بوده است که نشان‌دهنده‌ی رضایت خوب مردم از عملکرد این شرکت است اگر چه تلاش برای افزایش بیشتر رضایتمندی هم چنان ادامه دارد.

با توجه به شرایط جغرافیایی استان و گستردگی آن و وجود نقاط دورافتاده وضعیت خدمات‌رسانی در این نقاط و روستاها چگونه است؟

برای محقق شدن اهداف متعالی شرکت توزیع نیروی برق استان شمالی ناوگان لجستیک به خوبی تجهیز شده است و ۱۲۰ دستگاه خودروی سبک و سنگین متناسب با شرایط جغرافیایی برای ارایه خدمت به مردم در اختیار گروه‌های عملیات قرار گرفته است.

نزدیک به ۹۶۸ روستای برق‌دار در استان وجود دارد که تنها ۸ مرکز شهرستان برای ارایه خدمات در استان وجود دارد.



بجنورد، شیروان، گرمه و فاروج ضروری ساخته است که البته بودجه‌ی آن از محل اعتبارات سفر هیات محترم دولت پیش‌بینی شده است. همچنین تامین برق ۲۸ شهرک روستایی و ۴۵ آبادی با استفاده از ظرفیت منابع دارایی استان با توجه به سیاست‌های دولت و وزارت نیرو از دیگر ضرورت‌های استان است. البته در بخش تامین انرژی الکتریکی، برنامه‌ی احداث خطوط اصلی و تامین برق سایت‌های مسکن ملی در سطح استان با توجه به برنامه‌ی احداث ۲۹۵۰ واحد مسکونی در طرح ملی مسکن و جهش تولید مسکن از ضرورت‌های مهم استان به‌شمار می‌رود و باید در برنامه‌های کاری با اولویت بالا قرار گیرد.

گسترده‌ی شبکه‌ی برق استان از یک سو و استعداد‌های موجود در استان از سوی دیگر ضرورت جلب مشارکت بخش خصوصی برای سرمایه‌گذاری در احداث نیروگاه‌های تولید پراکنده‌ی مقیاس کوچک و توسعه‌ی ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه نیروگاه‌های فتوولتائیک را نمایان می‌سازد. این توسعه در رفع نقاط ضعف ولتاژ شبکه، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان شبکه بسیار اثرگذار خواهد بود.

به ضرورت‌ها و چالش‌هایی که در حال حاضر در شبکه‌ی برق استان وجود دارد هم به‌صورت خلاصه اشاره کنید.

با توجه به شرایط اقلیمی خاص و جغرافیای طبیعی استان و وجود مناطق دشوار گذر و کوهستانی، شبکه‌ی برق بحران‌خیز به نظر می‌رسد و در معرض سیلاب، زلزله و رانش زمین قرار دارد به همین دلیل بازسازی شبکه‌های فرسوده‌ی استان و اصلاح خطوط برق اصلی روستایی برای جلوگیری از خسارت‌ها و حوادث آتی از ضرورت‌هایی است که باید به آن توجه شود و اعتبارات خاصی برای مقاوم‌سازی و افزایش تاب‌آوری شبکه در سطح استان در نظر گرفته شود.

تامین برق روشنایی گذرگاه‌ها و بلوارهای تازه‌ساز در داخل شهرها به منظور افزایش ایمنی رهگذران و پیشگیری از بروز تصادف از دیگر ضرورت‌های شبکه‌ی برق استان است که نیازمند احداث ۲۰ کیلومتر شبکه‌ی روشنایی گذرگاه‌ها می‌باشد در حالی که توسعه‌ی ظرفیت هوشمندسازی روشنایی گذرگاه‌ها هم نیازمند هزینه‌های بالایی است.

تامین انرژی الکتریکی پایدار برای صنایع استان نیاز به احداث پست فوق توزیع در سطح استان را در شهرک‌های صنعتی

بهینه‌ی شبکه را به‌دنبال خواهد داشت. در این راستا سرفصل هوشمندسازی مدیریت بار و انرژی «توسعه‌ی زیرساخت پایش برخط انرژی» که از اهداف هوشمندسازی بار و انرژی است در برنامه‌های شرکت لحاظ شده است.

در بحث اصلاح الگوی مصرف که مورد تاکید مقام معظم رهبری است هم برنامه‌های اصلاح الگوی مصرف برق مشترکان با هدف کاهش شاخص شدت انرژی از طریق برنامه‌های ترویجی و اقدام‌های فنی در دستور کار قرار دارد.

یکی از استعداد‌های استان خراسان شمالی با توجه به دمای مناسب و غبارآلودگی کم و زمان تابش مناسب، توسعه‌ی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه نیروگاه‌های خورشیدی در برنامه‌های آینده تعریف شده است و همگام با سیاست‌های وزارت نیرو و دولت در این راستا برنامه‌ریزی خواهد شد. توجه به پروژه‌های پژوهشی کاربردی برای رفع مشکلات شبکه و استفاده از ظرفیت استادان دانشگاه و پارک‌های علم و فناوری و ارتباط موثرتر با صنایع و اقدام در راستای بهبود تولید محتوای داخلی (دانش فنی، کیفیت تولید و خدمات)، که می‌توان از آن به عنوان «توسعه‌ی موثر دانش‌بنیان صنعت و دانشگاه» نام برد، از برنامه‌های آتی این شرکت است.



مقاله علمی - ترویجی

مدیریت تداخل سرویس‌های پهن‌بند ماهواره‌ای متحرک و چالش‌های پیش رو

■ رقیه دوست^{*}، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

■ رقیه کریم‌زاده بانی، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

■ پدرام حاجی‌پور، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

■ علیرضا فاسونیه چی، پژوهشگر پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

^{*} نویسنده مسئول

چکیده

تقاضای روز افزون استفاده از سرویس‌های پهن‌بند برای ادوات متحرک، موجب شکل‌گیری فناوری ESIM (Earth Station In Motion) گردید. این سرویس‌ها در خودروها، قطارها و ناوهای هوایی و دریایی قابل استفاده است. ITU (International Telecommunication Union) و بسیاری از رگولاتورهای مخابرات منطقه‌ای و ملی در حال توسعه استانداردها و مقررات هستند به‌طوری که با رعایت آنها توسط ESIM، تداخل‌های یاد شده تا حد امکان تعدیل می‌یابد. در WRC 2015 باند اختصاص داده شده به ESIM 19.7-20.2 GHz و 29.5-30 GHz تعیین شد. علاوه بر آن در WRC 2019 باند اختصاص داده شده به ESIM به 17.7-19.7 GHz و 27.5-29.5 GHz توسعه یافت و بررسی رگولاتوری و ملاحظات تداخل آن توسط کشورهای مختلف مطرح و ثبت گردید. در WRC2023 این موارد مطروحه، تکمیل و نیز استفاده از ESIM در منظومه‌های ماهواره‌ای غیر زمین آهنگ (Non-GEO) FSS در باند فرکانسی 17.7-19.7 GHz و 27.5-29.5 GHz بررسی خواهد شد. این تصمیمات در حالی گرفته شده است که سرویس‌های متعددی از قبل در حال استفاده از بخشی یا تمام باند فرکانسی اختصاص یافته به ESIM (Non-GEO یا GEO) بوده‌اند. ارایه‌دهندگان سرویس، اپراتورها و رگولاتورها ملاحظات مربوط به تداخل و فرآیندهای مجوزدهی را تا حد زیادی در این سال‌ها پیش برده‌اند و کماکان این بررسی‌ها به روش‌های مختلف ادامه دارد. در این پژوهش به بیان مقدمه و معرفی اجمالی از ESIM پرداخته شده است و پس از ارائه مختصر در خصوص چگونگی بررسی‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته به منظور استخراج الزامات کنترل تداخل ESIM در مستندات و نشست‌های ITU، سناریوهای اولیه برای تحلیل‌های مورد نیاز تداخل، بیان شده است. در ادامه، فناوری مرکز کنترل و مانیتورینگ شبکه (NCMC) به همراه ایستگاه‌های پایش و مانیتور طیف رادیوفضایی و سامانه Geolotion و چالش‌های پیاده‌سازی آن‌ها به‌طور مختصر شرح داده شده است. در نهایت، با توجه به ضرورت ارائه سرویس ESIM در آینده نزدیک و همچنین روند توسعه فناوری‌های مرتبط، چالش‌های مطرح در این حوزه جمع‌بندی شد.

کلمات کلیدی: ایستگاه‌های زمینی در حال حرکت (ESIM)، سرویس‌های پهن‌بند ثابت ماهواره‌ای، تداخل فرکانسی، ماهواره‌های زمین آهنگ و غیرزمین آهنگ، سرویس ثابت زمینی، سرویس سیار زمینی.

Managing the Interference of Moving Satellite Broadband Services and the Challenges Ahead

■ Roghaye Doost*, Faculty member of Satellite Communication Group, Department of Communication Technology, IranTelecom Research Center, Tehran, Iran. doost@itrc.ac.ir

■ Roghieh Karimzadeh Baei, Faculty member of Satellite Communication Group, Department of Communication Technology, Iran Telecom Research Center, Tehran, Iran. rkbaee@itrc.ac.ir

■ Pedram Hajipour, Faculty member of Satellite Communication Group, Department of Communication Technology, Iran Telecom Research Center, Tehran, Iran. Hajipour@itrc.ac.ir

■ Ali Reza Fasunieh Chi, Researcher of Satellite Communication Group, Department of Communication Technology, Iran Telecom Research Center, Tehran, Iran. fasooniehchi@itrc.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

The growing demand for broadband services for moving devices led to the development of ESIM (Earth Station In Motion) technology. These services can be used in cars, trains, air and sea ships. The International Telecommunication Union (ITU) and many regional and national telecommunications regulators are developing standards and regulations that, when complied with by ESIM, minimize such interference. At WRC2015, the frequency band of 20.2-19.7 GHz and 29.5-30 GHz assigned to ESIM. In addition, at WRC2019, the frequency band was extended to 17.7-19.7 GHz and 27.5-29.5 GHz and the regulatory and interference considerations were raised by various countries. In WRC2023, these issues will be addressed, as well as the use of ESIM in FSS Non-GEO satellite systems in the 17.7-19.7 GHz and 27.5-29.5 GHz. Several services were already using part or all of the frequency band allocated to ESIM (GEO or Non-GEO). Service providers, operators, and regulators have largely taken into account interference and licensing processes over the years. In this research, an brief introduction of ESIM has been given. After a brief presentation on how the studies and analyzes have been done in order to extract the requirements for controlling ESIM interference in ITU documents and meetings, the initial scenarios for analysis the interference are stated. In the following, the technology of Network Control and Monitoring Center (NCMC) along with monitoring stations, monitors of radio-space spectrum, Geolocation system and the challenges of their implementation are briefly described. Finally, due to the need to provide ESIM service in the near future as well as the development of related technologies, the challenges in this area were summarized.

Keywords: Earth Station In Motion (ESIM), fixed satellite broadband services, frequency interference, GEO and Non- GEO satellites, fixed service, mobile service.

۱- مقدمه

گیرنده‌های فضایی غیر زمین آهنگ FSS و غیره. شرایط وجود یا عدم وجود تداخل GEO ESIM با هریک از سرویس‌های مذکور در برخی مستندات ITU مطرح شده و در قطعنامه ۱۶۹ برخی الزامات فنی به‌عنوان شروط لازم در پیشگیری و یا کاهش تداخل این فناوری بر روی برخی سرویس‌های محتمل تداخل، بیان شده است. در این میان سرویس‌های ثابت و سیار زمینی آسیب‌پذیرترین سرویس‌های در معرض تداخل از جانب ESIM می‌باشند. به منظور استخراج الزامات فنی کنترل (حذف یا کاهش) تداخل وارد شده از GEO ESIM بر روی سرویس‌های ثابت زمینی و نیز سرویس‌های سیار زمینی، سناریوها و تحلیل‌های مختلفی توسط برخی کشورها، شبیه‌سازی و ارزیابی شده است. چنین شبیه‌سازی‌هایی برای استخراج الزامات کنترل تداخل Non-GEO ESIM و نیز ارایه در WRC2023 موردنیاز است. با دانش پیاده‌سازی سناریوهای شبیه‌سازی مربوط به GEO ESIM، تداخل ناشی از این فناوری با توجه به ویژگی‌های سرویس‌های موجود و نیز پارامترهای شبکه‌های ماهواره‌ای GEO مورد استفاده در کشور بررسی می‌شوند و الزامات پیشگیرانه استخراج و یا صحت‌سنجی خواهند شد. مهم‌تر اینکه با الگوبرداری از سناریوهای مربوط به GEO ESIM و جایگزینی پارامترهای مربوط به شبکه‌های ماهواره‌ای GEO با پارامترهای شبکه ماهواره‌ای Non-GEO در این شبیه‌سازی‌ها، الزامات فنی کنترل تداخل فناوری Non-GEO ESIM در کشور

یکی از فناوری‌های پیشرفته و رو به توسعه در صنعت ماهواره‌ای دنیا ایستگاه‌های زمینی در حال حرکت موسوم به ESIM (Earth Station in Motion) می‌باشد، که به ارایه سرویس‌های پهن‌بند ثابت ماهواره‌ای FSS (Fixed Satellite Service) می‌پردازد. این فناوری در خودروها، قطارها، ناوگان هوایی و شناورهای دریایی استفاده می‌شود. با توسعه این سرویس‌ها برای نخستین بار در سال ۲۰۱۵، 500MHz بالایی باند Ka (29.5-30 GHz فراسو و 19.7-20.2 GHz فرسو) در ماهواره‌های GEO FSS، به ESIM اختصاص داده شد. در WRC2019 باند اختصاص داده شده به ESIM به باندهای 17.7-19.7 GHz و 27.5-29.5 GHz نیز توسعه یافت و بررسی رگولاتوری و ملاحظات فنی تداخل توسط کشورهای مختلف در آن مطرح گردید. در WRC2023 این موارد مطروحه، تکمیل و نیز استفاده از ESIM در منظومه‌های ماهواره‌ای غیر زمین آهنگ (Non-GEO) FSS (GEO) در باند فرکانسی 17.7-19.7 GHz و 27.5-29.5 GHz بررسی خواهد شد. این تصمیمات در حالی گرفته شده است که سرویس‌های متعددی از قبل در حال استفاده از بخشی یا تمام باند فرکانسی اختصاص یافته به ESIM (GEO یا Non-GEO) بوده‌اند. از جمله این سرویس‌ها عبارتند از: سرویس ثابت زمینی (Fixed Service)، سرویس سیار زمینی (Mobile Service)، لینک‌های تغذیه سرویس سیار ماهواره‌ای غیر زمین آهنگ،

استخراج خواهد شد. با توجه به مستندات ارایه شده توسط کشورهای پیشرو در این حوزه، در پیش‌نهی‌های برگزار شده WRC2023 تاکنون، صحت این مهم تأیید شده است. برخی کشورهای پیشرو در این حوزه از نرم‌افزارهای خاص طراحی شده به این منظور استفاده می‌کنند. با تغییرات و اصلاحاتی که در مستندات فنی ITU مورد استفاده در این نرم‌افزارها رخ می‌دهد، این نرم‌افزارها نیاز به بروزرسانی خواهند داشت. در حال حاضر چنین نرم‌افزارهایی با قابلیت بروزرسانی در اختیار محققین کشور نیست. پس مساله نخست در کنترل و مدیریت تداخل ESIM در کشور تحلیل، شبیه‌سازی و استخراج الزامات کنترل تداخل از طریق طراحی نرم‌افزار بومی یا استفاده از نرم‌افزارهای پایه می‌باشد. البته تعدد و گستردگی مستندات فنی ITU که باید به این منظور شبیه‌سازی شوند و نیز در نظر گرفتن مشخصات فنی و فیزیکی تمام سرویس‌های هم‌فرکانس با ESIM در کشور، از چالش‌های عمده در تحلیل تداخل ESIM در کشور می‌باشد. مطالعات اولیه لازم به این منظور مورد پژوهش قرار گرفته است. ادامه مسیر و پیاده‌سازی تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های سناریوهای یاد شده با حمایت‌های سازمان‌های متولی در کشور، قابل تحقق می‌باشد. با برداشتن این گام، الزامات کنترل تداخل Non-GEO ESIM استخراج و از سوی کشورمان در WRC2023 مطرح خواهد شد.

به منظور کنترل الزامات و پارامترهای استخراج و مصوب شده در راستای پیشگیری از تداخلات مضر، استقرار مرکز مانیتورینگ و کنترل تداخل یا NCMC (Network Control and Monitoring Center) در شبکه ESIM ضروری می‌باشد. پیاده‌سازی NCMC برای شبکه ESIM و مرتفع نمودن چالش‌های مرتبط با آن، با مطالعه و بررسی سابقه مربوط در شبکه‌های VSAT قابل انجام است. NCMC یک واحد کارکردی (دارای پشتیبان) در Hub شبکه ماهواره‌ای است و بی‌شک در هر کشور مجوزدهنده به ESIM که بتواند امکانات دسترسی به شبکه را در قالب hub شبکه یا امکانات معادل آن در اختیار داشته باشد، کارکرد فرمان قطع و ارسال ESIM‌ها، برای ESIM‌های تحت مجوز آن کشور قابل پیاده‌سازی است. از این رو مساله دوم به منظور کنترل و مدیریت تداخل ESIM که نیاز به بررسی و پیاده‌سازی در کشور دارد، مرکز مانیتورینگ و کنترل شبکه ESIM یا همان NCMC می‌باشد.

اگر چه برای استفاده از ESIM هم مانند دیگر سرویس‌های ماهواره‌ای الزاماتی به منظور استفاده از باند FSS در نظر گرفته شده است و این ترمینال‌ها به طور معمول با دریافت مجوز شروع به فعالیت خواهند کرد، اما گذشته از رعایت الزامات کنترل تداخل، احتمال تداخل (عمدی یا غیرعمدی) به دلایل مختلف وجود خواهد داشت. این تداخلات می‌تواند به دلیل استفاده از ترمینال‌های بدون مجوز توسط برخی کاربران، خرابی تجهیزات، خطا در نشانه‌روی، اهداف سیاسی و غیره روی دهد. از این رو پیاده‌سازی و استقرار ایستگاه‌های پایش و مانیتور طیف فرکانسی و سنجش تداخل‌های موجود امری ضروری است. البته تداخل ایجاد شده توسط ESIM بر روی ایستگاه‌های زمینی توسط ایستگاه‌های معمول و ثابت زمینی پایش طیف رصد می‌شود، ولی تداخل وارد شده توسط ESIM بر روی ماهواره‌ها توسط ایستگاه‌های پایش و مانیتورینگ رادیوفضایی انجام می‌شود که این مورد نیاز به تحقیق، بررسی و پیاده‌سازی در کشور دارد. گام مؤثرتر و پیشرفته‌تر بعد از رصد و آشکارسازی تداخل فرکانسی توسط این ایستگاه‌ها، یافتن

منبع تداخل می‌باشد که این هدف توسط سامانه Geolocation محقق می‌شود. لازم به ذکر است، از آنجا که Geolocation قابلیت شناسایی منابع تداخل کننده هم ثابت و هم متحرک را داراست، از این‌رو پیاده‌سازی و استفاده از آن در تداخل‌سنجی و مدیریت تداخل فناوری ESIM مفید و مؤثر می‌باشد. از این رو مساله سوم و پیش رو در مدیریت تداخل ESIM راه‌اندازی ایستگاه‌های پایش و مانیتور طیف رادیوفضایی و سامانه Geolocation در کشور می‌باشد. در این مقاله پس از معرفی انواع ESIM و چگونگی توسعه روزافزون این فناوری، به بیان سرویس‌های محتمل تداخل با آن پرداخته خواهد شد. سپس مختصری از وضعیت به کارگیری این فناوری در کشورهای مختلف و تبعات عدم تحلیل و استخراج الزامات کنترل تداخل ESIM در کشور بیان خواهد شد. در ادامه، مختصری از چگونگی بررسی‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته به منظور استخراج الزامات کنترل تداخل ESIM در مستندات و نشست‌های برگزار شده مرتبط ITU، بیان شده است. همچنین در ادامه سناریوهای پیشنهادی اولیه برای تحلیل‌های مورد نیاز آتی ارایه گردید. در بخش بعدی، فناوری NCMC معرفی و ایستگاه‌های پایش و مانیتور طیف رادیوفضایی و سامانه Geolocation و چالش‌های پیاده‌سازی آن‌ها به‌طور مختصر شرح داده خواهند شد. جمع‌بندی مقاله در انتها ارایه می‌گردد.

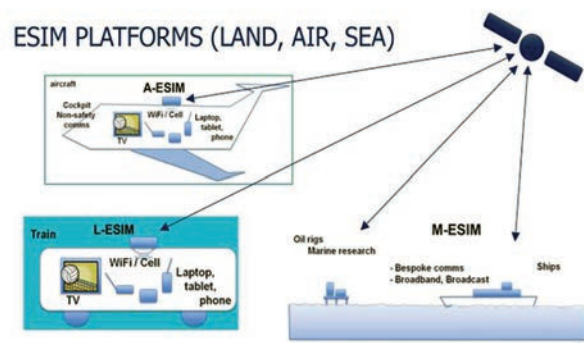
۲- کاربردهای سرویس ESIM

در سال‌های اخیر تقاضای استفاده از ارتباطات پهن‌بند ماهواره‌ای در ادوات متحرک هواپیما، کشتی، قطار و اتومبیل رو به افزایش است. همین امر موجب شکل‌گیری ESIM گردید. ترمینال‌های ESIM، شامل تجهیزات ارتباط با ماهواره به همراه آنتن‌های کوچک با سیستم‌های رهگیری و روش‌های پیشرفته کدینگ و مدولاسیون می‌باشند.

سرویس‌های ESIM، کارایی بسیار بالا و بی‌سابقه‌ای در کاربردهای دریانوردی ارایه می‌دهند. بر اساس کاربردهای رو به افزایش اینترنتی، تقاضا برای حفظ اتصال به شبکه در دریا رو به افزایش است. دسترسی به اینترنت پهن‌بند، VOIP، ایمیل و دسترسی پیشرفته به شبکه‌های مشترک، برای دریانوردان و سرنشینان کشتی‌ها حائز اهمیت می‌باشد. از جمله کاربردهای ESIM دریایی (M-ESIM) می‌توان به این موارد اشاره کرد: کشتی‌های تجاری، کشتی‌های ماهیگیری، دکل‌های شناور نفت و گاز و کشتی‌های تفریحی و خصوصی.

از طرفی تعداد مسافران هوایی روز به‌روز در حال افزایش است. همین امر باعث افزایش تقاضای ظرفیت مورد نیاز در مسافرت هوایی خواهد بود. در پی آن کاربردهای پایه مثل ایمیل و موتورهای جستجوگر وب‌ها جایشان را به کاربردها و سرویس‌های پیچیده‌تر مثل تبادلات ویدیو، voice over IP و video conference می‌دهند. همچنین سرویس‌های همه‌پختی یک عامل مهم افزایش این تقاضا هستند. بیشتر شرکت‌های هواپیمایی بر آنند که خدمات هواپیمایی که قبل از بلند شدن برای سرنشینان فراهم است را در حین پرواز نیز برایشان میسر کنند. در حال حاضر خدمات اتصال به ماهواره می‌تواند شامل موارد زیر باشند: ارایه سرویس تلویزیون تعاملی، ارایه پلیکیشن‌های مختلف مانند انواع بازی‌ها و موسیقی‌ها، ارایه کانال‌های زنده تلویزیونی و رسانه‌های اجتماعی [۱]. تمام این عوامل رشد روزافزون ESIM هوایی (A-ESIM) را در پی خواهند داشت.

ESIM زمینی (L-ESIM) در ماشین‌ها و قطارها به کار می‌رود و بیش‌ترین کاربرد آن مربوط به قطار می‌باشد. اطلاعات باند پهن در قطار دو حوزه کلی را می‌تواند پوشش دهد، که عبارتند از: عملیات مربوط به خطوط ریلی (مانند ایمنی و نظارت) و سرویس‌های مسافران. همانند بخش هوایی، بیشتر این رشد در بخش سرویس‌دهی به مسافران ریلی به چشم می‌خورد. گرچه سرویس‌های سلولی نیز در این سرویس‌دهی میسر هستند، ولی در مواردی مانند ریل‌های وسیع به طور کامل پاسخگو نمی‌باشند. با وجود الزامات ترافیک بالا و گپ‌های معمولی که بین ناحیه پوشش سلول‌ها موجود است، اتصال مستقیم به سیستم‌های سلولی زمینی انتظارات را در طول سفر برای مسافر را برآورده نمی‌کند. از این رو روش مبتنی بر ماهواره می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل فراگیر و بهینه در این حوزه ارایه شود. بستر ESIM در زمین، آسمان و دریا در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل ۱: بستر ESIM در زمین، آسمان و دریا [۱]

ESIM‌ها به‌عنوان VSAT‌های متحرک مشخصه‌های فنی و عملکردی خاصی را ایجاب می‌کنند که VSAT‌های ثابت ملزم به رعایت آنها نیستند. یک نمونه مهم آن اندازه کوچک آنتن است که برای خودروها، هواپیماها و ناوهای دریایی متحرک لازم است. مشخصه دیگر نیاز به سیستم رهگیری است که می‌بایست نشانه‌گیری درست به ماهواره هدف را در تمام مدت زمان لازم حفظ کند. البته همیشه احتمال خطا برای کسر کوچکی از زمان در این رهگیری وجود دارد.

یک جنبه مهم در به کارگیری صحیح ESIM، داشتن استانداردها و مقررات مناسب است. ارایه‌دهندگان سرویس، اپراتورها و رگولاتورها در حال آماده‌سازی موارد یاد شده از جمله ملاحظات مربوط به تداخل و فرآیندهای صدور مجوز می‌باشند. ITU و بسیاری از رگولاتورهای مخابراتی منطقه‌ای و ملی در حال توسعه استانداردها و مقررات هستند به طوری که با رعایت آنها توسط ESIM، تداخل‌های یاد شده تا حد امکان تعدیل و تخفیف می‌یابد.

۳- طرح و بررسی ESIM در نشست‌های بین‌المللی WRC2019 و WRC2023

با توجه به نیاز توسعه ارتباطات سیار ماهواره‌ای پهن باند و همچنین ضرورت استفاده از ایستگاه‌های متحرک به منظور ایجاد ارتباط با سیستم ماهواره‌ای GSO که ارائه دهنده سرویس‌های ثابت ماهواره‌ای خواهد بود، در کنفرانس WRC2019 که در شرم‌الشیخ مصر برگزار گردید، به ارائه قوانین و مقررات مناسب و همچنین شیوه مدیریت تداخل به منظور به کارگیری ایستگاه ESIM در دو باند فرکانسی 17.7GHz-19.7GHz (فضا به زمین) و

باند فرکانسی 27.5GHz-29.5GHz (زمین به فضا) پرداخته شد. باید توجه داشت که دو باند فرکانسی مورد نظر پیش از آن به بخش‌های زمینی و فضایی به منظور ارائه سرویس‌های متنوع و همچنین توسعه بسترهای ارتباطی واگذار شده بود که می‌بایست در همین راستا شیوه‌های مناسب حفاظت از این نوع سرویس‌ها با حضور ایستگاه ESIM اتخاذ گردد [۲-۳].

منظومه‌های ماهواره‌ای Non-GSO در باندهای فرکانس 17.7-19.7 GHz (فضا به زمین) و 27.5-29.5GHz (زمین به فضا) امکان اتصال به اینترنت و سایر سیستم‌های Non-GEO را فراهم می‌کنند و سرویس‌های باند پهن را ارائه می‌دهند. یکی از زمینه‌هایی که در به کارگیری منظومه‌های Non-GEO، بسیار جای توسعه و پیشرفت دارد، ESIM می‌باشد. این بخش تقاضا توسط ماهواره‌های GSO به خوبی سرویس داده می‌شود، اما در کاربردهایی که تأخیر کمتر مورد نیاز است، اتصال Non-GEO پیشنهاد می‌شود. سیستم‌های Non-GEO نسل جدید و بعدی برای ارائه ترمینال‌های کوچک‌تر ESIM و سیستم‌های Non-GEO را ارائه خواهند داد و پتانسیل گسترش اتصال به بخش‌های جدید بازار را به سرعت ارائه می‌دهند. به منظور تسهیل در استقرار بیشتر و ارائه گسترده باند پهن به سرویس‌های ESIM در باندهای فرکانسی فوق، باید در مورد چگونگی تدوین اقدامات فنی و نظارتی طیف، اقدامات لازم انجام شود و هماهنگی‌های بین‌المللی و تبیین چارچوب‌های استفاده و تسهیل استقرار این سرویس مهم و ارزشمند با استفاده از ماهواره‌های Non-GEO صورت گیرد. مطابق مصوبات WRC2019 مقرر گردید که مطالعات اشتراک بین انواع ارتباطات ESIM در سیستم‌های Non-GEO FSS، با سایر سرویس‌های اصلی در باندهای فرکانسی یاد شده بالا، به منظور توسعه الزامات فنی و نظارتی مناسب صورت گیرد. نتایج این مطالعات پس از بررسی در پیش‌نشست‌های ITU در WRC2023 مورد ارزیابی و تصویب قرار خواهند گرفت [۲].

۴- سرویس‌های محتمل تداخل از سمت ESIM

در باند فرکانسی مربوط به ESIM، سرویس‌های زیر از پیش در حال استفاده از بخشی یا تمام این باند بوده‌اند [۲].

- سرویس ثابت زمینی (FS یا همان Fixed Service)
- سرویس متحرک زمینی (MS یا همان Mobile Service)
- سرویس ماهواره‌ای به منظور اکتشافات زمینی (EES)
- سرویس ماهواره‌ای به منظور هواشناسی
- سرویس ثابت ماهواره‌ای شامل لینک‌های تغذیه سرویس متحرک ماهواره‌ای غیر زمین آهنگ و لینک‌های تغذیه سرویس چند پخش ماهواره‌ای
- گیرنده‌های فضایی Non-GEO FSS

وجود یا عدم وجود تداخل با هریک از سرویس‌های بالا در [۲] مطرح شده است و در قطعنامه ۱۶۹ [۴-۵] به بیان الزامات فنی به منظور پیشگیری و یا کاهش تداخل در لینک‌های تغذیه سرویس متحرک ماهواره‌ای غیر زمین آهنگ، گیرنده‌های فضایی Non-GEO، سرویس‌های ثابت زمینی و نیز سرویس‌های سیار زمینی پرداخته است.

۵- تحلیل تداخل ESIM به منظور استخراج و اعلام الزامات کنترل تداخل

در این میان، به منظور استخراج الزامات فنی کنترل تداخل وارد

تداخلات احتمالی Non-GEO ESIM با ایستگاه‌های ثابت و سیار پرداخته خواهد شد.

۷- سناریوهای پیشنهادی به منظور بررسی تداخلات احتمالی ایجاد شده توسط Non-GEO ESIM در ارتباط با ایستگاه‌های ثابت و سیار

با بررسی و استفاده از انواع تحلیل‌ها و سناریوهای مختلف تداخل GEO ESIM که توسط کشورهای پیشرو در این حوزه صورت گرفت و منجر به تصمیم‌گیری در مورد الزامات کنترل تداخل آن در WRC2019 گردید، می‌توان سناریوهای مورد نیاز را برای بررسی تداخل Non-GEO ESIM بر روی ایستگاه‌های ثابت و سیار زمینی طرح و پیشنهاد نمود [۳۰-۳۱]. با انجام این تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها در کشور، الزامات کنترل تداخل Non-GEO ESIM با ملاحظات فنی مربوط در کشور، استخراج خواهند شد. سناریوهای پیشنهادی و تفاوت‌ها و شباهت‌های سناریوهای مربوط به GEO ESIM و Non-GEO ESIM به‌طور کامل در [۳۲] شرح داده شده‌اند. در اینجا نمونه‌هایی از این سناریوها به‌طور مختصر بیان می‌شوند.

سناریوی پیشنهادی نخست: در این سناریو تداخلات احتمالی Non-GEO A-ESIM بر روی ایستگاه‌های ثابت و همچنین تداخلات احتمالی ایستگاه‌های ثابت بر روی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین، برای بررسی مسیرهای واقعی پرواز، داده‌های ترافیکی A-ESIM در یک بازه‌ی زمانی مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت الزامات کنترل تداخل مطابق با مستندات مرجع ITU تحلیل می‌شوند.

سناریوی پیشنهادی دوم: در این سناریو تداخلات احتمالی Non-GEO L-ESIM بر روی ایستگاه‌های ثابت بر حسب میزان دست‌کم فاصله جدایش مورد نیاز بین L-ESIM و ایستگاه‌های ثابت بر حسب زاویه خارج از محور ایستگاه ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این نوع مطالعه پارامترهای فنی برای ایستگاه ثابت مانند توان ارسالی، پهنای باند، میزان بهره آنتن، ارتفاع آنتن و الگوی آنتن پیش‌بینی می‌شود. البته در این مطالعه، می‌تواند یک سناریوی واقعی بر حسب موقعیت مکانی ایستگاه‌های L-ESIM و ایستگاه‌های ثابت نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

سناریوی پیشنهادی سوم: در این سناریو اثرات تداخل Non-GEO M-ESIM بر روی ایستگاه ثابت در فواصل مختلف از سطح خشکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، کم‌ترین حاشیه فاصله امن از خط ساحل به ازای مقادیر مختلف بهره، زاویه تمایز آنتن و میزان افت انتشار بر حسب نرخ عبور و مرور عبور روزانه کشتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

سناریوی پیشنهادی چهارم: در این سناریو تداخلات احتمالی Non-GEO A-ESIM بر روی ایستگاه‌های سیار و پایه بر حسب زوایای مختلف (زاویه جهت‌گیری آنتن ایستگاه سیار و A-ESIM نسبت به راستای آزیموت) بر حسب موقعیت قرارگیری ایستگاه A-ESIM (در آسمان و یا در حالت اوج یا فرود)، موقعیت قرارگیری ایستگاه سیار، ارتفاع ایستگاه A-ESIM مورد ارزیابی قرار گرفته و نهایتاً ارزیابی‌های مورد نیاز تداخل مطابق با مستندات مرجع ITU صورت می‌گیرد و الزامات کنترل تداخل مربوط، تحلیل و استخراج خواهند شد.

سناریوی پیشنهادی پنجم: در این سناریو تداخلات احتمالی Non-GEO L-ESIM بر روی ایستگاه‌های سیار و پایه بر حسب

شده از GEO ESIM بر روی FS و MS مطالعات و سناریوهای شبیه‌سازی مختلفی توسط کشورهای مختلف دنیا صورت گرفته است [۶-۲۶]. این شبیه‌سازی‌ها برای استخراج الزامات کنترل تداخل Non-GEO ESIM و آرایه در WRC2023 نیز مورد نیاز است. پس با علم و پیاده‌سازی سناریوهای شبیه‌سازی مربوط به GEO ESIM می‌توان تداخل حاصل از این فناوری را در کشور بررسی و به استخراج و صحت‌سنجی الزامات پیشگیرانه آن پرداخت. مهم‌تر اینکه با جایگزینی روال شبیه‌سازی مناسب و به‌کارگیری پارامترهای مربوط به شبکه ماهواره‌ای Non-GEO به جای پارامترهای شبکه ماهواره‌ای GEO در این شبیه‌سازی‌ها، به استخراج الزامات فنی کنترل تداخل فناوری Non-GEO ESIM در کشور و اعلام آن در پیش‌نشست‌های مربوط به WRC2023 پرداخت.

پس از کسب دانش سناریوهای مورد تحلیل در تداخل، ابزار شبیه‌سازی این سناریوها مطرح است. برخی کشورهای پیشرو در این حوزه از نرم‌افزارهای طراحی شده به این منظور استفاده می‌کنند. با تغییرات و اصلاحاتی که در مستندات فنی ITU پیاده شده در این نرم‌افزارها رخ می‌دهد، این نرم‌افزارها نیازمند به‌روزرسانی خواهند بود. در حال حاضر چنین نرم‌افزارهایی با قابلیت به‌روزرسانی در اختیار محققان کشور ما نیست. اما روش دیگر به منظور تحلیل و شبیه‌سازی این سناریوها، انجام این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای پایه و زبان‌های برنامه‌نویسی رایج و در دسترس مثل MATLAB و C می‌باشد. همچنین می‌توان به طراحی نرم‌افزار آن به صورت بومی پرداخت. از چالش‌های عمده در تحلیل تداخل ESIM در کشور می‌توان به تعدد و گستردگی مستندات فنی ITU که باید به این منظور بررسی و شبیه‌سازی شوند و همچنین در نظر گرفتن مشخصات فنی و فیزیکی تمام سرویس‌های هم‌فرکانس با ESIM در کشور در این شبیه‌سازی، اشاره نمود. از طرفی کشورهای مختلف دنیا در حال استفاده یا برنامه‌ریزی برای استفاده از این فناوری و نیز تحلیل و شبیه‌سازی به منظور شناسایی الزامات کنترل تداخل آن می‌باشند [۶-۲۷]. از این رو حداقل آسیب عدم بررسی این تداخل در کشور را می‌توان اختلالات فرکانسی در برخی سرویس‌های کشور از سوی هواپیماها و کشتی‌های بین‌المللی دارای این فناوری که وارد یا نزدیک مرزهای کشور می‌شوند، نام برد. برای نمونه جدول (۱) برنامه برخی کشورهای آسیایی را در استفاده از فناوری ESIM و نیز دیگر سرویس‌ها در باند فرکانسی Ka نشان می‌دهد [۱۸-۲۱ و ۲۷].

۶- استخراج الزامات کنترل تداخل Non-GEO ESIM

به منظور استخراج الزامات کنترل تداخل ابتدا باید پارامترهای ورودی شامل مفروضات و الزامات که برخی از آن‌ها بر اساس توصیه‌نامه‌های بین‌المللی مشخص می‌گردد، تعیین شود. به طور کلی ESIM در حالت فرستندگی بر اساس این که در ارتباط با ماهواره GEO یا Non-GEO باشد، می‌تواند بر روی ایستگاه‌های زمینی ثابت و سیار تداخل ایجاد نماید [۲۸].

تداخل ناشی از این فناوری با توجه به ویژگی‌های سرویس‌های موجود و نیز پارامترهای شبکه‌های ماهواره‌ای GEO مورد استفاده در هر کشوری می‌بایست بررسی گردد. همچنین، الزامات پیشگیرانه استخراج و یا صحت‌سنجی گردد [۲۹]. در ادامه به بیان چگونگی راه حل‌ها و مطالعات پیشنهادی به منظور بررسی

جدول ۱: به‌کارگیری و برنامه برخی کشورهای آسیایی در استفاده از باند فرکانسی Ka و فناوری ESIM [۲۷]

کشور	باند فرکانسی (GHz)	زیر باندهای فرکانسی (GHz)	کاربردهای رایج	برنامه
ژاپن	17.7-20.2	17.7-18.72	Wireless access system Fixed radiocommunications Satellite communications (فروسو)	
		18.72-18.8	Satellite communications (فروسو)	
		18.8-19.3	Wireless access system (19.22-19.7GHz) Fixed radiocommunications (19.22-19.7GHz) Satellite communications (فروسو)	
		19.3-19.7	Wireless access system Fixed radiocommunications Satellite communications (فروسو)	
		19.7-20.2	Satellite communications (فروسو)	ESIMs
	27.5-30	27.5-29.5	Satellite communications (فروسو)	5G (under study)
		29.5-30.0		ESIMs
نیوزیلند	17.7-20.2	17.7-19.7	Fixed links Ka-band FSS downlink	
		19.7-20.2	Ka-band FSS downlink (including ESIM)	ESIMs
	27.5-30	27.5-28.35	Previously planned for Local Multi-point Distribution Services (LMDS)	LMDS
		27.5-29.5	Ka-band FSS uplink	
		29.5-30	Ka-band FSS uplink (including ESIM)	ESIMs
ایران	17.7-20.2	17.7-19.7	Point to Point Link for Backhaul	
	27.5-30	27.9-28.5	Point to Point Link for Backhaul	
چین	17.7-20.2	17.7-19.7	Geostationary FSS satellite systems Microwave relay systems	
		19.7-20.2	Geostationary FSS satellite systems	ESIMs
	27.5-30	27.5-29.5	Geostationary FSS satellite systems	
		29.5-30		ESIMs
سنگاپور	17.7-20.2	17.7-19.7	Island-wide fixed service	
		19.7-20.2	Fixed satellite	ESIMs
	27.5-30.0	27.5-29.5	Fixed satellite	
		29.5-30.0		ESIMs
ویتنام	17.7-20.2	17.7-19.7	Point-to-point link	Satellite systems (including ESIMs)

M-ESIM، موقعیت قرارگیری ایستگاه سیار و ارتفاع ایستگاه M-ESIM مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نهایتاً الزامات کنترل تداخل و حداقل فاصله مورد نیاز استخراج خواهد شد.

۸- مرکز مانیتورینگ و کنترل شبکه (NCMC) و الزامات، مسئولیت‌ها و اختیارات در رابطه با عملکرد ESIM ها
ضرورت مانیتورینگ و کنترل دائمی ESIM ها و الزامات مربوطه

زوایای مختلف و بر حسب موقعیت قرارگیری ایستگاه L-ESIM (در محدوده داخل یا خارج از شهر)، موقعیت قرارگیری ایستگاه سیار و ارتفاع ایستگاه L-ESIM مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.
سناریوی پیشنهادی ششم: در این سناریو تداخلات احتمالی Non-GEO M-ESIM بر روی ایستگاه‌های سیار و پایه بر حسب زوایای مختلف (زاویه جهت‌گیری آنتن ایستگاه سیار و M-ESIM نسبت به راستای آزمون) بر حسب موقعیت قرارگیری ایستگاه

به همراه مسئولیت‌ها و اختیارات نهادهای مختلف در این راستا، از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با عملیات ESIM ها و احکام قطعنامه ۱۶۹ است [۳۳]. در این بخش به تشریح مفاهیم مرتبط با NCMC و مسئولیت‌ها و اختیارات مرتبط با مانیتورینگ و کنترل دائمی ESIM ها پرداخته شده است [۳۴].

۸-۱- سابقه و نقش NCMC در شبکه ماهواره‌ای

در این قسمت سابقه NCMC در مقررات ITU و جایگاه و نقش آن در شبکه‌های ماهواره‌ای بررسی شده است. این بررسی، نقش NCMC را در مانیتورینگ و کنترل ESIM مشخص خواهد کرد. NCMC نقش بسیار مهمی در شبکه ماهواره‌ای VSAT دارد [۳۴] که در دو مرحله انجام می‌شود:

- در شروع عملیات VSAT

- در طی عملیات VSAT

۸-۱-۱ نقش NCMC در شروع عملیات VSAT

NCMC قبل از شروع عملیات VSAT سه وظیفه اصلی بر عهده دارد:

الف- NCMC وضعیت عملیاتی VSAT را در روشن شدن آن ارزیابی می‌کند (به همراه پردازشگر فرمان داخلی VSAT) و زمانی اجازه فعال شدن ارسال VSAT را می‌دهد که:

- VSAT معین کند که به درستی دریافت و ترجمه یک سیگنال فرمان مشخص تولید شده توسط NCMC را انجام می‌دهد.
- VSAT قطعی کند که هیچ تداخل مضرّی مشخص و آشکار نشده است.

- پارامترهای شروع ارسال VSAT مانند فرکانس، توان، مدولاسیون، الگوی تایمینگ و کدینگ و... با عملکرد مورد انتظار تطابق داشته باشند.

ب- NCMC پارامترهای آغازین ارسال VSAT را با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از پروفایل‌های زیر تعیین می‌کند:

- موقعیت جغرافیایی VSAT که برای ایجاد تایمینگ، تلفات انتشار و این که آیا ترمینال برای عملیات در آن محل مجوز دارد، مورد نیاز است.

- بهره ماهواره در جهت VSAT که برای تعیین توان ارسالی از VSAT و به VSAT به کار می‌آید.

- آمار و اطلاعات باران محلی

- پروفایل‌های ثبت شده سرویس VSAT (به عنوان مثال بیشترین سرعت ارسال جهت inbound/ outbound)

- تعداد فعلی ترمینال‌های VSAT ای که پیش‌تر مجوزدهی شده‌اند یا در حال حاضر عملیاتی هستند (برای پیشگیری از بارگذاری بیش از حد منابع ماهواره)

۸-۱-۲ NCMC و کنترل و پایش VSAT در طی عملیات آن

NCMC در طی عملیات VSAT کارکردهای کنترل و پایش زیر را بر عهده دارد:

الف) به صورت دائمی VSAT را از جهت درستی عملکرد آن ارزیابی می‌کند.

ب) سلامتی VSAT را پایش کرده و تعیین می‌کند که آیا VSAT دچار خرابی شده است. ارسال VSAT در صورت بروز یکی از شرایط زیر بایستی قطع شود:

- از دست دادن سیگنال حامل کنترلی ارسالی از NCMC

- آشکارسازی ایرادی که می‌تواند منجر به ایجاد تداخل مضرّ شود.

- فرمان از NCMC جهت تغییر فرکانس ارسال

- افزایش خطای نشانه‌روی از مقدار مجاز
- تغییر مکان VSAT به یک ناحیه جغرافیایی که در آن ناحیه از ادمین مربوطه مجوز عملیات ندارد.

همچنین VSAT بایستی فرمان‌ها برای فعال‌سازی/ غیرفعال‌سازی ارسال را از NCMC یا تأسیسات معادل آن (مثلاً در حالت اضطراری) بپذیرد.

ج) NCMC به صورت پیوسته و دائمی پروفایل عملیاتی VSAT را مدیریت می‌کند (ر.ک به ۸-۱-۱ ب)

۸-۲- جایگاه NCMC در ITU مرتبط با ESIM ها

جایگاه مرکز کنترل و مانیتورینگ شبکه (NCMC) در ITU و مرتبط با ESIM ها در [۳۵] به صورت زیر ارائه شده است:

الف- ESIM ها موضوع مانیتورینگ و کنترل دائمی توسط مرکز کنترل و مانیتورینگ شبکه (NCMC) یا تأسیسات شبکه معادل هستند که ESIM را برای اطمینان از اینکه عملیات آن در محدوده مقادیر پارامترهای عملیاتی از پیش تعیین شده است، مانیتور می‌کند.

ب- ESIM ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که قابلیت دریافت و عمل، دست‌کم روی فرمان‌های «فعال‌سازی ارسال و غیرفعال‌سازی ارسال» را از NCMC، و نیز هر تأسیسات مشابه در کشور/ کشورهای مجوز دهنده عملیات ESIM داشته باشند. از طرف دیگر ESIM ها از جهات مرتبط با وظایف NCMC بسیار شبیه VSAT ها هستند. [۳۶] موارد اختلاف منحصر به موارد ارائه شده در جدول (۲) می‌باشد.

سابقه مربوط به NCMC به طور کامل در شبکه‌های VSAT وجود دارد. بر این اساس و با توجه به وظایف NCMC در شبکه‌های ماهواره‌ای، NCMC یک واحد کارکردی در Hub شبکه ارتباطی ESIM بوده و دارای پشتیبان است. از این رو در هر کشور مجوز دهنده که hub شبکه را در اختیار داشته باشد، برای ESIM های تحت مجوز آن کشور قابل پیاده‌سازی می‌باشد. از این رو شایسته است در راستای توسعه روزافزون فناوری ESIM، به بررسی و پیاده‌سازی مراکز NCMC مربوط در کشور پرداخته شود، که این مهم نیز نیازمند حمایت سازمان تنظیم مقررات رادیویی کشور می‌باشد.

۹- پایش و مانیتورینگ طیف فرکانسی رادیو فضایی

مساله تداخل (Interference) ماهواره‌ای، مساله‌ای است که کماکان وجود دارد. به طور خاص، پیش‌بینی می‌شود که تداخل VSAT علی‌رغم تلاش‌های زیادی که در این صنعت شده است، در آینده نیز موضوع مهمی باشد. یکی از مشکلات، HTS های جدید هستند. با صدها پرتو نقطه‌ای در هر ماهواره و آنتن‌هایی که به طور فزاینده‌ای کوچک‌تر می‌شوند، شرایط ایده‌آلی را برای ایجاد تداخل فراهم می‌کنند. یکی از چالش‌های احتمالی مورد بحث بیشتر، تعداد منظومه‌های ماهواره‌ای هستند که به زودی می‌آیند. در چند سال آینده، OneWeb، SpaceX، بوئینگ و غیره قصد دارند ده‌ها هزار ماهواره کوچک را در LEO پرتاب کنند. این تعداد علاوه بر ماهواره‌های متعدد Iridium و O3b موجود در مدار هستند.

ITU و بسیاری از رگولاتورهای مخابرات منطقه‌ای و ملی در حال توسعه استانداردها و مقررات هستند به طوری که با رعایت آنها توسط ESIM، تداخل‌ها تا حد امکان تعدیل و تخفیف می‌یابد. با این وجود باز احتمال تداخل در این سرویس، وجود خواهد داشت. این تداخلات می‌تواند به دلیل استفاده از ترمینال‌های بدون مجوز توسط برخی کاربران، خرابی تجهیزات، خطا در نشانه‌روی، اهداف

جدول ۲: مقایسه ESIM و VSAT

عملکرد فنی	ESIM	VSAT	نکات تکمیلی مرتبط در خصوص ESIM
دقت نشانه‌روی آنتن	کاملاً قابل مقایسه برای ESIM و VSAT		
نحوه عملکرد خارج محور Sidelobe (Off-axis) یا	کاملاً قابل مقایسه برای آنتن‌های با ابعاد مشابه در تطابق با محدودیت‌های چگالی e.i.r.p خارج محور پایه‌گذاری شده یا سطوح تداخل هماهنگ شده		
کاهش خطای نشانه‌روی در کلیه حالت‌های عملیاتی	ESIM در کلیه حالت‌های عملیاتی، قابلیت کاهش یا حذف خطای نشانه‌روی را دارد	VSAT فقط در زمان نصب و راه‌اندازی و نیز احتمالاً بازدهی‌ها برای سرویس‌های نگهداری بعدی، قابلیت حذف یا کاهش خطا را دارد. در مواقع دیگر خطا افزایش می‌یابد.	حرکت‌های پلتفرم ESIM با شتاب‌های ناگهانی (مثلاً برای اتومبیل‌ها) در جهت‌های مختلف. استفاده ESIM‌ها از تکنیک‌های مختلف نشانه‌روی و رهگیری ماهواره مقصد (مانند تکنیک‌های حلقه بسته بر اساس قدرت سیگنال RF)
ریسک تداخل روی ماهواره‌های مجاور (ناشی از خطای نشانه‌روی)	ESIM ریسک تداخل بیشتری نسبت به VSAT ایجاد نمی‌کند.		
عملکرد در حالت افزایش خطای نشانه روی از مقدار مجاز ماکزیمم	Carrier off "or transmit inhibit state"		
	عملکرد ESIM‌ها بر اساس تمهیدات اقتباس شده از استاندارد ETSI Standard EN978 303 این امر در مورد غالب VSA‌های ثابت صادق نیست		

ماهواره‌ای را طی کرده است، در دو ایستگاه مانیتورینگ down convert و دیجیتالی می‌شود. سپس همبستگی هر دو نمونه به دست می‌آید و مکان مبدأ سیگنال محاسبه می‌شود.

همان‌طور که گفته شد یکی از وظایف مهم ایستگاه‌های پایش و مانیتورینگ طیف ماهواره‌ای شناسایی تداخل می‌باشد. این هدف مهم شامل بخش‌های عمده زیر می‌باشد:

- تعیین موقعیت جغرافیایی فرستنده‌های تداخل بر روی سطح زمین
- تعیین اینکه آیا فرستنده‌های تداخل، متحرک یا ثابت هستند.
- شناسایی و آنالیز فنی تداخل شبکه‌های ارتباطی ماهواره‌ای.
- تعیین موقعیت دقیق منابع تداخل زمینی.
- بررسی و تأیید پارامترهای انتشاری با شرایط مجوز صادر شده
- حذف تداخل

۹-۱- رفع تداخل

در عمل، از بین بردن تداخل زمینی، به دو مرحله نیاز دارد: پیدا کردن منطقه‌ای که تداخل از آنجا انجام می‌شود و سپس پیدا کردن موقعیت مکانی آن روی زمین. هر مرحله دارای محدودیت‌های زیادی است که دقت، میزان موفقیت و سرعت را محدود می‌کند. هدف نهایی، رفع تداخل در اسرع وقت است. منشا تداخل، انواع مختلفی دارد که می‌توان آن‌ها را به‌صورت دسته‌بندی زیر مطرح نمود [۳۷-۳۸].

- تداخل ماهواره مجاور در اثر:
- هماهنگی ضعیف شبکه ماهواره‌ای
- افزایش ازدحام

سیاسی و غیره روی دهد. از این‌رو، بررسی تداخل سنجی در این سرویس، اهمیت به سزایی دارد.

هدف از مدیریت طیف، به بیشینه رساندن راندمان طیف، کمینه کردن تداخل و از بین بردن استفاده غیرمجاز و نامناسب از طیف است. مانیتورینگ طیف، حامی روند مدیریت طیف است. تداخل زمینی با ابزارهای تداخل سنج زمینی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. تداخل سنجی ماهواره‌ای نیز با استفاده از ایستگاه مانیتورینگ ماهواره‌ای انجام می‌شود. مانیتورینگ سرویس‌های رادیویی فضایی در مقایسه با مانیتورینگ رادیویی زمینی به روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی نیاز دارد. برخی از این ایستگاه‌های مانیتورینگ مجهز به Geolocation می‌باشند تا علاوه بر تشخیص تداخل، به موقعیت‌یابی منبع تداخل نیز بپردازند. بنابراین، ایجاد ایستگاه‌های کاملاً کاربردی مانیتورینگ ماهواره‌ای مجهز به Geolocation و بررسی تداخلات شبکه ماهواره‌ای برای ادمین‌های این شبکه‌ها، بسیار مهم است. Geolocation با استفاده از روش‌ها و سناریوهای مختلفی، منبع سیگنال تداخل را شناسایی می‌کند. طبق گزارشات اخیر، با رشد و پیشرفت فناوری، این ابزارها بیشتر در ماهواره‌های تجاری به کار گرفته می‌شوند تا منابع تداخل ناخواسته و عمدی را بیابند.

بیشتر سیستم‌های Geolocation امروزی علاوه بر اینکه سیگنال تداخلی را بر روی ماهواره‌ای که تحت تاثیر این تداخل قرار گرفته است آنالیز می‌کنند، بلکه سیگنال تداخل را بر روی ماهواره ثانویه که دارای همان فرکانس ارسال، پلاریزاسیون و منطقه پوشش است، مورد بررسی و آنالیز قرار می‌دهند. سیگنال که دو لینک مختلف

● خرابی تجهیزات شامل:

- جایجایی فرکانس، تداخل پلاریزاسیون متقابل، نشانه‌روی نامناسب به سمت ماهواره
- عدم تأیید مصوبه و آزمایش، نصب ضعیف، کیفیت پایین خطای اپراتور شامل:

- سطح توان ارسالی بالاتر، فرکانس اشتباه، پلاریزاسیون نامناسب، نشانه‌روی اشتباه به سمت ماهواره، عدم انطباق الگوی تشعشعی آنتن ایستگاه زمینی و ارسال توان از لوب کناری به ماهواره مجاور
- عدم آموزش

● کریر غیرمجاز (تداخل بسیار رایج) شامل:

- استفاده بدون پرداخت هزینه از فرستنده ماهواره‌ای (سرقت)
- انجام آزمایش و تست
- مسدود کردن عمدی (نادر) شامل:
- ارسال خصمانه برای قطع ارتباط
- تداخل عمدی
- اهداف سیاسی

ترانسپوندرهای ماهواره‌ای شفاف نسبت به تداخل‌های عمدی و غیرعمدی حساس هستند. تداخل غیرعمدی به‌طور معمول به دلیل عملکرد نادرست سرویس ماهواره‌ای دارای مجوز و یا تداخل ماهواره مجاور است. عملکرد نادرست ماهواره‌ای دارای مجوز نیز ناشی از خطای اپراتور، خرابی تجهیزات و تداخل پلاریزاسیون متقاطع ایجاد می‌شود. تداخل عمدی می‌تواند ناشی از مسدود کردن یا جَمینگ عمدی برای اهداف سیاسی یا جنایی و همچنین ایستگاه‌های زمینی که دارای مجوز نیستند و به‌طور غیرقانونی فرکانس‌های ماهواره‌ای که استفاده نمی‌شوند را به اشتغال درمی‌آورند. این تداخل عمدی، باعث تخریب مضر یا قطع سرویس مجاز می‌شود. بنابراین، Geolocation و بررسی تداخلات شبکه ماهواره‌ای بسیار مهم است [۳۹].

۹-۲- الزامات پیاده‌سازی Geolocation

همان‌طور که پیشتر مطرح شد، گذشته از رعایت یا عدم رعایت الزامات کنترل تداخل ESIM، باز هم احتمال تداخل وجود خواهد داشت. با توجه به ضرورت ارائه سرویس ESIM در آینده نزدیک، لازم است که تداخل‌سنجی این سرویس نیز در کشور مورد مطالعه قرار گیرد. عمده‌ترین مساله تداخل ESIM بر روی سرویس‌های زمینی یا ماهواره‌ها، ناشی از تحرک آنهاست. درحقیقت مانیتورینگ تداخل ESIM مانند مانیتورینگ تداخل VSAT متحرک است. اگرچه ایستگاه‌های زمینی ESIM ملزم به داشتن کد شناسایی و رعایت الزامات تداخل می‌باشند ولی به دلایلی از قبیل خرابی تجهیزات، اهداف خرابکاری و سیاسی و غیره وقوع تداخل محتمل است. از این‌رو بررسی تداخل و همچنین پیاده‌سازی Geolocation به منظور شناسایی منبع تداخل در این سرویس، ضروری است. برای پیاده‌سازی Geolocation لازم است که ایستگاه مانیتورینگ مجهز به آنتن‌ها و تجهیزات در باندهای فرکانسی موردنظر ایجاد گردد. به‌طور کلی، سیستم Geolocation شامل ماهواره، ایستگاه دریافت و فرستنده‌های مرجع می‌باشد. در مجموع، الزامات پیاده‌سازی و اجرای موفقیت‌آمیز Geolocation با دقت مناسب، شامل موارد زیر است:

- **ماهواره مجاور:** باید به محدوده جداسازی بین ماهواره اصلی و ماهواره مجاور و همچنین اشتغال طیف توجه شود.
- **ephemeris ماهواره:** اطلاعات دقیق ephemeris ماهواره، بسیار

مهم است.

- **سیگنال‌های مرجع:** برای کالیبره کردن ephemeris ماهواره‌ای و افزایش دقت Geolocation، به سیگنال‌های مرجع نیاز است که در این راستا، موقعیت دقیق ایستگاه‌های فرستنده مرجع اهمیت دارد و بر دقت Geolocation تأثیر می‌گذارد.

- **همپوشانی پوشش:** هر دو ماهواره اصلی و مجاور باید پوشش ایستگاه‌های فرستنده و گیرنده را در هر دو لینک رو به بالا و لینک رو به پایین داشته باشند.

- **همپوشانی فرکانسی:** دو ماهواره اصلی و مجاور باید باند فرکانسی مشابه داشته باشند.

- **اشتغال فرکانسی:** در ماهواره مجاور، باید طیف خالی وجود داشته باشد.

- **ویژگی‌های سیگنالی:** اندازه آنتن، نوع مدولاسیون و متحرک یا ثابت بودن فرستنده در ویژگی‌های سیگنال اهمیت دارد.

۹-۳- دقت Geolocation

دقت Geolocation به پارامترهای زیادی بستگی دارد که به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- دقت ephemeris ماهواره (سرعت و موقعیت ماهواره)
- ایستگاه مرجع (دقت موقعیت به ویژه نخستین مرجع)
- ویژگی‌های سیگنال (به‌عنوان مثال نوع مدولاسیون، پهنای باند)
- همبستگی نسبت سیگنال به نویز (SNR) بالاتر به معنای دقت بالاتر است)

- بزرگ‌ترین منبع خطای Geolocation مربوط به ephemeris ماهواره است.

بنابراین میزان موفقیت Geolocation به در دسترس بودن ماهواره مجاور و اطلاعات دقیق ephemeris آن، در دسترس بودن منبع مرجع و همچنین سیستم پردازشی وابسته است.

۹-۴- چالش‌های مطرح در Geolocation ماهواره‌ای

در انجام Geolocation چالش‌هایی وجود دارد که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود:

- **دقت:**
- دقت ephemeris ماهواره
- دقت سیگنال مرجع که از ایستگاه‌های مرجع معلومی ارسال می‌گردند.
- **میزان موفقیت:**
- تشخیص سیگنال ضعیف
- در دسترس بودن ماهواره مجاور (ka band، پرتو نقطه‌ای)
- پردازش پردازنده

- **دقت Geolocation** برای محدود کردن منبع تداخل به یک ناحیه کوچک، کافی نیست (در حال حاضر ۲۰ کیلومتر است)
- **بیشتر منابع تداخل** در ناحیه شهری هستند که معمولاً سیگنال لوب کناری لینک بالارونده بوسیله ساختمان‌ها، مسدود می‌شوند.
- **سیگنال لوب کناری** خیلی ضعیف است و تشخیص آن با روش جستجوی زمینی، سخت می‌باشد.

- **سخت و وقت‌گیر بودن پیدا کردن تداخل**
- **با توجه به ضرورت ارائه سرویس ESIM** در کشور در آینده نزدیک، لازم است که تداخل‌سنجی مربوط نیز در کشور مورد مطالعه قرار گیرد. بنابراین، در کشور ما نیز نیاز به راه‌اندازی ایستگاه‌های مانیتورینگ تداخل ماهواره‌ای که مجهز به سیستم Geolocation نیز باشد، وجود دارد.

۱۰- نتیجه گیری

تداخل GEO ESIM با هریک از سرویس‌های هم‌فرکانس، در برخی مستندات ITU بررسی شده و در قطعنامه ۱۶۹ برخی الزامات فنی به منظور پیشگیری و کاهش تداخل آن بیان شده است. همچون سناریوها و تحلیل‌های انجام شده توسط برخی کشورها، به منظور استخراج الزامات فنی کنترل (حذف یا کاهش) تداخل وارد شده از GEO ESIM بر روی سرویس‌های ثابت و سیار زمینی، شبیه‌سازی‌هایی نیز برای استخراج الزامات کنترل تداخل Non-GEO ESIM و ارایه در WRC2023 نیز مورد نیاز است.

با دانش پیاده‌سازی سناریوهای شبیه‌سازی مربوط به GEO ESIM، تداخل ناشی از این فناوری با توجه به ویژگی‌های سرویس‌های موجود و نیز پارامترهای شبکه‌های ماهواره‌ای GEO مورد استفاده در کشور بررسی می‌شوند و الزامات پیشگیرانه استخراج و یا صحت‌سنجی خواهند شد. مهم‌تر اینکه با الگوبرساری از سناریوهای مربوط به GEO ESIM و جایگزینی پارامترهای مربوط به شبکه‌های ماهواره‌ای Non-GEO با پارامترهای شبکه ماهواره‌ای GEO در این شبیه‌سازی‌ها، الزامات فنی کنترل تداخل فناوری Non-GEO ESIM در کشور استخراج خواهد شد. با توجه به مستندات ارایه شده توسط کشورهای پیشرو در این حوزه، در پیش‌نشرهای برگزار شده WRC2023، صحت این مهم تأیید شده است. برخی کشورهای پیشرو در این حوزه از نرم‌افزارهای خاصی که برای این منظور طراحی شده، استفاده می‌کنند. البته با تغییرات و اصلاحاتی که در مستندات فنی ITU رخ می‌دهد، این نرم‌افزارها نیاز به بروزرسانی خواهند داشت، که در حال حاضر چنین نرم‌افزارهایی با قابلیت بروزرسانی در دسترس محققین کشور نمی‌باشد.

همان‌طور که در این پژوهش، بررسی و مشاهده شد به منظور مدیریت تداخل ESIM باید سه حوزه اصلی مورد تحقیق، بررسی و پیاده‌سازی قرار گیرند. مساله نخست در کنترل و مدیریت تداخل ESIM در کشور تحلیل، شبیه‌سازی و استخراج الزامات کنترل تداخل از طریق طراحی نرم‌افزار بومی یا استفاده از نرم‌افزارهای پایه می‌باشد. لازم به ذکر است که تعدد و گستردگی مستندات فنی ITU که باید به این منظور شبیه‌سازی شوند و نیز در نظر گرفتن مشخصات فنی و فیزیکی تمام سرویس‌های هم‌فرکانس با ESIM در کشور، از چالش‌های عمده در تحلیل و شبیه‌سازی تداخل ESIM و استخراج الزامات کنترل تداخل آن در کشور می‌باشد. این مهم با حمایت‌های سازمان تنظیم مقررات رادیویی و نیز سازمان فضایی کشور قابل انجام است.

به منظور کنترل الزامات مصوب، استقرار و پیاده‌سازی NCMC برای شبکه ESIM، با مطالعه و بررسی سابقه مربوط در شبکه‌های VSAT قابل انجام است. از این رو مساله دوم و پیش رو به منظور کنترل و مدیریت تداخل ESIM که نیاز به بررسی و پیاده‌سازی در کشور دارد، مرکز مانیتورینگ و کنترل شبکه ESIM یا همان NCMC می‌باشد. پیش‌برد و تکمیل فعالیت‌های لازم در این خصوص با حمایت سازمان تنظیم مقررات رادیویی کشور میسر خواهد شد.

با وجود تصویب الزامات کنترل تداخل برای استفاده از ESIM، بازهم احتمال تداخل (عمدی یا غیرعمدی) سرویس‌های این فناوری به دلایل مختلف وجود خواهد داشت. این تداخلات می‌توانند به دلیل استفاده از ترمینال‌های بدون مجوز توسط برخی کاربران، خرابی تجهیزات، خطا در نشانه‌روی، اهداف سیاسی و غیره روی دهد. از این رو پیاده‌سازی و استقرار ایستگاه‌های

پایش و مانیتور طیف فرکانسی و سنجش تداخل‌های موجود امری ضروری است. تداخل وارد شده توسط ESIM بر روی ماهواره‌ها توسط ایستگاه‌های پایش و مانیتورینگ رادیوفضایی انجام می‌شود که این مورد نیاز به تحقیق، بررسی و پیاده‌سازی در کشور دارد. گام مؤثرتر و پیشرفته‌تر بعد از رصد و آشکارسازی تداخل فرکانسی توسط این ایستگاه‌ها، یافتن منبع تداخل می‌باشد که این هدف توسط سامانه Geolocation محقق می‌شود. لازم به ذکر است، از آنجا که Geolocation قابلیت شناسایی هر دو نوع تداخل کننده ثابت و متحرک را دارا است، بنابراین پیاده‌سازی و استفاده از آن، در تداخل‌سنجی و مدیریت تداخل ESIM مفید و مؤثر می‌باشد. از این رو مساله سوم و پیش رو در مدیریت تداخل ESIM راه‌اندازی ایستگاه‌های پایش و مانیتور طیف رادیوفضایی و نیز سامانه Geolocation در کشور می‌باشد. بی‌شک حمایت‌های سازمان‌های متولی، در این زمینه موجب تحقق و پیاده‌سازی آن در کشور خواهد بود.

امید است با انجام و پیش‌برد تحقیقات و فعالیت‌های لازم در هر سه حوزه یاد شده، گام مؤثری در راستای مدیریت تداخل ESIM در کشور برداشته شود. همچنین با برداشتن این گام شاهد شکل‌گیری بستر مناسب برای کنترل تداخل فناوری‌های مشابه در کشور باشیم.

۱۱- واژگان کلمات اختصاری به‌کار رفته در مقاله

معادل فارسی	لغات انگلیسی
ایستگاه‌های زمینی در حال حرکت	ESIM (Earth Station In Motion)
سرویس ماهواره‌ای به منظور اکتشافات زمینی	EES
سرویس ثابت	Fixed Service
سرویس ثابت ماهواره‌ای	FSS (Fixed Satellite Service)
مدار ماهواره‌ای زمین آهنگ	GEO
تداخل	Interference
اتحادیه بین‌المللی مخابرات	ITU (International Telecommunication Union)
سرویس متحرک زمینی	Mobile Service
مرکز مانیتورینگ و کنترل	Network Control and Monitoring Center (NCMC)
مدار ماهواره‌ای غیر زمین آهنگ	Non-GEO
کنفرانس ویدئویی	Video conference
انتقال صدا بر روی پروتکل اینترنت	Voice over IP (VoIP)

مراجع

- [1] Enrique G. Cuevas and Vijitha Weerackody, "Technical Characteristics and Regulatory", Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 33, No. 1, 2015.
- [2] Report of the CPM on technical, operational and regulatory/procedural matters to be considered by the World Radiocommunication, Radiocommunication Bureau (ITU publication), 2nd Session of the Conference Preparatory Meeting in Sharm El-Sheikh, Egypt, pp.1-918, 2019.
- [3] WRC-19 agenda item 1.5 Resolution 158 (WRC-15), Available at: <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019/Documents/PFA-WRC19-E.pdf> ITU, pp.1-567, 2019.
- [4] Radio Regulations Resolutions and Recommendations,

2019.

- [20] ITU-R WP4A, *Proposal of the methodology to examine the characteristics of aeronautical ESIM in conformity with pfd limits*, Document 4A/103-E, Japan, 2020.
- [21] ITU-R WP4A, *Proposal to establish a correspondence group for study on the examination characteristics of aeronautical ESIM complying with the power flux density limits on the Earth's surface specified in Part II of Annex 3 to the Resolution 169*, Korea, 2020.
- [22] ITU-R WP4A, *Methodology TO Examine Conformity of Aeronautical ESIM communicating with GSO FSS with PFD limits*, Canada, 2020.
- [23] ITU-R WP4A Contribution 807, "Revisions to working document towards a preliminary draft new Report ITU-R S.[ESIM] - Operation of earth stations in motion (ESIM) in fixed-satellite service allocations at 17.7-19.7 GHz and 27.5-29.5 GHz - Protection criteria for feeder links of the MSS in the bands 19.3-19.7 GHz and 29.1-29.5 GHz", United States of America, 2018.
- [24] ITU-R WP4A Contribution 772, "Sharing and compatibility between ESIM and mobile service", United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 2018.
- [25] ITU-R WP4A Contribution 649, "Proposed operational and regulatory considerations for use of ESIMs in the frequency bands 17.7-19.9 GHz and 27.5-29.5 GHz", Kenya (Republic of), 2018.
- [26] ITU-R WP4A Contribution 642, "Revisions to working document on WRC-19 agenda item 1.5 - Operation of earth stations in motion (ESIM) communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service allocations at 17.7-19.7 GHz and 27.5-29.5 GHz", Canada, 2018.
- [27] APT Report on Survey Study on Usage and Future Plans of the Bands 17.7-20.2 GHz and 27.5-30 GHz in the Asia-Pacific Region, No. APT/AWG/REP-70, pp.1-54, 2017.

[۲۸] رقیه کریم زاده بانی، پدram حاجی پور، "بررسی تداخل ESIM با سرویس‌های همفرکانس"، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، صفحات ۴۹-۱.

[۲۹] رقیه دوست، پدram حاجی پور، "گزارش رصدی راهکارهای فنی مقابله با تداخل فرکانسی سرویس‌های پهن‌بند ماهواره‌ای متحرک با دیگر سرویس‌ها در کشور"، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، اردیبهشت ۱۴۰۰، صفحات ۲۴-۱.

[۳۰] پدram حاجی پور، رقیه دوست، "بررسی تداخل ESIM با سرویس‌های ثابت"، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، صفحات ۱۴۰-۱.

[۳۱] پدram حاجی پور، رقیه دوست، "بررسی تداخل ESIM با سرویس‌های سیار"، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، صفحات ۱۲۰-۱.

[۳۲] پدram حاجی پور، "بررسی تداخل Non- GEO ESIM با سرویس‌های همفرکانس"، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تیر ماه ۱۴۰۰، صفحات ۸۷-۱.

[۳۳] علیرضا فاسونیه چی، "قطعه‌نامه ۱۶۹ اتحادیه جهانی مخابرات (ITU) برای عملیات ESIM ها به همراه مفاهیم، الزامات و ویژگی‌های فنی"، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، خرداد ماه ۱۴۰۰، صفحات ۵۸-۱.

[34] Report ITU-R S2278, "Use of very small aperture terminals (VSATs)", pp.1-16, 2013.

[35] Report ITU-R S.2464-0 (07/2019), "Operation of earth stations in motion communicating with GEO stationary space stations in the fixed-satellite service allocations at 17.7-19.7 GHz and 27.5-29.5 GHz", pp.1-27, 2019.

[36] Report ITU-R S.2223-1 (10/2016), *Technical and operational requirements for GEO FSS earth stations on mobile platforms in bands from 17.3 to 30.0 GHz*, pp.1-19, 2016.

[37] M. H. Chen, "Application of a Dual Satellite Geolocation System on Locating Sweeping Interference," *Int. Science Index*, Vol.6, No.9, pp.1-6, 2012.

[38] Report ITU-R SM.2424-0, "SM Series Spectrum management "Measurement techniques and new technologies for satellite monitoring", pp.1-32, 2018.

[۳۹] رقیه کریم‌زاده بانی، "بررسی تداخل سنج‌های ماهواره‌ای"، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تیر ماه ۱۴۰۰، صفحات ۹۴-۱.

Edition 2020(RR-2020-00013-Vol.III-EA5)

[5] Radio Regulations Appendices, Edition 2020(RR-2020-00013-Vol.II-EA5)

[6] WRC-19 agenda item 1.5 Resolution 158 (WRC-15), "Sharing and compatibility between ESIM and fixed service, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland", Document 4A/884-E, pp.1-96, 2019.

[7] WRC-19 agenda item 1.5, "Earth stations in motion (ESIM) compatibility with non-GSO MSS feeder links in the bands 19.3-19.7 GHz and 29.1-29.5 GHz", Document 4A/826, Annex 15, pp.1-23, 2019.

[8] WRC-19 agenda item 1.5, Resolution 158 (WRC-15), *Working document towards a preliminary draft new Report ITU-R S/F .[ESIM-MS], Sharing and compatibility between earth stations in motion operating with geostationary FSS networks and current and planned stations of the FS in the frequency band 27.5-29.5 GHz*, Document 4A/TEMP/196, 2017.

[9] WRC-19 agenda item 1.5, Resolution 158 (WRC-15), *Sharing and compatibility between earth stations in motion operating with geostationary FSS networks and current and planned stations of the MS in the frequency band 27.5-29.5 GHz*, Document 4A/TEMP/273, 2018.

[10] WRC-19 agenda item 1.5, Resolution 158 (WRC-15), *Earth stations in motion (ESIM) compatibility with non-GSO MSS feeder links in the bands 19.3-19.7 GHz and 29.1-29.5 GHz*, Document 4A/675, Annex 13, 2018.

[11] WRC-19 agenda item 1.5, *Sharing and compatibility between ESIM and mobile service*, Annex 14 to Document 4A/826, 2019.

[12] WRC-19 agenda item 1.5, *Earth stations in motion (ESIM) compatibility with non-GSO MSS feeder links in the bands 19.3-19.7 GHz and 29.1-29.5 GHz*, Annex 15, Document 4A/826, 2019.

[13] WRC-19 agenda item 1.5, Resolution 158 (WRC-15), *Statistical methodologies to estimate the interference from land earth stations in motion (L-ESIM) communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service into mobile service (MS) stations operating in the frequency band 27.5-29.5 GHz*, Documents 4A/519 (Annex 22), 4A/536, 2018.

[14] WRC-19 agenda item 1.5 Resolution 158 (WRC-15), *Statistical methodologies to estimate the interference into fixed service stations operating in the 27.5-29.5 GHz frequency band from land earth stations in motion (L-ESIM) communicating with FSS geostationary space stations*, Documents 4A/519 (Annex 21), 4A/531, 2018.

[15] WRC-19 agenda item 1.5, Resolution 158 (WRC-15), *Sharing and compatibility between earth stations in motion operating with geostationary FSS networks and current and planned stations of the MS in the frequency bands 27.5-29.5 GHz and 17.7-19.7GHz*, Document 4A/675, Annexes 12 and 15, 2018

[16] WRC-19 agenda item 1.5 Resolution 158 (WRC-15), *Revisions to the working document towards a preliminary draft ner report ITU-R S./M.[ESIM-MS]*, 2018.

[17] ITU-R WP4A Contribution 885, "Sharing and compatibility between ESIM and mobile service", United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 2019.

[18] ITU-R WP4A Contribution 861, "Proposed modifications to working document towards a preliminary draft new Report ITU-R S./M.[ESIM-MS] - Sharing study between earth stations in motion operating with geostationary FSS networks and MS stations in the frequency band 27.5-29.5 GHz", China (People's Republic of), 2019.

[19] ITU-R WP4A Contribution 845, "Proposed modifications to working document towards a preliminary draft new Report ITU-R S./M.[ESIM-MS] - Sharing and compatibility between earth stations in motion operating with geostationary FSS networks and current and planned stations of the MS in the frequency band 27.5-29.5 GHz", Japan, Korea (Republic of),



مقاله علمی-ترویجی

ابر منظومه‌های ماهواره‌ای و بومی سازی مدل‌های انتشار امواج رادیویی: پدیده‌ها، پارامترها، روش‌های اندازه‌گیری و پیشنهاد چیدمان بومی سازی مدل‌ها

رضا بحری*، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، reza.bahri@itrc.ac.ir

پروین سجودی، پژوهشگر پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، p.sojoodi@itrc.ac.ir

سیدهاشم مداح حسینی، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، maddah@itrc.ac.ir

*نویسنده مسئول

چکیده

ابر منظومه‌های مخابراتی آخرین دستاورد عصر جدید فضایی است. این فناوری با داشتن تعداد ماهواره‌های زیاد، در ارتفاع پایین مدار، امکان ارائه خدمات با پهنای باند بالا، تاخیر کم و قابل رقابت با سایر بسترهای ارتباطی زمینی را فراهم می‌نماید. از جمله الزامات مهم در برقراری ارتباط مطمئن و پایدار در مخابرات ماهواره‌ای، مطالعه نحوه انتشار امواج رادیویی در باندهای فرکانسی مختلف جهت استخراج پارامترهای موثر در کارایی لینک ماهواره و ایجاد مدل و الگوی مناسب برای پیش‌بینی اثرات عوامل موثر بر انتشار امواج بر اساس پارامترهای بدست آمده برای مناطق مختلف می‌باشد. در این مقاله ضمن بررسی مختصر ویژگی‌های کلیدی ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای و همچنین بررسی دقیق‌تر یک نمونه از این نوع فناوری فضایی جدید، موضوع پدیده‌های جوی تاثیرگذار در انتشار امواج ماهواره‌ای در فرکانس‌های Ku و Ka مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی نه تنها مدارات با ارتفاع پایین، بلکه تا مدار زمین آهنگ پدیده‌های مختلف جوی و اثرگذاری آنها بر کیفیت سیگنال ماهواره‌ای بیان شده است. همچنین متناسب با روش‌های معرفی شده یک نمونه چیدمان پیشنهادی برای اندازه‌گیری هم‌زمان سیگنال ماهواره و پارامترهای هواشناسی ارائه و نتایج اندازه‌گیری عملیاتی نیز ارائه شده است.

کلمات کلیدی: ابر منظومه‌ها، انتشار امواج ماهواره‌ای، مدل‌های انتشار امواج، باند Ku و Ka

Mega Satellite Constellations and Localization of Radio Wave Propagation Models: Phenomena, Parameters, Measurement Methods and the Suggestion of Localization of Models

Reza Bahri*, Faculty member of ICT Research Institute, Tehran, Iran, reza.bahri@itrc.ac.ir

Parvin Sojoudi, Researcher of ICT Research Institute, Tehran, Iran, p.sojoodi@itrc.ac.ir

Seyed Hashem Maddah Hosseini, Faculty member of ICT Research Institute, Tehran, Iran, maddah@itrc.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

Mega Satellite Constellations are the latest achievement of the new space age. This technology, with a large

number of satellites, at a low orbital altitude, provides the possibility of providing services with high bandwidth, low delay and competitive with other terrestrial communication platforms. One of the important requirements in establishing reliable and stable communication in satellite communication is the study of the propagation of radio waves in different frequency bands in order to extract parameters effective in the efficiency of the satellite link and creating a suitable model for predicting the effects of factors affecting wave propagation based on the parameters obtained for different regions. In this paper, in addition to a brief review of the key features of satellite constellations, as well as a more detailed review of an example of this type of new space technology, the issue of atmospheric phenomena affecting the propagation of satellite waves at Ku and Ka frequencies has been investigated. In this study, not only LEO orbit, but also the earth's GEO various atmospheric phenomena and their effects on the satellite signal quality are described. Also, in accordance with the introduced methods, a proposed arrangement sample for simultaneous measurement of satellite signal and meteorological parameters has been presented and operational measurement results have also been presented.

Keywords: Mega Satellite Constellations, Satellite Wave Propagation, Radio Wave Propagation Model, Ku, Ka

۱-مقدمه

ابر منظومه‌های مخابراتی آخرین دستاورد عصر جدید فضایی است. این فناوری با داشتن تعداد ماهواره‌های زیاد، در مدار پایین زمین (LEO)، امکان ارائه خدمات با پهنای باند بالا، تاخیر کم و قابل رقابت با سایر بسترهای ارتباطی زمینی را فراهم می‌نماید. از طرفی از جمله الزامات مهم در برقراری ارتباط مطمئن و پایدار در مخابرات ماهواره‌ای، مطالعه نحوه انتشار امواج رادیویی در باندهای فرکانسی جهت استخراج و ارزیابی پارامترهای موثر در کارایی لینک ماهواره و ایجاد مدل و الگوی مناسب برای پیش‌بینی اثرات عوامل موثر بر انتشار امواج بر اساس پارامترهای بدست آمده برای مناطق مختلف می‌باشد. در مسیر انتشار امواج ماهواره‌ای، وجود گازهای جوی، بخار آب، مولکول‌های اکسیژن، ابرها، باران، طوفان، رعد و برق، گرد و غبار و مه گرفتگی در لایه‌های مختلف فضا، اعم از تروپوسفر و یونسفر، می‌توانند سبب تضعیف و یا قطع امواج ماهواره‌ای شوند که به نوبه خود، باعث افت کیفیت یا در برخی موارد، عدم دریافت سرویس شود. این پدیده‌های طبیعی باعث بوجود آمدن خطاها و مشکلاتی مانند تضعیف، تغییر پلاریزاسیون، محوشدگی، تأخیر و پاشندگی و ... در سیگنال شده و کیفیت یک ارتباط ماهواره‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهند که اثرات آنها باید به نحو مناسب در بودجه‌بندی لینک ماهواره لحاظ گردد [۱].

در این مقاله ابتدا مروری بر موضوع ارتباطات ماهواره‌ای انجام شده است. ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای و مشخصات و ویژگی‌های کلیدی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به پیشتازی ابر منظومه استارلینک از شرکت Space X، در بخش بعدی فعالیت‌های این شرکت مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده‌های تأثیرگذار بر انتشار امواج رادیویی در لینک ماهواره نظیر پدیده‌ها و اثرات تروپوسفر و مدل‌های پیش‌بینی آنها، تضعیف گازهای اتمسفری و مدل پیش‌بینی جهانی، تضعیف توسط باران و دیگر نزولات جوی و ابرها، اثرات هوای صاف، سینتیلیشن و محوشدگی چند مسیر، تضعیف حاصل از طوفان‌های شنی و خاکی، اثرات پلاریزاسیون متقابل مورد بررسی قرار گرفتند. موضوع مهم دیگر روش‌های اندازه‌گیری پارامترها است که در این راستا اندازه‌گیری رادیومتریک، اندازه‌گیری راداری و اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره بررسی شده‌اند. با توجه به راه‌اندازی نمونه پایلوت اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، در همین زمینه نمونه اندازه‌گیری و چیدمان پیشنهادی برای هر سناریو ارائه شده است.

۲- منظومه‌های ماهواره‌ای

به طور سنتی ماهواره‌های مدار زمین آهنگ (GEO) ارتباطات ماهواره‌ای را در مناطق وسیع برقرار می‌نمایند. انتقال اطلاعات در این ماهواره‌ها با نرخ داده پایین و تاخیر بالا همراه است. با این وجود در مناطقی که دسترسی به زیرساخت ارتباطی، از لحاظ کیفیت و قیمت غیر عملیاتی باشد، این نوع ارتباط قابل استفاده است. در سال‌های اخیر، ظهور ماهواره‌های زمین آهنگ پر ظرفیت (GEO HTS) تا حدودی مشکل ظرفیت و سرعت ارتباطی را برطرف نموده است، اما همچنان به خاطر تاخیر ذاتی لینک‌های ماهواره‌ای در مدار GEO، در کاربری‌های حساس به تاخیر قابل استفاده نیستند.

در سال ۲۰۲۰ بر طبق آمار یونسکو حدود ۱۳٪ جمعیت در کشورهای توسعه یافته و بیش از ۵۳٪ در کشورهای در حال توسعه به اینترنت دسترسی ندارد [۱]. ابر منظومه‌های ماهواره‌ای با توجه به ماهیت‌شان می‌توانند ارتباطات پهن‌بند را برای کاربران مختلف در سراسر دنیا فراهم نمایند و به نظر می‌رسد بازار بسیار مناسبی در کشورهای در حال توسعه در آینده نزدیک خواهند داشت. ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای در مدار پایین قادر خواهند بود که به جمعیت‌های ساکن در عرض جغرافیایی بالا مانند آلاسکا، شمال کانادا، اسکانندیناوی و روسیه، که فاقد زیرساخت‌های زمینی هستند و همچنین خارج ناحیه پوشش ماهواره‌های GEO هستند، ارائه خدمات نمایند که تحول بسیار مهمی خواهد بود. منظومه‌های ماهواره‌ای کاربردهای متنوعی دارند. منظومه‌های ماهواره‌ای موجود برای کاربردهای موقعیت‌یابی، پخش سراسری، کاربرد پایش و کاربرد ارتباطات دو طرفه به کار می‌روند. مهم‌ترین منظومه‌های ارتباطی دو طرفه منظومه‌های اینمارست، گلوبال استار، ایریدیوم، O3B، منظومه ارب‌کام، ست‌کام، وی‌است و ثریا می‌باشند. این هشت منظومه پیش از رقابت گسترده ابرمنظومه‌ها در سال‌های اخیر، طراحی و به کارگیری شده‌اند. تاریخچه منظومه‌های ماهواره‌ای بسیار پر افت و خیز بوده است. در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ میلادی دو شرکت ایریدیوم و گلوبال استار اقدام به برنامه‌ریزی گسترده برای ارائه خدمات مخابراتی نظیر ارتباطات صوتی از منظومه‌ای با بیش از ۱۰۰ ماهواره نمودند، ولی این طرح‌ها پس از چندین پرتاب موفق در نهایت از لحاظ برآوردهای مالی با شکست مواجه شد. هر دو شرکت به این نتیجه رسیدند که هزینه‌های ارسال و نگهداری ماهواره در مدار، بسیار بالاتر از درآمدهای احتمالی منظومه‌ها خواهد بود. در نهایت این دو شرکت با حفظ

ماهواره‌های خود در مدار، طرح‌های توسعه و جایگزینی آن‌ها را کنار گذاشتند. در حال حاضر ایریدیوم با ۶۶ ماهواره و گلوبال استار با ۴۸ ماهواره در مدار LEO حضور دارند و سهم ناچیزی از بازار ارتباطات مخابراتی را در اختیار دارند.

پس از این دو منظومه، منظومه‌های O3B با ۲۰ ماهواره در مدار MEO و ارب‌کام با ۱۷ ماهواره در مدار LEO نیز برای کاربران دریایی و نقاط دور افتاده، خدمات دو طرفه را برقرار نمودند. علاوه بر آن، منظومه‌های ثریا، اینمارست، ست‌کام و ویاست نیز هر کدام با سه یا چهار ماهواره در مدار GEO حضور دارند و عمدتاً خدمات صوت یا ارتباطات ماشین به ماشین (M2M) را برقرار می‌نمایند. باتوجه به تاخیر بالای منظومه‌های GEO و نرخ داده پایین، این منظومه‌ها در مکان‌هایی که هیچ ارتباط زمینی برقرار نیست کاربرد دارند.

باتوجه به کاهش هزینه‌های تولید و پرتاب ماهواره، ایده ابرمنظومه‌ها در عصر فضایی جدید و از سال ۲۰۱۵ مطرح شد. این فناوری با هزاران ماهواره در مدار ارتفاع پایین LEO امکان ارائه سرویس پهن‌بند را برای کاربران زمینی با نرخ داده مناسب و تاخیر کم را فراهم می‌نماید. با طرح این ایده توسط شرکت وان‌وب، شرکت‌های دیگری نظیر Space X نیز به رقابت برای کسب بازار اینترنت ماهواره‌ای پرداختند. در سال ۲۰۲۱ بیش از ۳۰ شرکت از سراسر دنیا قصد دارند ایده منظومه ماهواره‌ای برای ارائه سرویس اینترنت را در سال‌های آتی پیگیری نمایند. در حال حاضر حدود ۲۰۰۰ ماهواره از انواع مختلف فعال (GSO, Non-GSO) در مدار زمین وجود دارد. این در حالی است که فقط دو شرکت وان‌وب در فاز اولیه خود بیش از ۶۰۰، ماهواره استارلینک Space X در حدود ۱۲۰۰۰ ماهواره به فضا پرتاب خواهد نمود. این شرکت‌ها تعداد ماهواره‌های خود را چهار برابر افزایش خواهند داد که نسل جدیدی از ارتباطات ماهواره‌ای را رقم خواهد زد. پس از پیشگامی این دو شرکت، ده شرکت دیگر از چین، کانادا و اروپا اقدام به اخذ مجوز برای ابرمنظومه نموده‌اند. سرعت‌های ارتباطی نسل نوین ابرمنظومه‌ها بسیار بیشتر از سرعت‌های منظومه‌های موجود فعلی است. در حالی که اینمارست و ایریدیوم سرعت‌های در حدود ۵۰۰ کیلو بیت بر ثانیه را ارائه می‌نمایند، منظومه وان‌وب یک جریان ویدئو هم‌زمان با سرعت ۴۰۰ مگابیت بر ثانیه را آزمایش نموده است. در حال حاضر منظومه استارلینک Space X سرعت ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه را در نقاط مختلف آمریکا حتی در شرایط ابری و بارانی ارائه می‌نماید. طبق اعلام این شرکت با تکمیل منظومه امکان ارائه سرویس با سرعت ۲۰۰ مگابیتی برای کاربران فراهم خواهد شد. منظومه استارلینک Space X در بعضی مراجع ادعای دسترسی به سرعت ۱ گیگابیت بر ثانیه را برای کاربران اعلام نموده است.

۲-۱- منظومه استارلینک

پروژه استارلینک با هدف ایجاد پهنای باند کافی برای پشتیبانی از ۵۰٪ ترافیک بک‌هال و ۱۰٪ ترافیک اینترنت در مناطق پرجمعیت دنبال می‌شود. در این پروژه در طی دو فاز، در مجموع نزدیک به ۱۲۰۰۰ ماهواره تا اواسط سال ۲۰۲۷ در مدار قرار می‌گیرد. علاوه بر ۱۲۰۰۰ ماهواره قبلی، شرکت درخواست خود را برای تخصیص طیف فرکانسی به منظور قرار دادن ۳۰۰۰۰ ماهواره دیگر در مدار برای اتحادیه جهانی مخابرات ITU ارسال کرده است. با در نظر گرفتن درخواست قبلی شرکت، در نهایت تعداد کل ماهواره‌های این منظومه در آینده به تعداد ۴۲۰۰۰ ماهواره افزایش خواهد

یافت و عملاً تبدیل به یک ابرمنظومه خواهد شد [۲۰]. ۱۲۰۰۰ ماهواره ابتدایی در دو ارتفاع حدود ۳۰۰ کیلومتر و ۵۰۰ کیلومتر قرار می‌گیرد. نزدیک به ۴۵۰۰ ماهواره در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری، و حدود ۷۵۰۰ ماهواره در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری در باند Ku و Ka قرار می‌گیرند.

نوع ماهواره‌های منظومه استارلینک از کلاس ماهواره‌های کوچک بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم می‌باشند. ماهواره‌های این منظومه در پرتاب‌های مختلف، دقیقاً مشابه یکدیگر نیستند و تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. ماهواره‌هایی که در پرتاب‌های سال ۲۰۱۹ استفاده شده‌اند، دارای وزن ۲۲۷ کیلوگرم بوده‌اند. بر طبق فایلینگ Space X ماهواره‌ها دارای لینک اپتیکی، آنتن‌های آرایه فازی و تکنولوژی پردازش در باند Ku و Ka بودند. ماهواره‌هایی که تا ژوئن ۲۰۲۰ پرتاب شده‌اند فاقد لینک اپتیکی بوده‌اند. بر طبق اطلاعات ارائه شده، ماهواره‌های با لینک اپتیکی، از سال ۲۰۲۱ در مدار قرار گرفته‌اند. ماهواره‌هایی که در نوامبر ۲۰۱۹ در مدار قرار گرفت علاوه بر ویژگی‌های جدید نسبت به قبل مجهز به فناوری باند Ka نیز شد.

در منظومه استارلینک که نمایی از ماهواره آن در شکل (۱) نشان داده شده است، ماهواره‌ها کاملاً تخت هستند. این ساختارهای تخت هر کدام مجهز به چندین پنل آرایه فازی مسطح و لینک‌های اپتیکی هستند. هر ماهواره دارای چهار آنتن آرایه فازی دو عدد برای ارتباط با ایستگاه زمینی و دو عدد برای ارتباط با کاربر در نظر گرفته شده است. یکی از هر دو آنتن به‌عنوان پشتیبان است. این ساختار مسطح هر کدام وزنی در حدود ۲۰۰ کیلوگرم دارند. شرکت Space X سه نوع دریافت کننده زمینی دارد که عبارتند از ایستگاه‌های فرمان و کنترل TT&C، دروازه‌های زمینی و ترمینال کاربر نهایی. ایستگاه‌های TT&C در تمام کره زمین پراکنده شده‌اند و آنتن‌های آن از نوع رفلکتور و در حدود ۵ متر قطر دارد. ترمینال زمینی (دروازه) و آنتن کاربر نهایی هر دو از نوع آنتن‌های آرایه فازی می‌باشند. هر آنتن چه برای کاربر و چه برای ایستگاه زمینی (دروازه) برای ارسال و دریافت استفاده می‌شود. تعداد دروازه‌های زمینی Space X در حدود ۱۲۰ دروازه در سراسر کره زمین خواهد بود. همان‌طور که پیش از این عنوان شد باند فرکانسی Ka برای ارتباط ماهواره با دروازه‌های زمینی در نظر گرفته شده است.

در ماهواره‌های استارلینک باند فرکانسی Ka برای ارتباط ماهواره با ایستگاه‌های زمینی (دروازه) در نظر گرفته شده است. جدول (۱) نحوه برقراری ارتباط با کاربر و با ایستگاه زمینی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این منظومه برقراری ارتباط با کاربر و ایستگاه زمینی با آنتن چند پرتویی برقرار می‌شود. تعداد پرتوهای سمت دروازه زمینی ۹ پرتو (Beam) و سمت کاربر ۸ پرتو می‌باشد. قابلیت چرخش پرتو روی زمین و جابه‌جایی پرتو (Beam Steerable) برای سمت کاربر و دروازه زمینی وجود دارد ولی در مورد شکل‌دهی پرتو (Beam Forming) و تغییر پوشش دهی آنتن برای سمت کاربر امکان‌پذیر است. اما برای سمت دروازه امکان‌پذیر نیست. پوشش دروازه به علت بالا بردن نرخ داده برای جابه‌جایی حجم زیادی از داده در زمان رویت ایستگاه زمینی کاهش یافته است ولی چون نرخ داده سمت کاربر کمتر از سمت دروازه است، منطقه پوشش افزایش یافته است. تفاوت نرخ داده سمت کاربر و دروازه در جدول (۱) ارائه شده است. بهره آنتن و اطلاعات تکمیلی بودجه لینک در جدول (۲) آورده شده است [۴].

جدول ۱: نحوه برقراری ارتباط در منظومه استارلینک [۴].

Downlink/User	Downlink/Gateway	
8	9	تعداد پرتو
بله	بله	قابلیت چرخش
بله	خیر	قابلیت شکل دهی
2800 km ²	780km ²	پوشش هر پرتو
250 MHz	250 MHz	پهنای باند
36.7 dBW	39.44 dBW	EIRP
RHCP	R/LHCP	پلاریزاسیون

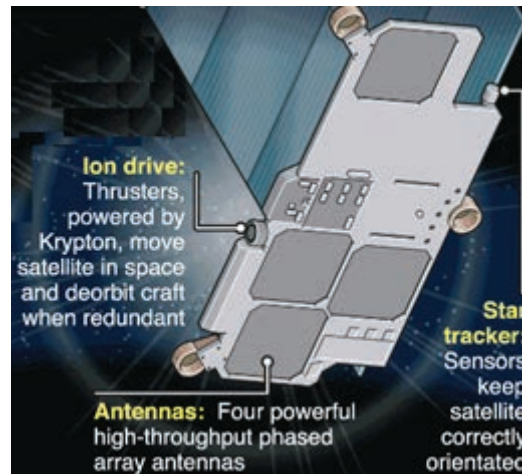
جدول ۲: خلاصه کانال‌های مورد استفاده در منظومه استارلینک [۴].

پهنای باند کانال	تعداد کانال	ضریب استفاده دوباره	کل پهنای باند	
250 MHz	8	4-5	2000 MHz	Downlink/User
125MHz	4	4-5	500 MHz	Downlink/User
250MHz	9	1	2250 MHz	Downlink/Gateway
500MHz	8	1	4000 MHz	Uplink /Gateway
-----	-----	-----	150 MHz	Downlink /TTC
-----	-----	-----	150 MHz	Uplink /TTC

جدول ۳: بودجه لینک ماهواره استارلینک با کاربر زمینی و ایستگاه‌ها زمینی (دروازه) [۴].

User	Gateway	پارامتر
13.5 GHz	28.5 GHz	فرکانس*
250 MHz (downlink)	500 MHz (uplink)	پهنای باند*
	3.5 Meter	قطر آنتن فرستنده ایستگاه زمینی*
37.7 dBi	40.9 dBi	بهره آنتن گیرنده ایستگاهی زمینی*
16 APSK	256 APSK	نوع مدولاسیون
36.7 dBW	68.4 dBW	EIRP
1684 Km	1684 Km	فاصله مسیر
40°	40°	زاویه ارتفاع*
179.6 dB	186.4 dB	تضعیف فضای آزاد ^۱
0.53 dB	2.9 dB	تلفات اتمسفر
674.3 Mbps	2682.1 Mbps	نرخ داده

می‌شود. طبق اعلان شرکت به زودی کاربرانی در انگلیس از اینترنت استارلینک استفاده خواهند کرد. فروش فعلی بسیار محدود است و به صورت اولویت ثبت نام صورت می‌پذیرد. اکثر کاربران فعلی رضایت بسیار بالایی از سامانه داشته‌اند و سرعت

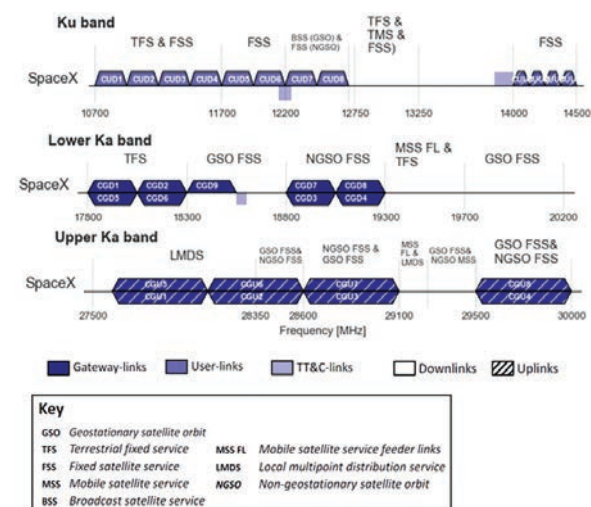


شکل ۱: شمایی از ماهواره استارلینک [۲].

بر اساس اطلاعات موجود از شرکت Space X، فرکانس‌های کاربران در محدوده باند Ku و دارای هم‌پوشانی با باندهای FSS است. همچنین فرکانس‌های ایستگاه‌های زمینی در دو بخش از باند Ka قرار دارد. شرح کامل فرکانس‌های Space X در جدول (۲) نشان داده شده است. کل پهنای باند و تفکیک کانال‌ها در باند فرکانسی در شکل (۲) آورده شده است [۵]. در جدول (۴) بودجه لینک برای ارتباط ماهواره‌های استارلینک با ایستگاه‌های زمینی و کاربران آورده شده است. پارامترهای ستاره‌دار در جدول بر اساس اطلاعات ثبت شده Space X در FCC، کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا تعیین شده‌اند. سایر پارامترها بر اساس ارزیابی‌های موجود در مرجع [۴] تعیین شده‌اند.

آنتن کاربر زمینی Space X یک آنتن بازتابی به منظور تنظیم خودکار زاویه به سمت مورد نظر در آسمان می‌باشند و به نظر می‌رسد، سامانه زمینی دارای هدایت هم‌زمان الکتریکی و مکانیکی است. در حالی که منظومه ماهواره‌های استارلینک Space X به اندازه نهایی پیش‌بینی شده‌اش نزدیک نیست، اما این شرکت به اندازه‌ای کافی ماهواره در مدار پایین زمین دارد که بخواهد سرویس خود را به صورت آزمایشی محدود با نام «بتا بهتر از هیچی» راه‌اندازی نماید [۷].

در سال ۲۰۲۱ شرکت بیش از ده هزار کاربر در آمریکای شمالی داشته و البته به سرعت بر تعداد کاربران این منظومه افزوده



شکل ۲: فرکانس‌های مورد استفاده در منظومه استارلینک [۴].

۱۰۰ مگابیت بر ثانیه را در نقاط مختلف آمریکا حتی در شرایط ابری و بارانی دریافت کرده‌اند. شرکت اعلام نموده است که تا اواسط سال ۲۰۲۱ با افزایش تعداد ماهواره‌ها سرعت ۲۰۰ مگابیتی برای کاربران فراهم خواهد شد. البته اهداف شرکت سرعت‌های بالای ۱ گیگابیت در زمان تکمیل منظومه است. هزینه اشتراک ماهانه سرویس ۹۹ دلار و هزینه تجهیزات ۴۹۹ دلار می‌باشد. البته برخی تخمین‌ها نشان می‌دهد، هزینه‌های Space X برای منظومه به مراتب بالاتر از هزینه اشتراک ماهیانه بوده است و احتمالاً قیمت اعلام شده برای سرعت‌های پایین و کاربران اولیه در نظر گرفته شده است.

۳- پدیده‌های جوی تأثیرگذار بر انتشار امواج ماهواره‌ای

بررسی پدیده‌های تأثیرگذار در انتشار امواج رادیویی بین ماهواره و ایستگاه زمینی در طراحی لینک‌هایی با قابلیت دسترسی مناسب از اهمیت خاصی برخوردار است [۷]. در انتشار امواج ماهواره‌ای در باند Ka و Ku از زمین تا مدار زمین آهنگ پدیده‌های مختلف، سیگنال ارسالی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. لایه یونوسفر اتمسفر برای باندهای مذکور به صورت شفاف است و می‌توان از اثرات انتشاری آن در این باند صرف نظر کرد. لذا در این مقاله پدیده‌های موثر در لایه تروپوسفر و بعضی از مدل‌های پیش‌بینی تضعیف ناشی از این پدیده‌ها بررسی می‌شوند.

۱-۳ اثرات تروپوسفر و مدل‌های پیش‌بینی آنها

در ارتباط با انتشار امواج ماهواره‌ای، تلفات و تضعیف انتشاری تروپوسفر بر روی لینک‌های ماهواره‌ای نسبت به فضای آزاد را می‌توان ناشی از عوامل زیر دانست:

- گازهای اتمسفری
- باران و دیگر نزولات جوی و ابرها
- سینتیلیشن و اثرات چند مسیره
- طوفان‌های شنی و خاکی

هر کدام از چهار عامل ذکر شده تابع فرکانس، موقعیت جغرافیایی و زاویه ارتفاعی می‌باشد. به‌عنوان نمونه در زوایای بالای ۱۰ درجه تنها تضعیف گازها، تضعیف باران و ابر و احتمالاً سینتیلیشن قابل توجه خواهد بود. در ادامه هر کدام از عوامل مذکور مورد بررسی اجمالی قرار خواهند گرفت.

- تضعیف گازهای اتمسفری و مدل پیش‌بینی ITU

تضعیف توسط گازهای اتمسفری که تماماً بوسیله جذب رخ می‌دهد تابع فرکانس، زاویه ارتفاعی، ارتفاع از سطح دریا و چگالی بخار آب (رطوبت مطلق) می‌باشند. در فرکانس‌های پایین‌تر از 10GHz تضعیف توسط گازها بطور معمول نادیده گرفته می‌شود. اهمیت این نوع تضعیف بالای فرکانس‌های 10GHz به ویژه برای زوایای ارتفاعی کم است. در یک فرکانس داده شده، مشارکت اکسیژن در جذب اتمسفری نسبتاً ثابت است. این در حالی است که چگالی بخار آب و پروفایل عمودی آن کاملاً متغیر هستند. به‌عنوان نمونه بیش‌ترین تضعیف گازی در طول فصل با بیش‌ترین مقدار ریزش باران، رخ می‌دهد. در توصیه‌نامه ITU-R P.676 مدلی برای پیش‌بینی تضعیف گازها معرفی شده است [۸].

در این مدل اتمسفر به صورت لایه‌های افقی کوچک تقسیم می‌شود و تضعیف ویژه در هر یک از این لایه‌ها بر حسب رطوبت، دما و فشار هوای آن لایه محاسبه می‌شود. با انتگرال‌گیری بر روی مقادیر تضعیف ویژه این لایه‌ها از سطح زمین تا یک ارتفاع اوج،

تضعیف مسیر عمود (زاویه ارتفاع ۹۰ درجه) را می‌توان به دست آورد که به آن تضعیف اوج گفته می‌شود. فشار جو، دمای هوا و رطوبت در ارتفاعات مختلف اتمسفر برای محاسبه تضعیف ویژه گازها نیاز می‌باشد. در حالت ایده‌آل، اندازه‌گیری این پارامترها در ارتفاعات مختلف اتمسفر توسط رادیوسوند می‌باشد، اما در اکثر مواقع این امر امکان پذیر نمی‌باشد. به جای اندازه‌گیری‌های به دست آمده از رادیوسوند می‌توان از روابطی استفاده کرد که مقادیر دما، فشار و بخار آب در ارتفاعات مختلف جو را با استفاده از مقادیر متناظر این پارامترها روی سطح زمین به صورت تقریبی به دست می‌دهد.

- تضعیف توسط باران و دیگر نزولات جوی و ابرها

مدل‌های بسیاری برای تخمین و پیشگویی تضعیف ناشی از باران در امتداد یک مسیر مایل ارائه شده‌اند [۹]. علاوه بر باران که تأثیرگذارترین پدیده جوی در انتشار امواج ماهواره‌ای است، دیگر ذرات مانند برف و کریستال‌های یخی نیز موجب تضعیف امواج ارسالی می‌شوند. علاوه بر این ابر و مه نیز دارای اثرات تضعیف و دی‌پلاریزاسیون ناشی از عدم تقارن فیزیکی ذرات هستند.

- اثرات هوای صاف

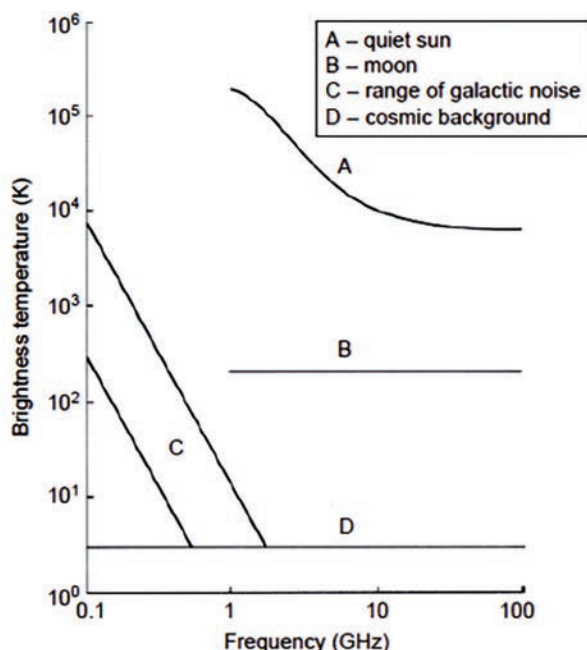
به جز جذب توسط اتمسفر، اثرات هوای صاف در غیاب نزولات جوی معمولاً محوشدگی جدی را برای سیستم‌های مخابرات ماهواره‌ای که در فرکانس‌های پایین‌تر از 10GHz و زوایای ارتفاعی بالای ۱۰ درجه کار می‌کنند، ایجاد نمی‌کند. این در حالی است که برای زوایای کمتر از ۱۰ درجه و فرکانس‌های بالای 10GHz نوسانات تروپوسفری رخ دهنده می‌توانند سبب پایین آمدن کارکرد سیستم شوند. در زوایای ارتفاعی خیلی کم (کمتر از ۴ درجه برای لینک‌های به دور از ساحل و کمتر از ۵ درجه برای لینک‌های روی آب و یا لینک‌های ساحلی) محوشدگی ناشی از اثرات انتشاری چند مسیره، می‌تواند خیلی شدید باشد. در بعضی از مکان‌ها نوسانات یونسفری در فرکانس‌های پایین‌تر از 6GHz می‌تواند مهم باشد [۱۱].

- سینتیلیشن و محوشدگی چند مسیره

دامنه سینتیلیشن (scintillation) ناشی از تروپوسفر به دامنه و ساختار تغییرات ضریب شکست بستگی دارد و با افزایش فرکانس و طول لینک افزایش و با کاهش پهنای باند آنتن کاهش پیدا می‌کند. متوسط ماهیانه r.m.s نوسانات با جمله Nwet انکسار که وابسته به مقدار بخار آب اتمسفر است به خوبی وابسته است. Nwet طی دوره‌هایی از یک ماه و یا طولانی‌تر، از داده‌های هواشناسی به‌دست آمده در سطح، قابل حصول است. در درصد بسیار کمی از زمان و یا بالعکس محوشدگی زیاد (بزرگ‌تر از ۱۰ dB)، در زوایای ارتفاعی خیلی کم مشاهده شد که محوشدگی خیلی جدی‌تر از آن مقداری است که بخاطر سینتیلیشن پیشگویی می‌شود. محوشدگی همچنین مشخصاتی مشابه محوشدگی چند مسیره روی لینک‌های زمینی دارد. مشابه لینک‌های زمینی توزیع برای لینک‌های ماهواره‌ای با زاویه کم با گرادیان انکسار هم بسته است.

- تضعیف حاصل از طوفان‌های شنی و خاکی

اطلاعات در دسترس در مورد تضعیف حاصل از گرد و غبار و شن روی لینک‌های مایل رادیویی، نشان می‌دهد در فرکانس‌های پایین‌تر از 30GHz تنها در صورتی که تمرکز ذرات بالا باشد و یا مقدار رطوبت زیاد باشد، اثرات انتشاری قابل توجه خواهد بود. در فرکانس‌های بالاتر از 30GHz به دلیل اینکه طول موج



شکل ۳: منابع نویز فرازمینی [۹].

استفاده نمی‌شوند. فرکانس مشاهده منابع رادیویی آسمانی، در بیشتر موارد، دمای روشنایی موجود را تعیین می‌کند. تغییرات قابل توجهی در دمای روشنایی با فرکانس برای ستارگان رادیویی و خورشید وجود دارد. علاوه بر این، خورشید یک تغییر دوره‌ای در دمای روشنایی را نشان می‌دهد که تقریباً یک چرخه ۱۱ ساله را دنبال می‌کند. [۹].

با استفاده از روش رادیومتری می‌توان عواملی چون تضعیف، دیپلاریزاسیون و طول اضافی مسیر رادیویی در ارتباطات ماهواره را اندازه‌گیری نمود [۹].

هر جسمی به طور مستمر از خود انرژی الکترومغناطیسی تابش می‌کند. این انرژی بر اساس تغییرات اتمی و مولکولی جسم می‌باشد. ماهیت و شدت این تغییرات به دمای آن جسم بستگی دارد. توزیع انرژی بر روی جسم، انرژی حرارتی در طیف فرکانسی را ارسال می‌کند که با استفاده از مفهوم جسم سیاه و فرضیات تئوری کوانتوم بدست می‌آید [۱۰].

قانون پلانک برای انتشار بیان می‌دارد که برای پیدا کردن روشنایی (B) جسم سیاه تشعشع کننده در دمای T و فرکانس f داریم [۱۱].

$$B = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \quad (1)$$

که در آن h ثابت پلانک، k ثابت بولتزمن و c سرعت نور می‌باشد. روشنایی جسم سیاه فقط تابعی از فرکانس و دما است و تابعی از موقعیت و جهت نمی‌باشد. در فرکانس‌های کم، رابطه (۱) به صورت زیر خلاصه می‌شود،

$$B = \frac{2f^2}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (2)$$

رابطه (۲) به نام رابطه تشعشعی رایلی-جینز شناخته می‌شود [۵].

چگالی شار توان که خودبه‌خود توسط اتمسفر ارسال می‌شود،

میلی‌متری می‌شود لذا اثرات انتشاری بسیار قابل توجه خواهد بود.

- اثرات پلاریزاسیون متقابل

برای افزایش ظرفیت سیستم‌های مخابراتی معمولاً روش استفاده مجدد از فرکانس و بکار بردن دو پلاریزاسیون عمود برهم، قابل استفاده است. این روش بخاطر تبدیل پلاریزاسیون‌ها به یکدیگر با انتشار در طول مسیر، دارای محدودیت است. فرآیندهای مختلف تبدیل پلاریزاسیون در تروپوسفر حائز اهمیت است. چرخش فارادی صفحه پلاریزاسیون ناشی از یونوسفر، در توصیه‌نامه ITU-R P.531. 11 آورده شده است. در 10GHz چرخش فارادی به اندازه ۱ درجه و در فرکانس‌های پایین‌تر چرخش بیشتر خواهد شد. اگر از یک آنتن یکسان برای ارسال و دریافت سیگنال‌های مخابراتی استفاده شود آنگاه از آنجایی که چرخش صفحه پلاریزاسیون برای لینک بالا رونده و پایین رونده در یک جهت خواهد بود، بنابراین نمی‌توان با چرخاندن سیستم تغذیه آنتن، آن را جبران کرد.

- اثرات دیگر

اثراتی که تفاوت ضریب انکسار جو زمین با ضریب انکسار فضای آزاد و همچنین تغییرات آن روی سیگنال دریافتی می‌گذارد، شامل خمش موج و در پی آن تغییر زاویه ارتفاع، تلف ناشی از پهن‌شدگی بیم آنتن (تلف کانونی)، تغییر طول موثر مسیر رادیویی و در نهایت سینتیلیشن می‌باشد. خطاهای زاویه ارتفاعی ناشی از شکست و تغییرات کوتاه مدت زاویه ورود در توصیه‌نامه ITU-R P.834 بحث شده است. این تغییرات کوتاه مدت که ناشی از تغییرات ارتفاعی ضریب شکست می‌باشد، برای زاویه ارتفاعی ۱ درجه خواهد بود. [۶].

روش‌های رادیومتری برای تخمین متوسط تأخیر انتشاری و خطای برد برای لینک‌های زمین به فضا که از تروپوسفر می‌گذرد در [۱۲] قابل دسترس است. واریانس خطا در سیستم‌های دیجیتال ماهواره‌ای جهت تعیین برد ماهواره‌ای و سنکرونسازی لازم است.

-۴- روش‌های اندازه‌گیری پارامترها

برای اندازه‌گیری تأثیر عوامل جوی بر انتشار امواج ماهواره‌ای روال‌های مختلفی وجود دارد. به طور کلی می‌توان گفت سه روش عمده برای این کار وجود دارد [۸].

- اندازه‌گیری با استفاده از روش رادیومتری

- اندازه‌گیری با استفاده از رادار

- اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره

در ادامه هر کدام از روش‌ها بطور مختصر تشریح خواهد شد.

-۱-۴- اندازه‌گیری رادیومتریک

رادیومتر وسیله‌ای برای اندازه‌گیری تغییر در قدرت نویز یا دمای روشنایی یک منبع است. تکنیک اندازه‌گیری برای دهه‌ها در نجوم رادیویی استفاده شده است [۹].

درخشان‌ترین ستاره در کهکشان خودمان، از نظر نویز رادیویی در فرکانس‌های میکروویو، کاسیوپیا A است که با فاصله نزدیک توسط Taurus A و Cygnus A دنبال می‌شود. این نمونه‌ها اساساً منابع نقطه‌ای انرژی رادیویی هستند و به طور گسترده در کالیبراسیون ایستگاه‌های بزرگ زمینی که دارای پهنای پرتو باریکی هستند، استفاده شده‌اند ماه و خورشید نیز ساطع کننده انرژی رادیویی هستند، به ویژه خورشید، اما آنها منابع نقطه‌ای نیستند و به‌طور کلی برای کالیبره کردن تجهیزات ایستگاه زمینی

که در آن T_{mr} دمای میانگین تابشی یا تأثیر جوی و T_0 دمای پس‌زمینه کیهانی (Cosmic background temperature) (معمولاً ۲,۷ درجه کلوین در نظر گرفته می‌شود) می‌باشد.

این رابطه از رابطه انتقال تشعشعی با فرض جذب اتمسفری کم در غیاب پراکندگی استخراج شده است. به طور کلی T_{mr} به فرکانس و تضعیف در فرآیندهای فیزیکی که موجب تضعیف می‌شوند وابسته می‌باشد. این پارامتر را می‌توان برای مقادیر تضعیف زیر ۶ dB در فرکانس‌های زیر 50 GHz، T_{mr} با وابستگی کمی به فرکانس تخمین زد. این مقدار می‌تواند در محدوده فرکانسی ۱۵-۱۰ GHz در حدود ۲۶۵ K و در محدوده فرکانسی ۳۰-۲۰ GHz در حدود ۲۷۰ K تخمین زده شود.

خطاهای اندازه‌گیری در اندازه‌گیری رادیومتری غیر فعال عبارتند از: تأثیرات آنتن، تأثیرات غیر همگن بودن محیط، تأثیرات پراکنده کامل نبودن محیط و تخمین دمای فیزیکی.

۴-۲- اندازه‌گیری با استفاده از رادار

روش بعدی برای اندازه‌گیری میزان تضعیف سیگنال ناشی از پارامترهای جوی استفاده از رادار می‌باشد. بر خلاف دیگر تکنیک‌های اندازه‌گیری، برای اندازه‌گیری یا استنتاج تضعیف مسیر، روش مبتنی بر رادار می‌تواند حجم وسیعی از سایت رادار را، به جای بررسی یک مسیر خاص، بررسی نماید. تغییرات در انرژی دریافت شده و اطلاع از محل دقیق منبع انرژی منعکس شده تلفیقی پیچیده از تأثیرات پراکندگی و تضعیف می‌باشد [۹]. رادار می‌تواند با ارسال امواج الکترومغناطیسی به سمت هدف مورد نظر (مانند توده بارانی) و اندازه‌گیری توان برگشتی به رادار و با دانستن توان ارسالی، تضعیف مسیر عبوری سیگنال را محاسبه کند. استفاده از رادار در اندازه‌گیری تضعیف و دیپلاریزاسیون توده‌های باران و برف می‌تواند کارا باشد و در دیگر منابع تضعیف سیگنال ماهواره‌ای مانند تضعیف ناشی از گازها کاربردی ندارد.

معادله رادار، برد رادار را به مشخصات فرستنده و گیرنده، آنتن، هدف و محیط مربوط می‌سازد. اگر توان فرستنده رادار P_T و آنتن فرستنده با بهره G_T باشد، چگالی شار توان (PFD) در فاصله r از رادار برابر است با توان فرستنده بر مساحت یک کره فرضی به شعاع r و یا [۹].

$$PFD = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (۶)$$

فرض می‌کنیم در نقطه‌ای مانعی با سطح S وجود دارد که توان ارسالی را قطع می‌کند و به صورت ایزوتروپیک انرژی دریافت شده را پراکنده می‌سازد. انرژی برگشتی پراکنده شده و تابش بر روی آنتن را ESC می‌نامیم داریم:

$$E_{sc} = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \times \frac{S}{4\pi r^2} \quad (۷)$$

اگر سطح مؤثر آنتن گیرنده A_e باشد و آنتن مشابهی برای گیرنده و فرستنده استفاده شود و بهره آنتن $(4\pi A)/\lambda^2$ باشد، توان دریافت شده P_R برابر می‌شود با [۸].

$$P_R = \frac{C P_T S}{r^4} \quad (۸)$$

رابطه بالا به معادله رادار معروف می‌باشد. بسیاری از پارامترهای معادله رادار ثابت می‌باشند. که در آن

$$C = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^8} \quad (۹)$$

توسط آنتنی که رو به آسمان است جمع می‌شود، این چگالی شار توان را به عنوان روشنایی اتمسفر می‌شناسند. هدف رادیومتر اندازه‌گیری توان می‌باشد. اگر چه در بیشتر موارد مانند سنجش از راه دور، توان را معادل دما بیان می‌کنند.

رادیومتر میکروویو، انرژی الکترومغناطیسی تشعشعی ناهمدوس (Incoherent) را اندازه‌گیری می‌کند. رادیومترهایی که به سوی آسمان جهت‌دهی شده است انرژی تابشی از گازهای اتمسفر و ذرات آب درون ابر و باران را اندازه‌گیری می‌کنند. این انرژی به فرکانس اندازه‌گیری و مقدار مواد درون اتمسفر بستگی دارد. هر رادیومتر میکروویو شامل یک آنتن گیرنده و یک گیرنده رادیومتر می‌باشد. رادیومتر قسمتی معین از توان در دسترس خروجی آنتن را (با پهنای باند مشخص B) انتخاب می‌کند. این توان تقویت شده (با بهره G) و به قسمت بعدی می‌رود، سپس با یک توان‌سنج ساده با رابطه زیر اندازه‌گیری می‌شود [۶].

$$P = k.B.G.T \quad (۳)$$

که در آن k ثابت بولتزمن می‌باشد.

در دسترس بودن منابع رادیویی در بیرون از اتمسفر اجازه می‌دهد دو نوع اندازه‌گیری رادیومتری به نام‌های اندازه‌گیری فعال و غیر فعال برای اندازه‌گیری تضعیف مسیر ارائه شود.

- اندازه‌گیری رادیومتری فعال

در اندازه‌گیری رادیومتری فعال، از منابع رادیویی طبیعی بیرون از جو برای اندازه‌گیری تضعیف درون اتمسفر استفاده می‌شود. در فرکانس‌های بالای 1 GHz منابع نویز رادیویی خارجی، انرژی کافی را برای اندازه‌گیری فعال رادیومتری ایجاد می‌کنند. رادیومترهایی که به طور خاص حرکت خورشید را دنبال می‌کنند، رادیومترهای Sun-tracking نامیده می‌شوند. یک رادیومتر با پهنای باند کوچک‌تر از اندازه زاویه‌ای خورشید، دمای انتشار T_e را اندازه‌گیری می‌کند.

$$T_e = T_b \times e^{-A/3.34} \quad (۴)$$

که در آن T_b دمای روشنایی خورشید و A تضعیف در طول مسیر به دلیل می‌باشد. متغیر T_e مستقیماً با تغییرات A تغییر می‌کند. مشکل جدی این روش قابلیت به کاربردن تضعیف آماری به دست آمده از روش Sun-tracking به مبحث انتشار امواج مخابرات ماهواره‌ای است. از آنجایی که خورشید منبع ثابتی نیست، آمارهای تضعیف برای زوایای ارتفاع (Elevation) و سمت (Azimuth) مختلف بوده و همچنین در شب داده‌ای وجود نخواهد داشت.

- اندازه‌گیری رادیومتری غیر فعال

در اندازه‌گیری رادیومتری غیرفعال رادیومترها تنها از دمای منتشر شده از محیط واسط برای محاسبه تضعیف محیط استفاده می‌کنند. رادیومترهای غیرفعال مستقل از منابع رادیویی سماوی می‌باشند. رادیومتر غیرفعال می‌تواند در هر مکانی روی زمین مستقر شده و رو به هر نقطه‌ای در فضا جهت‌دهی شود. تخمین تضعیف اتمسفر در مسیر ماهواره به زمین، برای مکانی معین که اطلاعات هواشناسی در آنجا وجود دارد، ضروری می‌باشد. اندازه‌گیری رادیومتری برای به دست آوردن تخمین تضعیف مسیر می‌تواند به کار برده شود. برای تبدیل اندازه‌گیری رادیومتری دمای روشنایی T_b به تضعیف مسیر A رابطه زیر به کار برده می‌شود [۱۴].

$$A = 10 \log \left(\frac{T_{mr} - T_0}{T_{mr} - T_b} \right) \quad (۵)$$

C به عنوان ثابت رادار شناخته می‌شود. معادله رادار فرض می‌کند که کل انرژی برخوردی به سطح S پراکنده می‌شود. در بیشتر موارد جذب انرژی توسط مانع، مخصوصاً برای ذرات باران، صورت می‌گیرد که در آن، محدوده‌ای برای اندازه قطرات وجود دارد که به فاکتور برگشتی مشخصی منجر می‌شود. انرژی برگشتی در مسیر ارسال آنتن تابعی از اندازه مانعی است که پرتو رادار را قطع می‌کند. سطح مقطع راداری یک هدف عبارت است از [۱۴].

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 \quad (10)$$

که در آن R فاصله بین هدف و رادار، E_r شدت میدان برگشتی از هدف روی رادار و E_i شدت میدان تابش به هدف می‌باشد. تئوری پراکندگی میکروویو توسط باران و یا ابر با استفاده از فرض غیر همدوسی پراکندگی حجمی می‌باشد. میانگین توان پراکنده شده سیگنال در این حالت متناسب با سطح مقطع پراکندگی مؤثر در واحد حجم می‌باشد. داریم،

$$\eta = \int_0^\infty \sigma(\lambda, D) \cdot N(D) dD \quad (11)$$

که $N(D)$ توزیع قطرات با قطر D تا $D+dD$ می‌باشد. برای یک قطره کروی باران با قطر D (mm) که در برابر طول موج سیگنال رادار کوچک می‌باشد، سطح مقطع پراکندگی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۵].

$$\sigma = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} \times 10^{-18} D^6 (m^2) \quad (12)$$

که در آن $k = (n^2 - 1)(n^2 + 1)$ ضریب شکست مختلط می‌باشد. مقدار $|k|^2$ برای قطرات آب در حدود ۰٫۹۳ و برای ذرات یخ ۰٫۲۰ می‌باشد. این تفاوت زیاد برای $|k|^2$ برای ذرات مایع و جامد آب بسیار مهم می‌باشد. برای مجموع‌های از قطرات با توزیع اندازه $N(D)$ ، سطح مقطع پراکندگی برای هر واحد حجم η به صورت زیر می‌شود [۱۵].

$$\eta = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} \times 10^{-18} \int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) بخش انتگرالی $\int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD$ فقط به توزیع شکل قطرات در حجمی که توسط رادار تابیده شده بستگی دارد. فاکتور Z، فاکتور بازتاب پذیری (Reflectivity) نامیده می‌شود،

$$Z = \int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD \quad (14)$$

برای بدست آوردن تضعیف α برای مسیر، از انرژی پراکنده شده برگشتی، یا باید توزیع شکل قطرات اندازه‌گیری شود و یا بر اساس پارامترهای آماری فرض شود که در آن Z را به نرخ بارش (R) مرتبط می‌سازد. به طور معمول از رابطه زیر برای ارتباط بین نرخ بارش و بازتاب پذیری استفاده می‌شود.

$$Z = aR^b \quad (15)$$

مقادیر a و b مقادیری تجربی می‌باشند.

۴-۳- اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال بیکن ماهواره

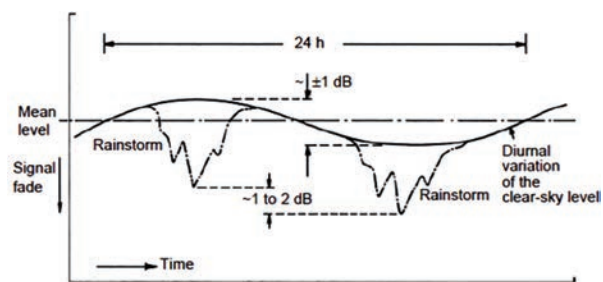
سومین روش اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای اندازه‌گیری سیگنال بیکن (Beacon) ماهواره است. این روش در حال حاضر مؤثرترین و پر کاربردترین روش اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای می‌باشد که در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال بیکن ماهواره‌ای، سیگنالی است مرجع با فرکانس ثابت و توان ثابت، معمولاً مدوله شده نمی‌باشد و توسط ماهواره ارسال می‌شود.

سیگنال بیکن ماهواره به‌طور معمول با یک منبع کریستال فوق‌العاده ثابت ایجاد می‌شود که نویز فاز و اینترمدولاسیون کمی دارد [۹]. این بدان معنی است که بیشتر انرژی در یک پهنای باند باریک در فرکانس مرکزی مورد نظر وجود دارد. از آنجایی که تمامی انرژی سیگنال در نزدیکی فرکانس حامل می‌باشد، گیرنده سیگنال بیکن بر روی زمین با پهنای باند باریکی ساخته می‌شود. بنابراین نویز در گیرنده که با پهنای باند متناسب است، بسیار کم می‌شود [۱۶]. در گیرنده سیگنال بیکن به دلیل اینکه سیگنال دریافتی توان بسیار کمی دارد، پهنای باند بخش IF باید کم باشد. این کار برای دستیابی به رنج دینامیکی زیاد می‌باشد [۱۷].

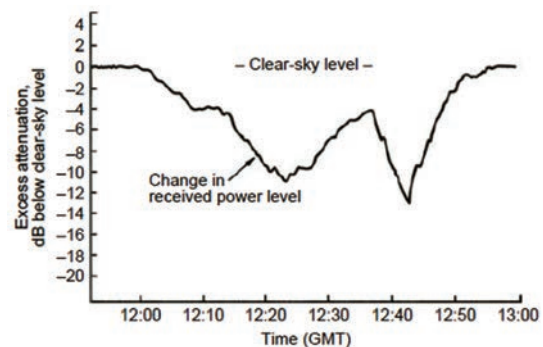
با مشخص بودن تمامی مشخصات سیگنال ارسالی از ماهواره و با دریافت و تحلیل این سیگنال با استفاده از گیرنده‌های اندازه‌گیر این سیگنال در ایستگاه زمینی، می‌توان پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای در شرایط مختلف جوی را بررسی نمود.

در شکل (۲) تغییرات سطح سیگنال بیکن اندازه‌گیری شده در یک نمونه اندازه‌گیری در طول باران نشان داده شده است. تفاوت بین سطح سیگنال در هوای صاف و اتفاق مورد نظر (مثلاً باران)، تضعیف در اتفاق مورد نظر را می‌دهد.

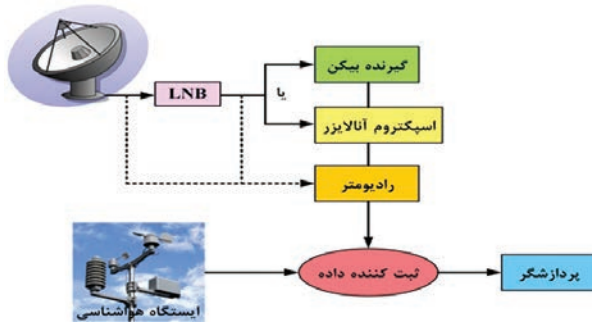
خطاهای بالقوه در اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره عبارتند از: خطاهای ناشی از ماهواره (خطای موقعیت و خطای ناشی از مشخصات ترنسپوندر) و خطاهای ناشی از ایستگاه زمینی (تأثیرات میدان نزدیک و خطاهای از دست دادن قفل حلقه).



شکل ۵: تغییرات روزانه سطح سیگنال بیکن و خطای ناشی از آن [۹].



شکل ۴: تغییرات سطح سیگنال بیکن دریافتی در یک ساعت اندازه‌گیری [۹].



شکل ۶: چیدمان پیشنهادی اندازه‌گیری پارامترهای سیگنال و هواشناسی برای بررسی عوامل مؤثر در انتشار امواج ماهواره ای[۸]

می‌شود تا تأثیرات پارامترهای هواشناسی بر سیگنال ماهواره مشخص و الگوی مناسب انتشار امواج ماهواره‌ای استخراج گردد.

۴- روش اندازه‌گیری پیشنهادی و پیاده‌سازی شده

با در نظر گرفتن سناریوی پیشنهادی شکل (۶)، چیدمان ارائه شده در شکل (۷) در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات پیاده‌سازی شده است. برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن، تجهیزات VSAT در پژوهشگاه نصب شد. چیدمان نصب شده در واقع به‌عنوان یک گره از شبکه VSAT می‌باشد که با اضافه شدن یک تحلیلگر طیف برای اندازه‌گیری در این پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این چیدمان برای اندازه‌گیری در باند Ku می‌باشد. تجهیزات استفاده شده در اندازه‌گیری به صورت زیر می‌باشد:

- آنتن (۱/۸ متری)
- تغذیه آنتن (آنتن شیپوری)
- TRF
- OMT (Transducer Mode Orthogonal)
- BUC (Convertor Up Block)
- LNB (Block Noise Low)
- مودم (VSAT (Antenna Aperture Small Very)
- تحلیلگر طیف

شکل (۷) نحوه اتصال و چیدمان تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. از این چیدمان به دو صورت می‌توان برای اندازه‌گیری اثرات انتشار امواج ماهواره‌ای استفاده کرد:

در روش نخست با دانستن فرکانس سیگنال بیکن ماهواره مورد نظر، اندازه‌گیری دامنه این سیگنال در شرایط مختلف جوی صورت می‌گیرد. در این روش دیگر نیازی به BUC، OMT و TRF نیست و می‌توان این تجهیزات را حذف نمود.

در روش دوم به جای استفاده از سیگنال بیکن ماهواره، یک سیگنال خام به صورت موج پیوسته (CW) از مبدأ ارسال می‌شود. در این حالت ماهواره به صورت یک رله مخابراتی عمل کرده و سیگنال ارسالی را پس از تقویت به سمت زمین ارسال می‌نماید. از این روش می‌توان در اندازه‌گیری نسبی دامنه سیگنال بهره جست. هر چند به دلیل فرکانس ارسال و دریافت متفاوت سیگنال و طی کردن دو مسیر رفت و برگشت در جو، نیازمند دقت عمل بیشتری در تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

باید توجه نمود ماهواره سیگنال ارسالی از سمت آنتن را به

تأثیر نشان داده شده در شکل (۴) تغییرات روزانه یک مسیر ماهواره‌ای می‌باشد. ردیابی دقیق، تغییرات را به طور کامل حذف نمی‌کند و در نتیجه اندازه‌گیری همراه با رادیومتر توصیه می‌شود، زیرا مستقل از سطح میانگین می‌باشد و از تغییرات سیگنال بیکن ماهواره تأثیر نمی‌پذیرد. در اندازه‌گیری سیگنال بیکن، همراه با رادیومتر، سطح مرجع سیگنال در هوای صاف با استفاده از رادیومتر بدست می‌آید.

از دیگر موارد استفاده از سیگنال بیکن، در اندازه‌گیری سینتیلیشن (scintillation) است. سینتیلیشن، ناشی از ناپیوستگی ضریب شکست در اتمسفر می‌باشد که باعث محوشدگی و افزایش تصادفی دامنه سیگنال دریافتی می‌شود. قبل از استفاده از سیگنال بیکن خام اندازه‌گیری شده برای تحقیقات سینتیلیشن، تأثیرات دیگر فاکتورهای انتشاری از این سیگنال خام می‌بایست خارج شود [۱۸]. می‌توان با عبور سیگنال خام بیکن از یک فیلتر بالاگذر با فرکانس قطع مناسب تغییرات ناشی از سینتیلیشن را جدا نمود (تغییرات سیگنال ناشی از دیگر عوامل جوی در نرخ کمتری نسبت به سینتیلیشن انجام می‌پذیرد). اگر مقدار fc (فرکانس قطع بالای فیلتر) کم انتخاب شود موجب تأثیر ناخواسته دیگر تغییرات سیگنال در بررسی سینتیلیشن می‌شود. اگر fc مقدار زیادی داشته باشد، سهم سینتیلیشن در مؤلفه‌های فوریه کمتر از مقدار fc در نظر گرفته نمی‌شود [۱۹].

مورد دیگر استفاده از سیگنال بیکن در اندازه‌گیری دیپلاریزاسیون ناشی از باران و برف در جو است. اگر تضعیف تفاضلی و فاز تفاضلی که توسط محیط انتشار موج ایجاد شده قابل اندازه‌گیری باشد، تمایز پلاریزاسیون متقاطع یا XPD از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۳].

$$XPD = 20 \log \left| \frac{E_{co}}{E_{cross}} \right| \quad (16)$$

می‌توان گفت کامل‌ترین در عین حال کم‌هزینه‌ترین روش اندازه‌گیری دیپلاریزاسیون استفاده از OMT به همراه دو گیرنده سیگنال بیکن می‌باشد.

۵- تجهیزات هواشناسی مورد نیاز

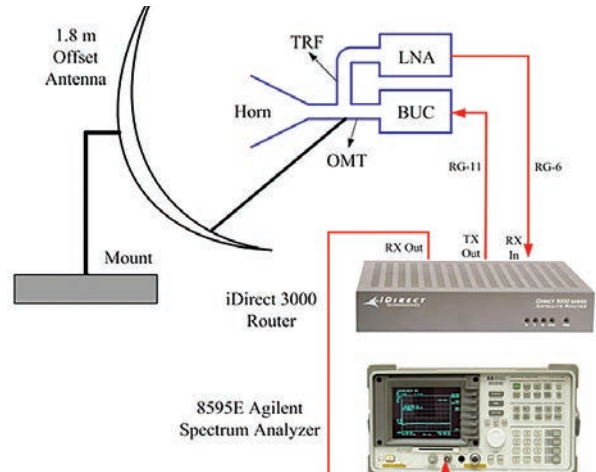
بررسی پدیده‌های انتشار امواج ماهواره‌ای در باندهای Ku و Ka نیازمند دانستن اطلاعات دقیق هواشناسی به‌طور هم‌زمان است. بدون دانستن شرایط جوی در مسیر سیگنال ماهواره‌ای، بررسی مدل‌های موجود و اصلاح و استخراج مدل‌های جدید انتشار امواج ماهواره‌ای امکان‌پذیر نیست. تجهیزات هواشناسی مورد نیاز عبارتند از:

- دماسنج، رطوبت‌سنج و فشارسنج (در سطح و سطوح فوقانی جو)
- باران‌سنج (برف‌سنج، دیسدرومتر و ...)
- دستگاه اندازه‌گیری کننده میدان دید
- رادار هواشناسی و ...

در شکل (۶) چیدمان پیشنهادی اندازه‌گیری هم‌زمان سطحی سیگنال بیکن ماهواره و پارامترهای هواشناسی مورد نیاز نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری سطح سیگنال بیکن، هم از گیرنده سیگنال و هم از تحلیلگر طیف می‌توان استفاده نمود. برای دقت بیشتر و حذف خطای اندازه‌گیری سیگنال بیکن می‌توان از رادیومتر نیز در اندازه‌گیری بهره برد. اطلاعات جمع‌آوری شده از اندازه‌گیری سیگنال و پارامترهای هواشناسی به پردازشگر داده



شکل ۹: چیدمان اندازه‌گیری سیگنال و پارامترهای هواشناسی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات [۸].

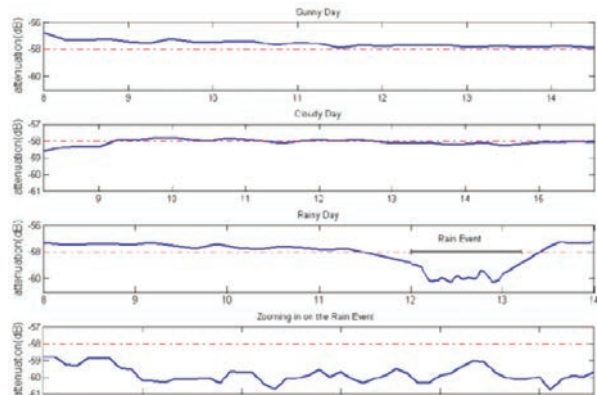


شکل ۷: چیدمان اندازه‌گیری تضعیف سیگنال ماهواره‌ای در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات [۸].

- دماسنج، رطوبت‌سنج و فشارسنج (در سطح و سطوح فوقانی جو)
- باران‌سنج (برف‌سنج، دیسدرومتر و ...)
- دستگاه اندازه‌گیری کننده میزان دید
- رادار هواشناسی و ...

ایستگاه هواشناسی خودکار نصب شده در پژوهشگاه شامل سنسورهای رطوبت، فشار و دما در سطح، باران‌سنج و دستگاه ثبت و ارسال داده‌های هواشناسی می‌باشد. با استفاده از روابط موجود در ITU-R P.618 می‌توان دما، رطوبت و فشار در سطح زمین را با تقریب مناسبی به دما، رطوبت و فشار در تروپوسفر تبدیل نمود. در شکل (۹) تجهیزات اندازه‌گیری سیگنال و پارامترهای هواشناسی که در پژوهشگاه نصب شده‌اند، نشان داده شده است.

از این چیدمان برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره IS-15 در شرایط آب و هوایی مختلف استفاده می‌شود. همچنین در شکل (۱۰) یک نمونه نتایج اندازه‌گیری سطح سیگنال بیکن در سه روز آفتابی، ابری و بارانی با استفاده از چیدمان پیشنهادی نشان داده شده است. در همین راستا اندازه‌گیری‌ها در قالب یک نرم‌افزار شکل (۱۱) انجام شده است که متناسب با هر نوع تضعیف سیگنال، اندازه‌گیری نمایش داده می‌شود.



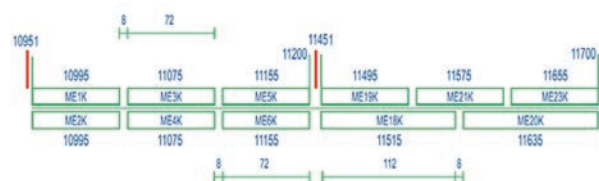
شکل ۱۰: نتایج اندازه‌گیری عملی سیگنال ماهواره در سه روز آفتابی، ابری و بارانی [۸].

صورت خطی تقویت و به سمت زمین ارسال می‌نماید. در صورت بالا بودن توان ارسالی احتمال غیر خطی عمل کردن تقویت توسط ماهواره وجود دارد. برای ارسال سیگنال بدون حامل از امکانات مودم VSAT می‌توان استفاده نمود.

روش دوم در مواقعی که امکان دریافت سیگنال بیکن وجود نداشته باشد و یا دریافت سیگنال در فرکانسی خاص مد نظر باشد، می‌تواند به کار برده شود. در غیر این صورت به دلیل فرکانس ارسال و دریافت متفاوت در دو مسیر رفت و برگشت، استفاده از این روش با خطا و ملاحظات بیشتری همراه می‌باشد که برای اندازه‌گیری سیگنال توصیه نمی‌شود.

با توجه به روش پیشنهادی، برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن از ماهواره INTELSAT 15 (IS-15) واقع در مدار ۸۵/۱۵ درجه شرقی استفاده شده است. این ماهواره برای سرویس داده و تصویر در باند Ku در نواحی خاورمیانه، اقیانوس هند و روسیه توسط شرکت Intelsat ساخته شده است. این ماهواره از انواع ماهواره‌های سه محوره بوده و شامل دو بازتاب‌دهنده ۲/۳ متری و یک بازتاب‌دهنده ۱/۴ متری می‌باشد. این ماهواره در سال ۲۰۰۹ میلادی از ایستگاه بایکونور قزاقستان به مدار ثابت زمینی ارسال شده است. ماهواره IS-15 دارای دو سیگنال بیکن در باند Ku در دو فرکانس ۱۰/۹۵۱ GHz و ۱۱/۴۵۱ GHz می‌باشد. در شکل ۸ پلن فرکانسی ترنسپوندر ماهواره IS-15 در مسیر downlink به همراه دو سیگنال بیکن این ماهواره نشان داده شده است.

برای استخراج الگوی انتشار امواج ماهواره‌ای، در کنار تجهیزات دریافت سیگنال نیاز به تجهیزات هواشناسی نیز است. تجهیزات مورد نیاز عبارتند از:



شکل ۸: پلن فرکانسی ترنسپوندر ماهواره IS-15 در مسیر downlink [۸].

فناوری اطلاعات انجام شده است.

مراجع

- [1] Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2020/04/coronavirus-covid-19-pandemic-digital-divide-internet-data-broadband-mobbile/>
- [2] <https://www.graphicnews.com/en/pages/40637/space-spacex-starlink-enters-beta-phase>
- [3] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/oneweb>
- [4] del Portillo, Inigo, Bruce G. Cameron, and Edward F. Crawley. "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband." Acta Astronautica, 2019, pp. 123-135.
- [5] "Musk said that Starship Starship will take over Starlink and replace the role of Falcon 9" Minnews, 2021, URL: <https://www.spacex.com/>
- [6] https://www.teslarati.com/spacex-custom-built-starlink-satellite-antenna-patent-grant/phased_array_radiation_pattern/
- [7] رضا بحری و تیم تحقیقاتی پروژه، "بررسی عوامل موثر بر انتشار امواج ماهواره‌ای .."، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشکده فناوری ارتباطات، گروه رادیو، ۱۳۹۱.
- [8] رضا بحری و تیم تحقیقاتی پروژه، "بررسی روش‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای تضعیف سیگنال و هواشناسی ..."، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشکده فناوری ارتباطات، گروه رادیو، ۱۳۹۱.
- [9] Allnutt, J. E., Satellite-to-ground radiowave propagation, IEE Electromagnetic Waves Series 29, Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [10] Recommendation and Reports for CCIR, XVth Plenary Assembly, 1986, Vol. V; Report 702-1: Radio emission from natural sources in the frequency range above about 50 MHz.
- [11] Chukhlantsev, A. A., Microwave Radiometry of Vegetation Canopies, Springer-Verlag New York Inc., 2006.
- [12] Skou, N., and D. L. Vine, Microwave Radiometer Systems; Design and Analysis, 2ed Edition, Artech House, 2006.
- [13] Recommendation ITU-R P.1322, "Radiometric estimation of atmospheric attenuation," 1997.
- [14] Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill (International Editions: Electrical Engineering Series), 3rd Edition, 2001.
- [15] Hall, M. P. M., Effects of troposphere on radio communications, PeterPerigrinus, 1979.
- [16] Gardner, F. M., Phaselock Techniques, John Willey & Sons, 1966.
- [17] Allnutt, J. E., and J. E. Goodyer, "Design of receiving stations for satellite to ground propagation research at frequency above 10 GHz," IEE J. Microwaves, Optic & acoustics, Vol. 1, 1977, pp.157-164.
- [18] Howel, R. G., Harris, J. W., and Mehler, M., "Satellite copular measurements at BT laboratories," By Tech. J., Oct. 1992, 10, pp.34-51
- [19] Otung, I. E., M. O. Al-Nuaimi, and B.G Evans, "Extracting Scintillations from Satellite Beacon Propagation Data," IEEE Trans. Antenna Propagat. Vol.46, 1998, pp. 1580-1581.
- [20] <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>



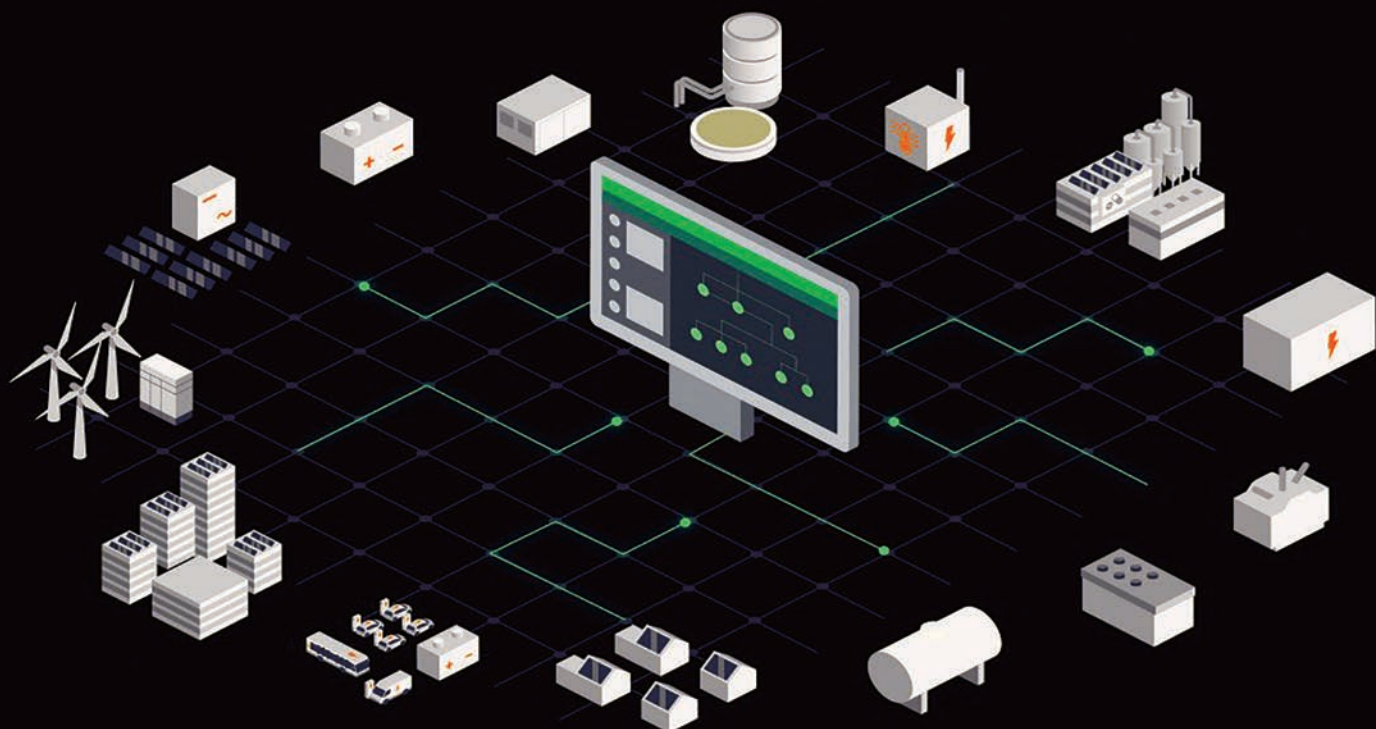
شکل ۱۱: نرم افزار بومی سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای [۸].

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه ارتباطات ماهواره‌ای و عملیاتی شدن ابرمنظومه‌ها به صورت منطقه‌ای و در آینده نزدیک جهانی، موضوع بومی‌سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای در باندهای فرکانسی Ku و Ka برای برقراری یک ارتباط پایدار و مطمئن از اهمیت روز افزونی نسبت به گذشته برخوردار خواهد بود. در این مقاله ضمن معرفی اجمالی ابرمنظومه‌های ماهواره‌ای و تاریخچه مختصر آن، به موضوع پدیده‌های جوی تاثیرگذار در انتشار امواج پرداخته شد. برای موضوع اندازه‌گیری سیگنال، روش‌های اندازه‌گیری رادیومتری، راداری و سیگنال بیکن شناسایی و معرفی شدند. امروزه استفاده از رادار برای اندازه‌گیری میزان تضعیف ناشی از پدیده‌های جوی، به علت عدم دقت کاربرد زیادی نداشته و از رادار فقط برای اندازه‌گیری تاثیرات توده‌های بارانی استفاده می‌شود. استفاده از رادیومتر امروزه کمتر شده و بیشتر در اندازه‌گیری تضعیف ناشی از گازها و میزان تأخیر سیگنال عبوری از تروپوسفر استفاده می‌شود. امروزه از رادیومتر به عنوان سیگنال مرجع در هوای صاف و در کنار گیرنده سیگنال بیکن ماهواره استفاده می‌شود. بر اساس بررسی‌ها و مطالعات انجام شده، استفاده از اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره در اولویت می‌باشد. با دانستن مشخصات دقیق سیگنال بیکن ارسالی از ماهواره می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری تغییرات سیگنال ماهواره‌ای در شرایط مختلف جوی را استفاده نمود. ضمن معرفی چیدمان پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات برای بومی‌سازی پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای، چیدمان پیشنهادی برای اندازه‌گیری سیگنال بیکن ماهواره به همراه سامانه اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی معرفی شد. در انتها نیز نمونه اندازه‌گیری برای سه روز آفتابی، ابری و بارانی ارائه شد. نمایی از نرم‌افزار اندازه‌گیری پارامترهای انتشار امواج ماهواره‌ای نشان داده شد.

سپاسگزاری

این پروژه تحت حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه ارتباطات و



مقاله علمی-ترویجی

تاب‌آوری ریز شبکه‌ها: چالش‌ها، معیارهای ارزیابی و روش‌های بهبود

■ سعید جعفرپور^{*}، دانشگاه شاهد، Saeid.jafarpour@shahed.ac.ir

■ سید محمد صادق‌زاده، دانشگاه شاهد، Sadeghzadeh@shahed.ac.ir

■ محمد حسن امیریون، دانشگاه اصفهان، M.h.amirioun@shr.ui.ac.ir

^{*} نویسنده مسئول

چکیده

وقوع روزافزون رخدادهای طبیعی شدید در سال‌های گذشته در نقاط مختلف دنیا، توجه بهره‌برداران سیستم قدرت را به این گونه پدیده‌ها و اثرات آن بر روی سیستم قدرت برانگیخته است. بررسی گزارش‌های در دسترس وقوع حوادث نشان می‌دهد که پدیده‌های طبیعی شدید می‌توانند بخش قابل توجهی از سیستم قدرت را در خاموشی فرو ببرند و باعث اختلال در روند عادی زندگی مردم بشوند. پژوهشگران برای تحلیل رفتار سیستم قدرت در مقابل حوادث شدید و نادر، به تازگی مفهوم تاب‌آوری سیستم‌های قدرت را معرفی نموده‌اند. در این کار پژوهشی ابتدا با مرور انواع حوادث تهدیدکننده سیستم قدرت، اثرات این پدیده‌ها بر سیستم قدرت بررسی می‌شود. در بخش بعد مفاهیم و عناصر پایه‌ای تاب‌آوری سیستم قدرت بیان می‌شود. سپس با مرور کارهای پژوهشی انجام شده در این زمینه انواع معیارهای آرایه شده برای ارزیابی تاب‌آوری معرفی و مقایسه می‌شوند. در پایان انواع رویکردهای آرایه شده برای بهبود تاب‌آوری شرح داده می‌شود.

کلمات کلیدی: حوادث نادر و شدید، تاب‌آوری، معیارهای ارزیابی تاب‌آوری، روش‌های بهبود تاب‌آوری، ریز شبکه.

Microgrids Resilience: Challenges, Metrics, and Improvement Methods

■ Saeid Jafarpour^{*}, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, saeid.jafarpour@shahed.ac.ir

■ Seyed Mohammad Sadeghzadeh, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, sadeghzadeh@shahed.ac.ir

■ Mohammad Hassan Amirioun, Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran, m.h.amirioun@shr.ui.ac.ir

^{*}Corresponding Author

Abstract

Recently, the ever-increasing occurrence rate of high-impact rare (HR) natural events has attracted the attention of researchers to the effects of such incidents on power systems. Examination of available data shows that HR events have the potential to shut down a significant part of the power system and disrupt the routine life of customers. To analyze the power system behavior in the face of HR events, researchers introduced the concept of power system resiliency. Reviewing HR event types threatening Microgrids, the effects of these incidents

are investigated. Then, the basic concepts and elements of resilience are discussed. Presenting a state-of-the-art review of the literature, resilience-assessment metrics are discussed and compared. Finally, resilience-improving measures for Microgrids are described. Conclusive remarks are given as well.

Keywords: Microgrid, extreme weather events, resilience, resilience metrics, resilience improvement measures.

۱- مقدمه

در شبکه‌های برق، هرروزه تجهیزات متعددی از واحدهای تولید برق گرفته تا فیدرهای فشار ضعیف توزیع برق به دلایل گوناگونی از مدار خارج می‌شوند و پس از تعمیر مجدداً وارد مدار می‌گردند. با این وجود به دلیل لحاظ نمودن افزونگی در طراحی سامانه‌های زیرساختی مهندسی، برق‌رسانی به مشترکین عموماً در این شرایط تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. گاهی هم حوادث طبیعی و یا انسانی شدیدی در نقطه‌ای از جهان گزارش می‌شوند که اثرات به مراتب شدیدتر و گسترده‌تری را به جا می‌گذارد و بخش اعظمی از ساکنین آن منطقه را با مشکل و خاموشی مواجه می‌سازد. به ندرت هم حوادث تجربه نشده‌ای رخ می‌دهد که در سوابق گذشته آن منطقه هیچ رد پایی از آن موجود نیست. از دیدگاه احتمال وقوع، طبق شکل (۱) حوادث را می‌توان برحسب شدت اثرگذاری و احتمال وقوع به سه دسته حوادث شناخته‌شده، حوادث شناخته نشده‌ای قوی خاکستری و حوادث غیرقابل شناسایی یا قوی مشکی تفکیک نمود. حوادث شناخته‌شده احتمال وقوع مشخص دارند و اثرات آن‌ها نیز محدود بوده و به راحتی قابل برآورد است. برای مثال در یک شبکه برق، نرخ خروج اضطراری یک واحد تولید مشخص بوده و به صورت سالیانه به‌روزرسانی می‌شود. حوادث شناخته‌نشده به ندرت رخ می‌دهند و به همین دلیل پایگاه داده غنی از این حوادث موجود نیست که بتوان مقادیری برای تابع توزیع احتمال وقوع آن‌ها استخراج نمود. اما، عواقب وقوع این حوادث به دلیل تجربه رخدادهای مشابه قبلی تا حدی قابل برآورد است (برای مثال، وقوع یک طوفان با یک سرعت معین)؛ بنابراین می‌توان این‌گونه جمع بندی کرد که این حوادث نادر، شدید و تا حدی قابل پیش‌بینی هستند. نوع اول حوادث که احتمال وقوع زیاد و تخریب کمی دارد به صورت مکرر در اثر فرسایش، خستگی و استهلاک و در قالب خرابی تجهیزات و اشتباهات انسانی اتفاق می‌افتد که در این راستا روش‌های مختلف و متنوعی تحت عنوان مطالعات قابلیت اطمینان برای مقابله با این موارد توسعه یافته است. نوع دوم حوادث که عموماً نرخ رخداد پایینی دارند حوادث نادر و شدید نامیده می‌شوند. این نوع حوادث به‌طور معمول اثرات بسیار مخربی بر روی زیر ساخت‌ها، خصوصاً شبکه‌های برق می‌گذارند. [۱]، [۲]



شکل ۱: طبقه‌بندی حوادث بر اساس نحوه شناخت پیامدها و احتمالات مربوطه [۳]
توسعه انسانی و صنعتی و به تبع آن انتشار مضاعف گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر موجب افزایش میانگین دمای کره

زمین تا ۱.۵ درجه سانتی‌گراد شده است. در این راستا اخیراً تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی سبب بالا رفتن نرخ وقوع پدیده‌های آب و هوایی نادر و شدید شده است [۴]. برای مثال طوفان کم سابقه‌ای در تاریخ ۱۳۹۳/۰۳/۱۲ شهر تهران را درنوردید که موجب پیامدهای مختلفی از جمله سقوط بسیاری از درختان، پارگی سیم‌های مخابراتی و قطع تعدادی از خطوط برق شد. طبق گزارش مقامات رسمی شرکت توزیع برق تهران بر اثر این طوفان ۶۵ خط ۲۰ کیلوولت دچار قطعی شد که موجب قطعی برق حدود ۵۰۰۰ مشترک در نواحی جنوب غربی و غرب شهر گردید [۵]. [۶] در مورد دیگر طوفان سندی که از آن به‌عنوان پرهزینه‌ترین طوفان تاریخ آمریکا یاد می‌شود باعث ایجاد خسارت ۷۰ میلیارد دلاری بر زیر ساخت ایالات متحده شد. این طوفان سبب قطعی برق ۸.۵ میلیون نفر شد که حدوداً ۱۰ روز طول کشید تا شبکه برق به صورت ۹۵ درصدی بازیابی^۱ شود. در موردی مشابه در فوریه سال ۲۰۲۱ طوفان زمستانی بخش‌های وسیعی از تگزاس را در دمای زیر صفر فرو برد که زیرساخت‌های برق این ایالت را تحت تأثیر قرار داد و باعث قطعی برق گسترده شد. به دلیل این که تقریباً نیمی از کل ظرفیت تولید برق شبکه اصلی برق دولتی از مدار خارج شده بودند، در اوج بحران نزدیک به ۴۵ میلیون خانه و مرکز تجاری تگزاس چندین روز بدون برق شدند [۷]. با توجه به سوابق موجود که نشان می‌دهد احتمال وقوع این دست از حوادث افزایش پیدا کرده است لزوم آمادگی و مطالعه روش‌های مقابله و کاهش اثرات این حوادث هر چه بیشتر از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این راستا به‌تازگی مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت مطرح شده است.

۲- مفهوم تاب‌آوری^۲

تاب‌آوری از نظر ریشه‌شناسی از کلمه لاتین "Resilio" گرفته شده و به توانایی یک سیستم برای پیش‌بینی و مقاومت در برابر تنش‌های خارجی، بازگشت به حالت قبل از تنش خود در سریع‌ترین زمان ممکن و سازگاری برای آمادگی بهتر برای رویدادهای فاجعه بار آینده اشاره می‌کند. این مفهوم به طور گسترده در علوم مختلف جامعه‌شناسی، محیط زیست، سیستم‌های مهندسی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است. تاب‌آوری سیستم قدرت، توانایی یک سیستم قدرت برای پاسخگویی به حوادث نادر و شدید است و بر این تمرکز دارد که چگونه می‌توان سیستم قدرت را با سرعت و کارایی به حالت قبل از حادثه بازگرداند. به عبارت دیگر هدف از اقداماتی که جهت بالا بردن تاب‌آوری سیستم قدرت انجام می‌شود این است که سیستم در مواجهه با حوادث نادر و شدید به جای اینکه درهم‌شکسته شود از خود انعطاف نشان بدهد. [۱]، [۸]

۲-۱- تفاوت تاب‌آوری و قابلیت اطمینان^۳

در سیستم‌های قدرت برای ارزیابی حوادث نوع اول (احتمال زیاد، خسارت کم)، از مفهوم قابلیت اطمینان و معیارهای توسعه یافته مربوط به آن از جمله SAIDI^۴ و SAIFI^۵ استفاده می‌شود. از طرف دیگر، این معیارها برای حوادث نوع اول طراحی شده‌اند و برای

رسیدگی به اثرات حوادث نوع دوم (احتمال کم، خسارت شدید) کافی نیست. به عبارت دیگر اگرچه معیارهای قابلیت اطمینان می‌توانند بینش بیشتری در مورد رفتار غیرعادی سیستم‌های قدرت به بهره‌برداران ارائه دهند، اما ماهیت ایستای این معیارها آن‌ها را برای اندازه‌گیری اثرات مکانی و زمانی حوادث نادر و شدید بر روی شبکه‌های قدرت نامناسب می‌سازد. به جهت شفاف‌سازی و درک بهتر تفاوت‌های این دو مفهوم، جدول شماره (۱) ارائه شده است [۱]، [۹] از این‌رو با توجه به محدودیت‌های معیارهای قابلیت اطمینان در ارزیابی و بهبود وضعیت شبکه در مقابل تهدیدات حوادث با تأثیر شدید و نادر، معیارهای مرتبط با مفهوم تاب‌آوری توسعه یافته‌اند.

جدول ۱: مقایسه مفاهیم قابلیت اطمینان و تاب‌آوری

معیار مقایسه	تاب‌آوری	قابلیت اطمینان
مفهوم	پویا ^۸	لحظه‌ای و ایستا ^۷
کاربرد	انطباق‌پذیری شبکه	استحکام شبکه
تمرکز اصلی	ارائه سرویس	تجهیزات سیستم
حوزه مرتبط	طراحی و بهره‌برداری	طراحی
راهبرد تأمین	فعال	غیرفعال

۲-۲- منحنی تاب‌آوری سیستم

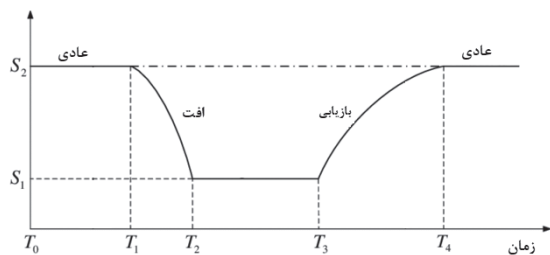
طبق تعریف موسسه^۸ (EPRI) تاب‌آوری یک سیستم توانایی مقاومت^۹، جذب^{۱۰} و بهبود سریع^{۱۱} در مواجهه با یک حادثه نادر و شدید می‌باشد که هر کدام از ویژگی‌های نامبرده شده در بازه‌های زمانی مختلفی از رویداد به وسیله معیارهای خاصی ارزیابی می‌شود [۱۰]. قابلیت مقاومت توانایی سیستم برای حفظ سطح قابل قبولی از عملکرد ضروری در شرایط اختلال و در مدت طولانی می‌باشد. در شرایط رخداد حادثه که دیگر سیستم توانایی مقاومت نداشته باشد قابلیت جذب مطرح می‌شود. قابلیت جذب توانایی سیستم برای جذب تأثیر رویداد مخرب در زمان به نسبت کوتاه و در نتیجه به حداقل رساندن آسیب سیستم می‌باشد. پس از جذب شوک وارد شده به سیستم، قابلیت بازیابی نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری سیستم بازی می‌کند. در این هنگام سیستم به وسیله قابلیت بازیابی با سرعت هر چه تمام سعی در رسیدن به سطح عملکردی قابل قبولی پس از وقوع حادثه می‌کند [۱۱]. [۱۲]

در این راستا منحنی تاب‌آوری سیستم ارائه شده است که سطح عملکرد سیستم را از زمان قبل وقوع حادثه تا پس از خرابی و بازیابی کلی سیستم نشان می‌دهد. سطح عملکرد سیستم را می‌توان بسته به مورد مطالعه، با معیارهای مختلفی مانند میزان بار حیاتی تأمین شده، تعداد تجهیزات حیاتی در وضعیت عملیاتی و یا مقدار انرژی تأمین شده اندازه‌گیری می‌شود. عموماً سطح عملکرد سیستم قبل از رخداد حادثه در بیش‌ترین حالت ممکن یعنی ۱۰۰ درصد می‌باشد که هنگام وقوع حادثه این مقدار کاهش یافته و پس از بازیابی کامل سیستم دوباره به بیش‌ترین حالت ممکن می‌رسد. به عبارت دقیق‌تر، چنانچه در شکل (۲) مشاهده می‌شود، قبل از وقوع حادثه یعنی در بازه زمانی ۰ تا t_1 ، با توجه به اینکه سیستم در حالت عادی خود می‌باشد، سطح عملکرد در حالت عادی و به عبارتی بهترین حالت ممکن قرار دارد. در این مرحله، به جهت افزایش آمادگی سیستم، اقدامات پیشگیرانه قبل

از وقوع حادثه اعمال می‌شود. در محل اختلال هم‌زمان با وقوع حادثه در t_1 ، سطح عملکرد سیستم با توجه به شدت و نوع حادثه شروع به کاهش کرده و پس از مدتی در زمان t_2 به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. با توجه به میزان مقاومت و تطبیق‌پذیری سیستم در برابر حادثه، میزان کاهش سطح عملکرد سیستم می‌تواند متفاوت باشد.

در طول این مرحله، اقدامات اصلاحی برای کاهش تأثیر تنش خارجی و آغاز روند بازیابی سیستم اعمال می‌شود. نظر به اینکه هنگام وقوع حادثه امکان بازیابی و ارزیابی دقیق میزان خسارات به دلیل محدودیت‌های جوی، خطرات جانی و مالی و شرایط نامساعد کم می‌باشد، سیستم از t_2 تا پایان حادثه یعنی t_3 در وضعیت کمینه سطح عملکردی باقی می‌ماند. پس از اتمام رخداد اقدامات ترمیمی برای بازیابی سریع بارهای قطع شده و تعمیر/تعویض زیرساخت‌های آسیب دیده اعمال می‌شود. چنانچه واضح است در این مرحله سطح عملکرد سیستم شروع به افزایش کرده و تا رسیدن به سطح عملکرد قبل از حادثه در t_4 ادامه می‌یابد.

سطح عملکرد سیستم



شکل ۲: منحنی فازهای مختلف تاب‌آوری [۱۳]

۳- معیارهای ارزیابی تاب‌آوری

چنانچه در شکل (۳) نشان داده شده با توجه به ماهیت سیستم و هدف مورد مطالعه معیارهای ارزیابی تاب‌آوری به صورت‌های گوناگون دسته‌بندی می‌شوند [۱۱]، [۱۲]، [۱۴] که در ادامه به جزئیات هر یک می‌پردازیم.

۳-۱- معیارهای منطبق بر مشخصه کلی تاب‌آوری

کلی‌ترین دسته‌بندی بر اساس مشخصه‌های کلی تاب‌آوری یعنی



شکل ۳: معیارهای مختلف ارزیابی تاب‌آوری

مقاومت پذیری، انعطاف پذیری (جذب) و بازیابی می باشد. برای مثال در [۱۵] از سه معیار احتمال مقاومت پذیری، احتمال انعطاف پذیری و احتمال بازیابی که مبتنی بر مشخصه کلی تاب آوری هستند برای ارزیابی رفتار سیستم در فازهای مختلف استفاده شده است.

۳-۲- معیارهای قابلیت اطمینان پایه

دسته ای از معیارهای ارزیابی تاب آوری بر پایه ی معیارهای قابلیت اطمینان توسعه یافته اند. برای مثال در مرجع [۱۶] از شاخص انرژی تامین نشده^{۱۲} که یک معیار قابلیت اطمینان پایه می باشد در فازهای زمانی رویداد حادثه به جهت ارزیابی تاب آوری سیستم استفاده شده است. در این کار سعی می شود تاثیر مشارکت پنل های خورشیدی و دیزل ژنراتورها را بر تاب آوری شبکه در شرایط بحرانی حادثه ارزیابی کند. یافته های این مقاله نشان می دهد که با افزایش مشارکت پنل های خورشیدی و دیزل ژنراتورها، شاخص انرژی تامین نشده کاهش می یابد که این مساله نشان دهنده ی افزایش تاب آوری سیستم در این شرایط می باشد.

۳-۳- معیارهای زمان، انرژی و هزینه محور

معیارهای هزینه محور تاب آوری سیستم را بر اساس مفاهیمی مانند: هزینه بازیابی سطح عملکرد سیستم، هزینه فرصت های از دست رفته به دلیل قطعی برق، هزینه انرژی تامین نشده و ارزش بار تامین نشده ارزیابی می کند. معیارهای مبتنی بر انرژی، تاب آوری را با اندازه گیری توان و یا انرژی از دست رفته یا حفظ شده پس از حادثه ارزیابی می کنند. همچنین معیارهای مبتنی بر زمان، سرعت تحت تاثیر قرار گرفتن سیستم در اثر حادثه و سرعت بازیابی سیستم پس از اتمام حادثه را ارزیابی می کنند [۱۷]، [۱۸]، [۱۹].

۳-۴- معیارهای ایستا و پویا

معیارهای پویا تحولات سیستم و اجزای آن را مبتنی بر زمان دنبال می کنند در حالی که معیارهای ایستا تغییرناپذیر با زمان می باشند. به عبارت دیگر معیارهای پویا کارکردهایی از سیستم را که مبتنی بر زمان است در نظر می گیرد در حالی که در معیارهای ایستا اینگونه نیست. برای مثال در مرجع [۱۶] چند معیار پویا برای فازهای زمانی مختلف منحنی ارزیابی تاب آوری ارائه کرده و براساس این معیارها با توزیع بهینه منابع ذخیره انرژی نسبت به افزایش تاب آوری اقدام می کند.

۳-۵- معیارهای احتمالی و قطعی

در محاسبات معیارهای تاب آوری احتمالی، عدم قطعیت ها مانند: نرخ خرابی و زمان بازیابی تجهیزات مشارکت داده می شود در حالی که در معیارهای قطعی، عدم قطعیت های تجهیزات و حادثه در نظر گرفته نمی شود. برای مثال در مرجع [۱۹] یک معیار تاب آوری برای شبکه های برق بر اساس مسیرهای محتمل برای تحویل توان از ژنراتور به بار، با در نظر گرفتن اهمیت بار قبل و بعد از اختلال و مبتنی بر پخش بار بهینه ایجاد شده است. در مورد دیگر مرجع [۱۵] از سه معیار احتمالی ترکیبی با مشخصه کلی تاب آوری، جهت ارزیابی تاب آوری استفاده کرده است.

۴- رویکردهای بهبود معیارهای تاب آوری

به صورت کلی به مجموعه اقداماتی که بهره بردار جهت بهبود و افزایش تاب آوری سیستم انجام می دهد، رویکردهای بهبود تاب آوری می گویند. رویکردهای بهبود تاب آوری به عنوان آخرین مرحله در روند بهبود تاب آوری سیستم قدرت و متناسب با شرایط، اولویت ها و اهداف بهره برداری و پس از انتخاب و ارزیابی دقیق

معیارسنجش مد نظر پیاده سازی می گردند. رویکردهای بهبود تاب آوری به طور کلی به دو دسته تقسیم می شوند: ۱- رویکردهای برنامه ریزی و زیرساختی^{۱۳} ۲- رویکردهای بهره برداری^{۱۴}.

۴-۱- رویکردهای برنامه ریزی و زیرساختی

در این رویکرد سعی می شود شبکه به صورت بلند مدت برای مواجهه با حوادث شدید و نادر احتمالی آینده برنامه ریزی و طراحی شود. در این مدل رویکرد، تمرکز اصلی بر عدم قطعی بارهای حیاتی مانند: بیمارستان ها، ایستگاه های پمپاژ آب و پست های گاز که با نیازهای اساسی زندگی انسان مرتبط هستند می باشد. انواع راهبردهای ذکر شده به شرح زیر می باشد:

۴-۱-۱- تخصیص و ترکیب پیشگیرانه منابع

از دیرباز یکی از روش های سنتی تقویت شبکه در برابر آسیب ها و تنش های وارده به سیستم قدرت تخصیص و ترکیب بهینه ی انواع منابع در دسترس بهره بردار شبکه مانند منابع تجدیدپذیر، دیزل ژنراتورها، ذخیره سازهای انرژی و... بوده است [۲۰]، [۲۱]. در این راستا مرجع [۲۲] با معرفی یک معیار ارزیابی احتمالی و با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی به هدف کنترل بهینه ریز شبکه در هنگام حادثه، مدلی برای بهبود تاب آوری ریز شبکه های متصل به شبکه ارائه کرده است. در این کار معیار اصلی ارزیابی تاب آوری، معیار بقا پذیری در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر میزان احتمال این که در حین رویداد بارهای حساس ریز شبکه تامین شوند به عنوان معیار بقا پذیری برای ارزیابی تاب آوری شبکه توصیف شده است. الگوریتم بهینه سازی ارائه شده در این کار با تخصیص و ترکیب بهینه منابع در دسترس ریز شبکه مانند سلول های خورشیدی، دیزل ژنراتور، منابع ذخیره سوخت و باتری های ذخیره ساز انرژی، تاب آوری ریز شبکه را بهبود می بخشد. نتایج عددی و کیس های مورد مطالعه در این کار نشان می دهد که تخصیص بهینه ی ترکیبی از منابع در این مدل، باعث کاهش مصرف سوخت و به تبع آن هزینه شبکه و همچنین افزایش تاب آوری شبکه می شود. در مرجع [۲۳] ابتدا معیارهای تاب آوری در معیارهای اقتصادی ادغام می شوند تا علاوه بر توجه به شاخصه اصلی سیستم یعنی سود و زیان مالی، تاب آوری نیز تضمین بشود. سپس به وسیله رویکرد تخصیص بهینه ی منابع، سعی در بهبود معیار تاب آوری می شود. نتایج این کار تحقیقاتی نشان می دهد که استفاده از منابع تولید پراکنده مانند دیزل ژنراتورها، توربین های بادی، پارکینگ خودروهای الکتریکی و ذخیره سازهای انرژی الکتریکی در کنار ادغام معیارهای تاب آوری و اقتصادی می تواند تاثیر قابل توجهی در بهبود تاب آوری شبکه هنگام وقوع حوادث شدید داشته باشد. مقاوم سازی^{۱۵} دارایی های شبکه یکی از مهم ترین رویکردهای برنامه ریزی و زیرساختی برای ارتقای تاب آوری ریز شبکه ها در برابر حوادث شدید می باشد.

۴-۱-۲- تشکیل چندین ریز شبکه درون یک شبکه توزیع

در این رویکرد به هدف افزایش تاب آوری شبکه در مقابل حوادث شدید احتمالی، پتانسیل و زیرساخت های لازم برای تقسیم یک شبکه توزیع به چندین ریز شبکه با محوریت منابع تولید پراکنده فراهم می شود که در این حالت ریز شبکه های تشکیل شده با تعامل با یکدیگر می توانند عملکرد بسیار بهتری نسبت به یک شبکه توزیع سنتی داشته باشند. برای مثال در مرجع [۲۴] چارچوبی برای برنامه ریزی و توسعه یک شبکه توزیع ولتاژ پایین تاب آور برای یک شهر جدید ایجاد شده است. در این مدل برنامه ریزی، بسته به مقتضیات مسئله باید تعدادی ریز شبکه

نیز می‌باشد، سبب کنترل بهتر اپراتورهای شبکه بر روند شارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی شده و می‌تواند در بهره‌برداری بهینه شبکه‌های توزیع شامل خودروهای الکتریکی موثر باشد. نتایج بررسی‌های عددی مدل ارائه شده نشان می‌دهد که استفاده از ظرفیت خودروهای برقی و به خصوص ایستگاه‌های تعویض باتری می‌تواند تاثیر به سزایی در بهبود تاب‌آوری ریزشک‌ها داشته باشد.



شکل ۴: یک خودروی الکتریکی شرکت تسلا در حال تبادل انرژی با شبکه (V2G) **۴-۲-۲- بازآرایی شبکه^{۱۷}**

راهبرد کارآمد دیگری که به‌تازگی مورد استفاده قرار گرفته، بازآرایی بهینه شبکه با توجه به الزامات تاب‌آوری سیستم هنگام بروز حادثه می‌باشد. به‌طور معمول در هر شبکه توزیع تعدادی کلید حالت عادی باز و تعدادی کلید حالت عادی بسته وجود دارد که می‌توان با باز و بسته کردن این کلیدها تغییراتی در آرایش شبکه در جهت ارتقای تاب‌آوری به وجود آورد. برای مثال مرجع [۲۷] به بررسی تاب‌آوری و مدیریت انرژی در یک سیستم شامل چند ریزشک می‌پردازد. در مدل پیشنهادی این تحقیق، ریزشک اصلی از چهار ریزشک فرعی تشکیل شده است که این ریزشک‌های فرعی منابع و ظرفیت‌های خود را با هم ترکیب می‌کنند تا یک ریزشک جدید و پیچیده‌تر را تشکیل بدهند که عملکرد بیشتری نسبت به هر یک از ریزشک‌های فرعی ارائه می‌دهد. در این مدل ریزشک‌های فرعی به منابع تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور و ذخیره‌سازهای انرژی مجهز شده‌اند و تنها یکی از ریزشک‌های فرعی به شبکه بالا دست متصل می‌باشد. علاوه بر آن ریزشک‌های فرعی به یکدیگر نیز متصل می‌باشند به صورتی که برخی از اتصالات در حالت عادی باز و بقیه معمولاً بسته می‌باشند. در این شرایط زمانی که مقتضیات تاب‌آوری شبکه یا مقتضیات فنی و اقتصادی حکم کند وضعیت این اتصالات تغییر کرده و توپولوژی شبکه اصلی به نوعی بازآرایی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این مدل تایید می‌کند که با اعمال مدل یاد شده تاب‌آوری بهبود می‌یابد. علاوه بر این، در همه ریزشک‌های فرعی، هزینه‌های بهره‌برداری به حداقل می‌رسد و حوادث به نحو مطلوب مدیریت می‌شود به صورتی که هم در شرایط عادی و هم در شرایط تحت خطا میزان اصلاح بار صفر می‌باشد.

۴-۲-۳- اختصاص منابع ذخیره انرژی قابل حمل^{۱۸}
منابع ذخیره انرژی قابل حمل عموماً به صورت یک کشنده با محموله‌ای از باتری‌ها و مبدل‌ها هستند (شکل ۵). این منابع به دلیل قابلیت جابه‌جایی، ظرفیت بالایی برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع به وجود آورده‌اند. مقاله [۲۸] یک راهبرد بازایی

در سطح شبکه توزیع شکل بگیرند که در این مورد با مطرح کردن یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه سعی می‌شود منطقه سرویس‌دهی (مرکز ریزشک‌ها)، مشخصات فنی و تعداد و اندازه آن‌ها مشخص بشود. در این کار جهت حل مسئله یاد شده از یک رویکرد هزینه محور در کنار مسائل مربوط به تاب‌آوری استفاده شده است. به همین لحاظ جهت اعمال ملاحظات تاب‌آوری در تابع هزینه از یک معیار جدید استفاده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل مربوطه به صورت موثری می‌تواند باعث کاهش هزینه و افزایش تاب‌آوری سیستم بشود.

۴-۱-۳- افزونگی^{۱۹} و بهبود استحکام تجهیزات شبکه

تجهیزات شبکه به دلیل اینکه همواره در معرض آسیب‌های ناشی از حوادث می‌باشند معمولاً یکی از دلایل عمده اختلال عملکرد شبکه برق هنگام وقوع حادثه هستند. به این لحاظ می‌توان با مقاوم‌سازی و افزونگی تجهیزاتی که نقش کلیدی در عملکرد سیستم دارند و بیشتر در معرض حوادث طبیعی مورد نظر می‌باشند، تاب‌آوری شبکه را به صورت قابل توجهی افزایش داد. برای مثال در مناطقی که نرخ وقوع طوفان‌های شدید زیاد است، می‌توان با زمینی کردن خطوط انتقال اصلی، تاب‌آوری سیستم قدرت در مقابل طوفان را افزایش داد. در این راستا مقاله [۲۵] با ارائه روشی ترکیبی از ظرفیت‌های هر دو سمت شبکه و بار برای بهبود تاب‌آوری سیستم بهره‌گیری می‌کند. در این مدل از یک روش مقاوم‌سازی بهینه منابع، مانند زیرزمینی کردن کابل‌ها و استفاده از واحدهای ذخیره انرژی با مقاومت بالا در سمت شبکه استفاده شده و در سمت بار از ظرفیت ذخیره‌سازهای انرژی خانگی مانند خودروهای الکتریکی و پنل‌های خورشیدی در کنار زیر ساخت‌های مخایراتی مقاوم آن استفاده شده است. علاوه بر این، به وسیله یک الگوریتم کارآمد، مناطق آسیب‌پذیر خوشه‌بندی می‌شود که به صورت موثری می‌تواند مشکل بهره‌بردار را برای تامین تقاضا در شرایط اضطراری حل کند.

۴-۲-۲- رویکردهای بهره‌برداری

رویکردهای بهره‌برداری به مجموعه اقدامات کوتاه‌مدت و اضطراری پس از وقوع حادثه گفته می‌شود که هدف آن‌ها تامین هر چه سریع‌تر انرژی الکتریکی مصرف کنندگان طبق اولویت‌های از قبل تعیین شده می‌باشد. رویکردهای بهره‌برداری ارائه شده جهت بهبود معیارهای تاب‌آوری شبکه عموماً به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

۴-۲-۱- استفاده از استعداد خودروهای برقی

یکی از توانایی‌های ذاتی خودروهای برقی، توانایی انتقال انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری به شبکه برق است که قابلیت V2G نامیده می‌شود شکل (۴). این ویژگی خودروهای برقی می‌تواند خدمات جانبی مختلفی را در اختیار سیستم قدرت قرار دهد. در این راستا، در شرایط اضطراری خودروهای برقی می‌توانند نقش مهمی در بازایی بارهای حساس شبکه پس از حادثه ایفا کنند. برای مثال در مقاله [۲۶]، یک ساختار دو سطحی با بهره‌گیری از ظرفیت ایستگاه‌های تعویض باتری خودروهای الکتریکی برای افزایش تاب‌آوری ریزشک‌ها در برابر رویدادهای با تأثیر کم و احتمال بالا ارائه شده است. یکی از رویکردهایی که به تازگی برای شارژ سریع خودروهای برقی ارائه شده، تعویض باتری خالی خودرو در ایستگاه و جابجایی با یک باتری کامل شارژ شده از قبل می‌باشد. این رویکرد علاوه بر تسریع زمان شارژ خودروهای الکتریکی که یکی از معضله‌های اصلی این صنعت

شده در این زمینه انجام بشود.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Restore
- 2 Resilience
- 3 Reliability
- 4 System Average Interruption Duration Index
- 5 System Average Interruption Frequency Index
- 6 Dynamic
- 7 Static
- 8 Electric Power Research Institute
- 9 Resist
- 10 Absorb
- 11 Rapid recovery
- 12 Energy not supplied
- 13 Planning and infrastructural Strategies
- 14 Operational Strategies
- 15 Hardening
- 16 Redundancy
- 17 Reconfiguration
- 18 Transportable Energy Storages
- 19 Demand Response

مراجع

- [1] Y. Wang, A. O. Rousis, and G. Strbac, "On microgrids and resilience: A comprehensive review on modeling and operational strategies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.134, no. November 2019, p.110313, 2020.
- [2] M. H. Spiegel, E. M. S. P. Veith, and T. I. Strasser, "The spectrum of proactive, resilient multi-microgrid scheduling: A systematic literature review," *Energies*, vol.13, no. 17, pp.1–37, 2020.
- [3] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amirioun, F. Aminifar, M. H. Amini, and A. Sargolzaei, "Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience," *IEEE Access*, vol.6, pp.32035–32053, 2018.
- [4] D. L. Swain, D. Singh, D. Touma, and N. S. Diefenbaugh, "Attributing Extreme Events to Climate Change: A New Frontier in a Warming World," *One Earth*, vol.2, no. 6, pp.522–527, 2020.
- [5] "مروری بر طوفان ۱۲ خرداد سال ۱۳۹۳ تهران," پژوهشکده سوانح طبیعی.
- [6] "قطع برق ۵۰ هزار مشترک تهرانی," خبرگزاری ایسنا.
- [7] SAMI SPARBER, "WINTER STORM 2021," <https://www.texastribune.org/2021/03/15/texas-winter-storm-deaths/>.
- [8] M. Bao, Y. Ding, M. Sang, D. Li, C. Shao, and J. Yan, "Modeling and evaluating nodal resilience of multi-energy systems under windstorms," *Appl. Energy*, vol.270, no. May, 2020.
- [9] P. Cicilio, L. Swartz, B. Vaagensmith, C. Rieger, J. Gentle, T. McJunkin, and E. Cotilla-Sanchez, "Electrical grid resilience framework with uncertainty," *Electr. Power Syst. Res.*, vol.189, no. March, p.106801, 2020.
- [10] T. Kemabonta and G. Mowry, "A syncretistic approach to grid reliability and resilience: Investigations from Minnesota," *Energy Strategy Rev.*, vol.38, p.100726, 2021.
- [11] A. Ummunnakwe, H. Huang, K. Oikonomou, and K. R. Davis, "Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.149, no. June, p.111252, 2021.

« ادامه در صفحه ۶۸ »

بار با استفاده از منابع سیار ذخیره انرژی ارائه می‌کند. در این مدل با استفاده از دو راهبرد توزیع بهینه منابع سیار ذخیره انرژی و شکل‌دهی بهینه ریزش‌بکه‌ها در سطح سیستم توزیع، سعی در به بیشینه رساندن بارهای بازیابی شده پس از حادثه شدید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در این کار نشان می‌دهد که سیستم‌های ذخیره انرژی قابل حمل به طور قابل توجهی عملکرد بازیابی و تاب‌آوری سیستم را بهبود می‌بخشد.



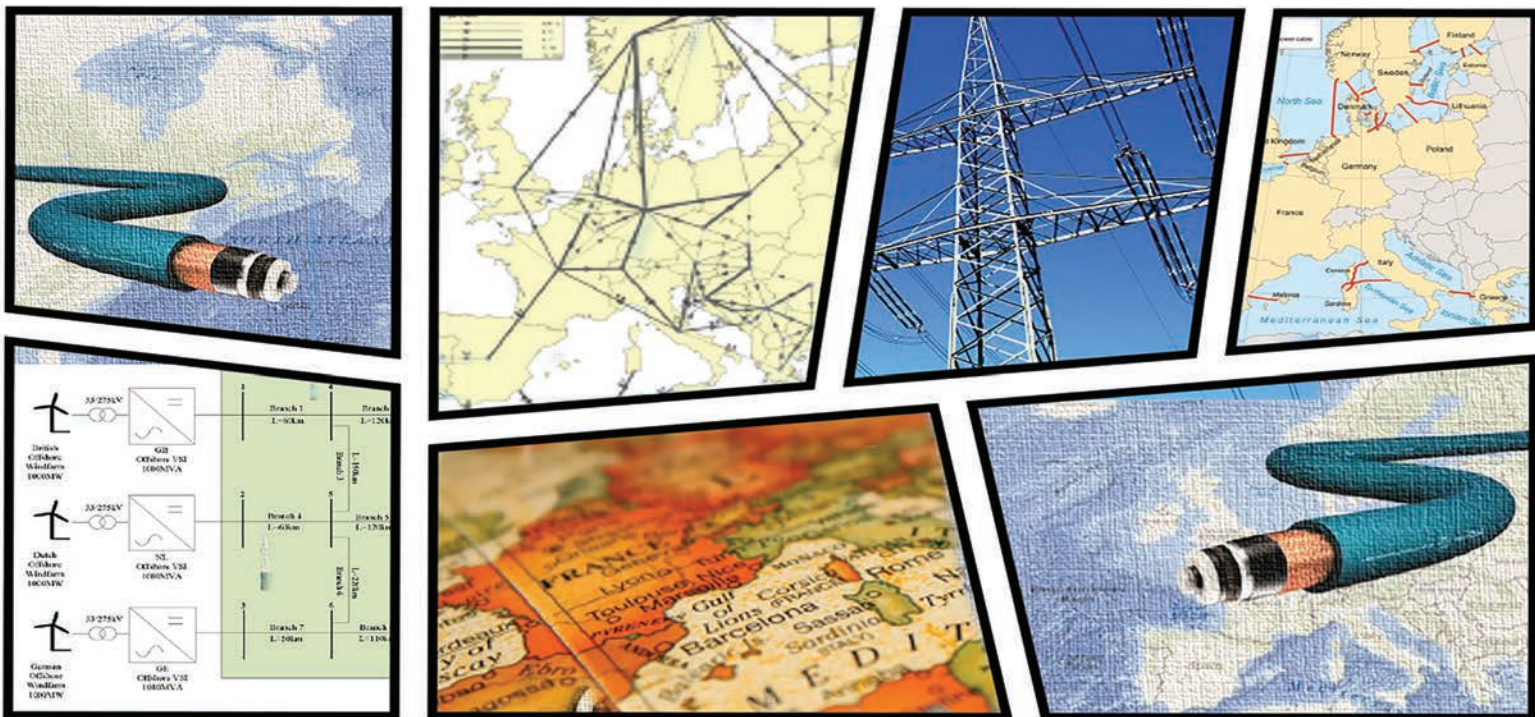
شکل ۴: یک سیستم ذخیره انرژی قابل حمل [۲۹]

۴-۲-۴- پاسخگویی بار^{۱۹}

برنامه‌های پاسخگویی بار که به معنای مشارکت مصرف‌کنندگان در بهبود الگوی مصرف انرژی می‌باشد، یکی از عمده‌ترین روش‌های مدیریت مصرف انرژی الکتریکی در شبکه‌های توزیع می‌باشند. برنامه‌های پاسخگویی بار عموماً از دو طریق قیمت‌گذاری و یا پرداخت طرح‌های تشویقی به مصرف‌کنندگان اجرا می‌شود. علاوه بر موارد ذکر شده استفاده از رویکرد پاسخگویی بار نیز می‌تواند به صورت مؤثر در ارتقای تاب‌آوری مورد استفاده قرار بگیرد. برای مثال مقاله [۳۰] یک چارچوب بهینه‌سازی ترکیبی برای برنامه‌ریزی بهینه یک ریزش‌بکه‌ی تاب‌آور در برابر حوادث شدید ارائه کرده است. رویکرد پیشنهادی سعی می‌کند تا بهره‌برداری ریزش‌بکه را در دو حالت عادی و تحت حادثه بهبود بخشد. علاوه بر این در این کار، برنامه‌های پاسخگویی بار به‌عنوان ابزاری برای بهبود تاب‌آوری استفاده شده است. نتایج عددی مدل نشان می‌دهد که عملکرد ریزش‌بکه در حالت تاب‌آور منجر به افزایش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم می‌شود که این موضوع ناشی از عملکرد جزیره‌ای ریزش‌بکه می‌باشد. علاوه بر این، نشان داده شده که عملیات بهبود تاب‌آوری ریزش‌بکه می‌تواند به دلیل استفاده بیشتر از تجهیزات سیستم و کاهش طول عمر آن‌ها، هزینه‌های عملیات سیستم را در افق برنامه‌ریزی آینده افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

سیستم‌های قدرت به‌طور معمول به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که از استقامت لازم در برابر حوادث عادی یعنی حوادث با احتمال زیاد و تخریب کم برخوردار باشند. اما در عین حال این گونه سیستم‌ها بایستی به گونه‌ای طراحی شده باشند که بتوانند در برابر حوادث نادر و شدید هم مقاومت کرده و در سریع‌ترین زمان ممکن عملکرد عادی خود را بازیابی کنند. با توجه به سوابق موجود که نشان می‌دهد احتمال وقوع حوادث نادر و شدید افزایش پیدا کرده است. معیار تاب‌آوری سیستم اهمیت مضاعفی نسبت به قبل پیدا کرده است. از این رو ارزیابی مؤثر وضعیت سیستم به وسیله معیارهای جدید ارایه شده، در کنار رویکرد مناسب و منطبق بر شرایط و گزینه‌های در دسترس بهره‌بردار، نقش کلیدی در راستای ارتقای سطح تاب‌آوری سیستم‌های قدرت بازی می‌کنند که در این کار پژوهشی سعی شده مروری جامع بر کارهای اخیر انجام



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر استانداردهای بین‌المللی در حوزه تولید، انتقال و توزیع در شبکه برق

■ میلاد یداللهی، عضو هیات علمی گروه پژوهشی مهندسی برق، پژوهشکده فناوری و مهندسی پژوهشگاه استاندارد، m.yadollahi@standard.ac.ir
 ■ محمد مهدی شرع پسند*، عضو هیات علمی گروه پژوهشی مهندسی برق، پژوهشکده فناوری و مهندسی پژوهشگاه استاندارد، sharepasand@standard.ac.ir
 (* نویسنده مسئول)

چکیده

با توجه به مزیت‌های مهم انرژی الکتریکی بر سایر انرژی‌ها، به دلیل سادگی و راحتی توزیع و قابلیت انتقال برای مسافت‌های طولانی، امروزه بیش‌بینی می‌گردد که بیش‌ترین مصرف انرژی در قرن آینده کماکان به صورت انرژی الکتریکی باشد. مدیریت و توسعه صحیح سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع برق، به لحاظ افزایش بهره‌وری، کاهش تلفات، کیفیت توان و تقویت زیرساخت‌های توسعه کشور، حائز اهمیت اساسی است. موضوع استانداردسازی مورد توجه علوم و فنون مختلف می‌باشد. وجود رقابت شدید بین صنایع و جهانی شدن اقتصاد نیز سبب تقویت اراده مسئولین واحدهای تولیدی سراسر جهان در جهت تولید محصولات استاندارد شده است. یک واحد تولیدی نه تنها نمی‌تواند بدون استانداردسازی خطوط تولیدی خود، به موفقیت‌های ارزنده‌ای دست یابد، بلکه با وجود برداشته شدن مرزهای اقتصادی و شرایط موجود در جهان، در صورتی که فعالیت‌های تحقیقاتی خود خصوصاً در زمینه استانداردسازی را به موقع شروع نکند، ممکن است حتی نتواند شرایط موجود خود را نیز حفظ کند و با کاهش روزافزون در آمد، قدرت رقابت در صحنه بین‌المللی را از دست داده و به سمت ورشکستگی پیش برود. استانداردسازی سیستم‌ها در صنعت برق در سه حوزه تولید، انتقال و توزیع برق شامل طراحی و ساخت تجهیزات، تست تجهیزات، تامین تجهیزات، اجرا، نصب و راه اندازی تجهیزات علاوه بر افزایش عملکرد، راهکاری کلیدی در زمینه خصوصی سازی اصولی در راستای نگهداشت و بهبود مستمر شبکه برق به‌عنوان زیرساخت اساسی توسعه کشور، به شمار می‌آید. بنابراین مرور و احصا استانداردهای بین‌المللی در این حوزه و مقایسه استانداردها و ضوابط کشورمان با آنها مفید خواهد بود. در این مقاله علاوه بر دسته‌بندی حوزه‌های استانداردسازی در زمینه تولید، انتقال و توزیع شبکه برق، استانداردهای مهم بین‌المللی احصا شده‌اند.

کلمات کلیدی: سیستم توزیع و انتقال برق، استانداردهای بین‌المللی، صنعت برق

A Review on International Standards in the Field of Power Generation and Transmission

■ Milad Yadollahi, PhD electrical engineering, Tehran University, Assistant professor, Electrical engineering research group, technology and engineering research center, standard research institute, m.yadollahi@standard.ac.ir
 ■ Mohammad Mahdi Share Pasand*, PhD electrical engineering, Shahid Beheshti University, Assistant professor, Electrical engineering research group, technology and engineering research center, standard research institute, sharepasand@standard.ac.ir
 *Corresponding Author

Abstract

Due to its important advantages over other forms of energy, the electrical energy is nowadays expected to keep on being the most frequently used form of consumed energy. Proper management and development of the generation, transmission and distribution systems carries significant value with respect to efficiency improvement, loss reduction, power quality and enhancement of the country infrastructure. Standardization is a focus of interest in many scientific and engineering fields. The severe competition among industries and globalization of the economy encouraged many producers around the world to approach quality production conforming to the standards. Without production line standardization, any producer will fail to achieve valuable success. It may even fail in maintaining its present statute causing income declines on a daily basis, losing competition capabilities and eventually becoming bankrupt if it does not initiate research on standardization in the current situation of the borderless world of business. Standardization in the field of electrical systems for generation, transmission and distribution in the fields of design, manufacturing, test, provision, construction, installation and commissioning of electrical equipment improves performance and is a key to proper privatization with the purpose of maintaining and continually improving the power grid as an important national infrastructure. Therefore, to review the relevant international standards, and to compare them with national standards and regulations, will be useful in this regard. In this article besides categorization of standards in generation, transmission and distribution in the power grid, important international standards are surveyed.

Keywords: Electrical transmission and distribution system, international standards, electrical industry

۱- مقدمه

به طور کلی می توان ساختار شبکه های الکتریکی را مطابق شکل (۱) به سه حوزه تولید^۱، انتقال^۲ و توزیع^۳ دسته بندی کرد.



شکل ۱: ساختار کلی شبکه برق

سیستم تولید، انتقال و توزیع برق در کشورمان با توجه به سابقه نصب و عدم نوسازی بهنگام، به نسبت فرسوده است. تلفات انتقال برق در شبکه برق ایران بالاتر از میزان جهانی تخمین زده شده است [۱]. دوام و کیفیت سرویس نیز موضوع دیگری است که به نظر می رسد شایسته است بهبود و ارتقا داده شود. تعریف و احصا استانداردهای بین المللی و نیز استانداردهای ملی و منطقه ای کشورهای توسعه یافته، علاوه بر ارتقای سطح ایمنی به لحاظ سازگاری عملکردی، دوام و کیفیت اجزا و سیستم ها [۲] فواید زیادی به لحاظ اقتصادی نیز دارد [۳-۶]. به طور خاص، با توجه به انجام بخش مهمی از سرویس تولید، انتقال و توزیع توسط پیمانکاران متعدد که در مناطق جغرافیای پراکنده شده و در هر سال ممکن است تغییر کنند، دو فایده مهم دارد [۳]: اولاً شناسایی و تعیین استانداردها، عاملی مهم برای تسهیل خصوصی سازی آن بخش از فعالیت که هنوز تحت تصدی دولتی است خواهد شد. این موضوع به نوبه خود باعث جذب سرمایه گذاری غیر دولتی و در نهایت بهبود خدمات خواهد بود. در صورت عدم شناسایی و تعیین استانداردهای لازم برای شبکه تولید، انتقال و توزیع خصوصی سازی به صورت غیر اصولی صورت گرفته و نظارت بر عملکرد پیمانکاران نیز مقدور نخواهد بود. در واقع استانداردها زبان فنی مشترکی میان کارفرمای شبکه (وزارت نیرو، توانیر یا برق های منطقه ای و شرکت های توزیع) و پیمانکار ارائه دهنده سرویس (طراحی و ساخت تجهیزات،

نصب و راه اندازی، نوسازی، تعمیر و تست تجهیزات، سرویس های دوره ای و ...) ارائه می کنند. این زبان مشترک زیر بنای قراردادهای را تشکیل داده و اختلافات اجرایی را به حداقل می رساند. دوم شناسایی و تعیین استانداردهای بین المللی حتی در صورتی که خصوصی سازی انجام نشده باشد، از اعمال سلیقه محلی و فردی در تعریف فعالیت ها جلوگیری کرده و باعث ارتقای یکنواخت کیفیت خدمات و تجهیزات خواهد شد. در این مقاله مروری بر استانداردهای بین المللی و ملی کشورهای توسعه یافته، در خصوص شبکه تولید، انتقال و توزیع برق شامل طراحی، تجهیزات، پست ها و برخی موارد مرتبط دیگر، بر اساس منابع متعدد از جمله [۷] و [۸] ارائه شده است. استانداردهای کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)، انستیتی مهندسان برق و الکترونیک (IEEE)، انجمن سازندگان تجهیزات برقی آمریکا (NEMA)، جامعه تست و مواد (ASTM)، استانداردهای ملی آمریکا (ANSI) و انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE) مرور شده اند.

۲- استانداردهای حوزه تولید در صنعت برق

تولید الکتریسیته فرایندی است که طی آن از یک منبع انرژی استفاده می شود تا انرژی الکتریکی تولید شود. برخی از تجهیزات مانند ترانسفورماتورها و یا ماشین های الکتریکی گردان و غیره هم در حوزه تولید و هم در حوزه انتقال و توزیع استفاده می شوند که در این دسته بندی در بخش تولید به بررسی منابع و استانداردهای بین المللی آنها پرداخته می شود.

۲-۱- ترانسفورماتورها

ترانسفورماتور یکی از پرکاربردترین تجهیزات در سیستم قدرت و گران قیمت ترین تجهیز در پست های فشارقوی می باشد، از این رو طراحی، ساخت و نصب و راه اندازی و بهره برداری آن نیز حایز اهمیت خواهد بود. ترانسفورماتورهای نیروگاهی برخلاف ترانسفورماتورهای قدرت دیگر به دلیل حرارت بالای تولیدی در

سمت فشارضعیف دارای سیستم خنک‌کنندگی و نوع سیم‌پیچی متفاوتی نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی می‌باشند. از نظر تعداد سیم پیچ نیز با توجه به تغذیه داخلی نیروگاه‌ها دارای سه سیم‌پیچ می‌باشند. جدول (۱) استانداردهای مربوط به ترانسفورماتورها و تست‌های الکتریکی و متعلقات ترانسفورماتور را ارائه می‌دهد.

جدول ۱: استانداردهای بین‌المللی ترانسفورماتور

موضوع	استاندارد
ترانسفورماتورهای قدرت	
عمومی	IEC 60076-1
الزامات استاندارد IEEE برای ترانسفورماتورهای قدرت غوطه‌ور در مایع	IEEE C57
افزایش دما برای ترانسفورماتورهای غوطه‌ور در مایع	IEC 60076-2
سطوح عایقی، تست دی‌الکتریک و فواصل ایمنی هوایی	IEC 60076-3
تست صاعقه و سوئیچینگ ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-4
توانایی ایستادگی در برابر خطای اتصال کوتاه	IEC 60076-5
راهنمای بارگیری از ترانسفورماتورهای روغنی	IEC 60076-7
تعیین سطح صدا	IEC 60076-10
بارگیری از ترانسفورماتورهای خشک	IEC 60076-12
ترانسفورماتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی	IEC 60076-16
بازده انرژی	IEC 60076-20
وسایل حفاظتی ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-22-1
رادیاتورهای قابل جابجایی برای ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-22-2
مبدل حرارتی هوا برای عایق مایع برای ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-22-3
مبدل حرارتی آبی برای عایق مایع برای ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-22-4
پمپ‌های برقی برای ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-22-5
پنکه برقی برای ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-22-6
متعلقات و پرکننده‌ها برای ترانسفورماتور و راکتور	IEC 60076-22-1
مشخصات تنظیم ولتاژ ترانسفورماتورهای توزیع	IEC 60076-24
الزامات روغن مورد استفاده در ترانسفورماتور	IEC 60076-26
بوشینگ‌های عایقی	IEC 60137
الزامات حفاظت دیستانس	IEC 60255-121
روغن اسکارل برای ترانسفورماتور و خازن	IEC 60588
علامت‌گذاری ترمینال و تب چنجر برای ترانسفورماتورهای قدرت	IEC 60616
متعلقات	
ورق هسته	IEC 60404
تب چنجر	IEC 60214

موضوع	استاندارد
سیم لاکي تخت	IEC 60851-5
رنگ	ASTM B 117 ASTM D 3359
اقلام لاستیکی	ISO 1183-1 ISO 48-4
مواد فلزی	ISO 6506-1 ISO 6507-1 BS EN ISO6892-1
فلزات غیر مغناطیس مس و برنج	ASTM E 1004
کاغذ عایق	IEC 60554-2 IEC 60243 ISO 534 ISO 287 ISO 2144

۲-۲- ماشین‌های الکتریکی گردان

ماشین‌های الکتریکی گردان ماشین‌هایی هستند که دارای حرکت دورانی هستند و قادرند انرژی الکتریکی را تبدیل به انرژی مکانیکی کرده و یا بر عکس انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل نمایند، یا موجب تغییرات انرژی الکتریکی از صورتی به صورت دیگر شوند. مانند: ژنراتورها و موتورهای جریان مستقیم، جریان متناوب سه فاز و جریان متناوب تک فاز. استانداردهای ماشین‌های الکتریکی گردان در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: استانداردهای بین‌المللی ماشین‌های الکتریکی گردان

موضوع	استاندارد
ماشین‌های الکتریکی گردان	
رتبه بندی و عملکرد	IEC 60034-1
روش‌های استاندارد و ویژه برای تعیین تلفات و بازده از آزمایش‌ها	IEC 60034-2
الزامات ویژه برای ژنراتورهای سنکرون و جبران‌کننده‌های سنکرون که توسط توربین‌های بخار یا توربین‌های گاز احتراق هدایت می‌شوند.	IEC 60034-3
روش‌های تعیین مقادیر تحریک الکتریکی ماشین سنکرون از آزمایش‌ها	IEC 60034-4
درجه حفاظت ارائه شده توسط طراحی یکپارچه ماشین‌های الکتریکی دوار (کد PI) - طبقه بندی	IEC 60034-5
روش‌های خنک‌کنندگی	IEC 60034-6
طبقه‌بندی انواع ساختار، ترتیبات نصب و موقعیت جعبه ترمینال	IEC 60034-7
محدودیت سطح صدا	IEC 60034-9
حفاظت حرارتی	IEC 60034-11
عملکرد راه‌اندازی موتورهای القایی قفس سنجابی سه فاز تک سرعت	IEC 60034-12

موضوع	استاندارد
ارتفاع مکانیکی ماشین‌های خاص با ارتفاع شفت ۶۵ میلی‌متر و بالاتر - اندازه‌گیری، ارزیابی و محدودیت‌های شدت ارتعاش	IEC 60034-14
سطح ایستادگی در برابر ولتاژ ضربه سیم‌پیچ‌های استاتور ماشین‌های گردان AC	IEC 60034-15
سیستم‌های تحریک برای ماشین‌های سنکرون	IEC 60034-16
ارزیابی عملکردی سیستم‌های عایقی	IEC 60034-18

۳- استانداردهای حوزه سیستم انتقال در صنعت برق

سیستم‌های انتقال برق به معنای جابه‌جایی انرژی الکتریکی از نقطه تولید تا ایستگاه‌های فرعی توزیع برای توزیع برق به صورت محلی است. برای انجام اقتصادی این کار، ولتاژ برق تولید شده در ایستگاه فرعی به سطوح ولتاژ لازم برای انتقال افزایش می‌یابد. یک نگرانی مهم در خصوص انتقال انرژی برق به کمینه رساندن هدررفت انرژی از امپدانس خطوط قدرت برق است. سطوح ولتاژ انتقال می‌توانند به‌طور معمول بالای صد کیلوولت بوده و در سطوح ولتاژ بسیار بالا^۴ تا سطوح ولتاژ کمتر از هزار کیلوولت هستند.

دستورالعمل‌ها، استانداردها و آیین‌کارهای توصیه شده بسیاری وجود دارند که در طراحی و ساخت سیستم‌های انتقال برق قابل استفاده هستند. نخستین حوزه‌هایی که باید مورد توجه قرار بگیرد خطوط هوایی و زیرزمینی مربوط به این سیستم‌ها هستند. در کشورمان عمده انتقال برق از طریق خطوط هوایی صورت می‌پذیرد. جدول (۳) برخی از استانداردهای مربوط به خطوط انتقال و توزیع را نشان می‌دهد. شرکت‌های توزیع و انتقال برق و شهرداری‌ها در کشورهای مختلف، استانداردهای مهندسی و طراحی خود را برای سیستم‌های توزیع و انتقال برق دارند. هرچند سیستم‌های توزیع ولتاژ بالای مستقیم (HVDC) در حال حاضر در کشورمان رایج نیستند، به جهت کاربرد احتمالی در برخی تاسیسات صنعتی موجود یا آتی، در این جدول استانداردهای مربوط به این سیستم نیز آورده شده است.

جدول ۳: استانداردهای خطوط انتقال

موضوع	استاندارد
ولتاژهای استاندارد	IEC 60038
کد ایمنی الکتریکی	IEEE C 2
تاسیسات ولتاژ متناوب یک کیلو ولت و بالاتر	IEC 61936 (ser.)
محاسبات اتصال کوتاه	IEC 60909 (ser.)
تله موج برای سیستم‌های انتقال ولتاژ متناوب	IEC 60353
خازن کوپلینگ و تقسیم ولتاژ	IEC 60358
طراحی و اجزای خطوط انتقال هوایی	
خطوط انتقال هوایی	IEC 60826
آزمون بارگذاری سازه‌های خطوط انتقال هوایی	IEC 60652
تاسیسات ولتاژ متناوب یک کیلوولت و بالاتر	IEC 61936 (ser.)

موضوع	استاندارد
اتصال زمین در طول نصب خطوط هوایی انتقال نیرو	IEEE 524
اندازه‌گیری نویز صوتی خطوط انتقال هوایی	IEEE 656
اندازه‌گیری جریان/ دما خطوط انتقال هوایی	IEEE 736
بهبود عملکرد خطوط انتقال هوایی در برابر آذرخش	IEEE 1410
زمین حفاظتی خطوط انتقال	IEEE 1048
بازرسی خطوط انتقال هوایی	IEEE 1441
جورافزارهای خطوط انتقال هوایی	IEC 61284
آزمون خزش جریان برای خطوط انتقال هوایی	IEC 61395
فونداسیون سازه خطوط انتقال هوایی	IEC 61773
جداکنده (اسپیسر) رساناهای خطوط انتقال هوایی	IEC 61854
محاسبات فاصله ایمن در اطراف خطوط انتقال هوایی	IEC 61865
نوسان‌گیرهای مورد استفاده در خطوط انتقال هوایی	IEC 61897
سیستم‌های توزیع ولتاژ بالای مستقیم	
سیستم توزیع ولتاژ بالای مستقیم (CDVH)	IEC 60633 (ser.)
تاسیسات سیستم توزیع HVDC	IEC 61975
مدار کلیدزنی تریستوری برای سیستم توزیع CDVH	IEC 60700 (ser.) IEC 61954 IEC 62823
مبدل‌های ولتاژ متناوب/ مستقیم برای سیستم توزیع CDVH	IEC 62751 (ser.) IEC 62747 IEC 62927 IEC TR 62543 IEC 62501
مدار کموتاسیون خط برای سیستم توزیع HVDC	IEC TR 60919 (ser.)
فیلترهای ولتاژ متناوب برای سیستم توزیع CDVH	IEC TR 62001 (ser.)
فیلترهای فعال برای سیستم توزیع CDVH	IEC TR 62544
آنالیز خرابی	
تعیین محل رخداد خرابی در خطوط انتقال	IEEE C 37.114
آنالیز داده‌های خرابی عایقی	IEC 62539

۳-۱- استانداردهای تجهیزات خطوط انتقال

رساناهای انتقال و توزیع هوایی نیازمند سخت‌افزارهای اساسی برای نگهداری و اتصال به تیرها، حفظ الزامات فاصله سیم‌ها و جلوگیری از ایجاد مسیرهای تخلیه الکتریکی بین سیم‌های برق‌دار و زمین هستند. سخت‌افزارهای اضافی هم برای حفاظت از خطوط هوایی در برابر رعد و برق و اضافه ولتاژ لازم هستند. تجهیزات و سونچ‌های حفاظتی سیستم توزیع و انتقال، امکان اجتناب از اتصال و اضافه جریان را نیز فراهم می‌کنند.

عایق‌های خطوط یا مقره‌ها، حفاظت و نگهداری حیاتی رساناها را فراهم می‌کنند. الزامات طراحی مقره بر اساس ولتاژ عملیاتی سیستم‌های توزیع و انتقال تعیین می‌شود. ابعاد و شکل هندسی مقره نقش اساسی در ایجاد و حفظ فاصله لازم برای جلوگیری

از ایجاد جریان نشتی یا قوس الکتریکی ایفا می‌کند. شکل هندسی مقره به گونه‌ای طراحی می‌شود تا با خطوط شار میدان الکتریکی ناشی از خطوط انتقال قدرت مطابقت داشته باشد. ضخامت جنس عایق مقره نیز باید قادر به جلوگیری از سوراخ شدن عایق به واسطه ولتاژهای بالا (اعم از ولتاژ عادی و اضافه ولتاژ گذرا) باشد. تعدادی از استانداردهای مربوط به مقره‌ها و اجزای سیستم توزیع و انتقال قدرت در جدول (۴) آورده شده‌اند.

جدول ۴: استانداردهای تجهیزات سیستم انتقال و توزیع

موضوع	استاندارد
مقره	
مقره	IEC 60383 (ser.) NEMA C 29.1
شیشه و پرسلان برای مقره	NEMA C 29.2
مقره پرسلان قرقره‌ای	NEMA C 29.3
مقره پرسلان بشقابی	IEC 60305
مقره پرسلان جداکننده	NEMA C 29.4
مقره کامپوزیتی جداکننده	IEC 61109
مقره یکپارچه پرسلان	IEC 60433
مقره پرسلان سوزنی (فشار ضعیف، متوسط و قوی)	NEMA C 29.5 NEMA C 29.6 NEMA C 29.8
مقره پرسلان اتکایی	IEC 60168 IEC 60273 IEC 60720 NEMA C 29.6 NEMA C 29.9
مقره کامپوزیتی اتکایی	IEC 60720 IEC 61952 NEMA C 29.17
مقره پرسلان برای استفاده داخل ساختمان	NEMA C 29.10
مقره اتکایی برای استفاده داخل ساختمان	IEC 60660 IEC 60720
مقره کامپوزیتی آویز	IEC 61109 NEMA C 29.11 NEMA C 29.12
مقره کامپوزیتی زنجیره‌ای	IEC 61466 (ser.) IEC 61467
مقره پلیمری	IEC 62217 IEC TR 62039
مقره پست کامپوزیتی	IEC 62231
مقره توخالی	IEC 62155 IEC 61462
مقره برای سیستم انتقال قدرت ولتاژ مستقیم	IEC 61325
آزمون اغتشاش مقره فشار قوی	IEC 60437
آزمون آلودگی مصنوعی مقره	IEC 60507

موضوع	استاندارد
آزمون ولتاژ ضربه مقره شیشه‌ای و پرسلان	IEC 61211
آزمون میزان خیس شدن سطح مقره	IEC 62073
بهره‌برداری از مقره سرامیکی آویز	NEMA HV 2
نظافت مقره	IEEE 957
قطعات	
اثرات دمای بالا روی قطعات، اتصال دهنده‌ها و رساناها	IEEE 1283
پیچ و مهره برای خطوط انتقال هوایی	IEEE C 135.1
انکور بولت ^۵ برای خطوط انتقال هوایی	IEEE C 135.2
پیچ خودکار ^۶ برای خطوط انتقال هوایی	IEEE C 135.3
پنجه مفصلی ^۷ برای خطوط انتقال هوایی	IEC 60471 IEEE C 135.20
میخ عایقی برای روی تیر برق	IEEE C 135.22
میله مسی اتصال زمین	IEEE C 135.30
پیچ برای مقره‌های آویز	IEEE C 135.31
رک فلزی کابل	IEEE C 135.35
پیچ واشردار و مهره واشردار	IEEE C 135.38
قفل ^۸ (شکل) ریخته‌گری شده	IEEE C 135.62
پیچ U شکل و مهره ^۹	IEEE C 135.64
بازوی آویز تیر برق	IEEE C 135.63
آزمون و تعمیرات	
کاور لاستیکی عایقی	ASTM D 1049
مواد سرامیکی برای کاربردهای الکتریکی	ASTM D 116
زمین حفاظتی موقت برای تعمیرات	ASTM F 855
آزمون دوره‌ای تجهیزات سیستم توزیع و انتقال	IEEE C 135.61

دستگاه‌های حفاظتی مورد استفاده در سیستم‌های توزیع و انتقال نیز در جدول (۵) فهرست شده‌اند.

جدول ۵: استانداردهای تجهیزات قطع و وصل سیستم انتقال

موضوع	استاندارد
کلید ابزار و فرمان ابزار فشار قوی	IEC 62271 (ser.) IEEE C 37.100
کلید ابزار و فرمان ابزار با بدنه فلزی	IEC 62271-200 IEEE C 37.20 IEEE C 37.21 IEEE C 37.24 IEEE C 37.55 IEEE C 37.81
کلید ابزار و فرمان ابزار با بدنه عایقی	IEC 62271-201
کلید ابزار و فرمان ابزار پیش ساخته	IEC 62271-202
کلید ابزار و فرمان ابزار با عایق گازی	IEC 62271-203

موضوع	استاندارد
نصب، تعمیر و بهره‌برداری کلیدها و فیوزها	IEEE C 37.35
	IEEE C 37.48
	IEEE C 37.40
	IEEE C 37.40a
کلیدهای بازبست ^{۱۰}	IEC 62271-111
	IEEE C 37.60
	IEEE C 37.104
	IEEE C 37.63
سکشانالایزر	
کلیدهای قطع سریع از طریق انحراف جریان به زمین	IEC 62271-112
کلید ابزار فیوزدار جهت نصب روی پایه	IEEE C 37.73
	IEEE C 37.74
اندازه‌گیری تخلیه جزئی بار الکتریکی در کلیدابزار فشار قوی	IEEE 1291
مواد مورد استفاده در کلید ابزار و فرمان ابزار	
روغن معدنی برای استفاده در کلید ابزار و ترانسفورماتور	IEC 60296
هگزا فلورید گوگرد (SF ₆) برای استفاده در کلید ابزار و فرمان ابزار	IEC 60480

۲-۳- استانداردهای پست‌های برق و حفاظت زمین

استاندارد IEEE 80 الزامات حفاظت زمین ایستگاه‌های فرعی را ارائه می‌کند. طراحی سیستم حفاظت زمین ایستگاه فرعی باید از طریق ایجاد یک سطح هم‌پتانسیل^{۱۱}، خطر بروز برق‌گرفتگی در اثر ولتاژ گام یا ولتاژ تماس را به حداقل برساند. سیستم ارت متشکل از یک صفحه یا تسمه مسی دفن‌شده و چندین الکترود زمین در اطراف آن است که همه نقاطی که احتمال برق‌دار شدن ناخواسته آنها وجود دارد، با مقاومت پایین به این سیستم وصل باشند. به طوری که در اثر ایجاد اتصال، جریان عبوری بیش از آستانه قطع کلیدهای حفاظت اضافه جریان باشد و در نتیجه کلیدها برق را قطع کنند. کارایی صحیح سیستم زمین مستلزم اتصال تمامی نقاط لازم با استفاده گسترده از جامپرهای اتصال، نگهدارنده‌های فلزی سازه و رسانای زمین است. همچنین ضروری است که اتصال الکتریکی هرگونه میلگرد در سیمان یا حصار فلزی به سیستم زمین وجود داشته باشد. جامپرهای اتصال بین تیرهای ثابت حصار و دروازه‌ها لازم هستند.

جدول ۶: استانداردهای کابل و هادی خطوط انتقال

موضوع	استاندارد
رتبه‌بندی و عملکرد	IEC 60034-1
هادی‌های مربوط به کابل‌های عایق‌دار	IEC 60228
راهنمای انتخاب کابل‌های فشار قوی	IEC 60183
کابل‌های برق - محاسبه نرخ جریان	IEC 60287
کابل‌های برق با عایق اکستروژنه شده	IEC 60502
آزمایشات روی کابل‌های الکتریکی و فیبر نوری تحت شرایط آتش سوزی	IEC 60332

موضوع	استاندارد
کلیدهای فشار قوی و متوسط	IEC 62271-102
	IEC 62271-103
	IEC 62271-104
	IEEE C 37.30
	IEEE C 37.32
	IEEE C 37.34
	IEEE C 37.35
	IEEE C 37.41
	IEEE C 37.45
	IEEE C 37.48
	IEEE C 37.58
کلیدهای فیوزدار	IEC 62271-105
	IEC 62271-107
	IEEE C 37.46
فیوزهای فشار قوی برای سیستم توزیع	IEEE C 37.40
	IEEE C 37.42
	IEEE C 37.48
	IEEE C 37.48
قطع‌کننده‌های مدار	IEC 62271-100
	IEC 62271-101
	IEC 62271-108
	IEEE C 37.04
	IEEE C 37.06
	IEEE C 37.09
	IEEE C 37.11
	IEEE C 37.12
	IEEE C 37.54
	IEEE C 37.83
گزارش خرابی قطع‌کننده‌های مدار فشار قوی	IEEE 1325
	IEEE C 37.10
قطع‌کننده‌های مدار فشار ضعیف	IEEE C 37.13
	IEEE C 37.14
	IEEE C 37.16
	IEEE C 37.17
	IEEE C 37.27
	IEEE C 37.50
	IEEE C 37.51
کنتاکتور و راه‌اندازهای کنتاکتوری موتور ولتاژ متناوب	IEC 62271-106
کلیدزنی بار القایی	IEC 62271-110
	IEEE C 37.15
کلید ابزارهای چندکاره	IEC 62271-108
کلید کنارگذر خازن سری	IEC 62271-109
کلید خازن	IEEE C 37.66
کلید قطع	IEC 62271-102
	IEEE C 37.37
	IEEE C 37.42
	IEEE C 37.43
	IEEE P 1247
کلید محدودکننده جریان	IEEE C 37.47

IEC 60888	سیم‌های فولادی با روکش روی برای هادی‌های رشته‌ای
IEC 60104	سیم آلیاژ آلومینیوم- منیزیم- سیلیکون برای رساناهای خطوط هوایی
ISO 6892	تست کشش مواد فلزی در دمای محیط
ISO 7802	مواد فلزی- سیم- آزمایش بسته‌بندی
IEC 60468	روش اندازه‌گیری مقاومت مواد فلزی
IEC 60826	بارگیری و استحکام خطوط انتقال هوایی
IEC 61897	خطوط هوایی- الزامات و آزمایشات برای ارتعاش بادی مستهلک کننده‌ها

جدول‌های (۷) و (۸) استانداردهای پست و حفاظت زمین را خلاصه کرده‌اند.

جدول ۷: استانداردهای پست‌های برق

موضوع	استاندارد
نصب تاسیسات فشار قوی	IEC 61936 (ser.)
تجهیزات قطع و وصل از راه دور	IEC 60870 (ser.)
اتوماسیون پست	IEC 61850 (ser.)
تجهیزات پست‌های برق فشار قوی	IEC Guide 111
ولتاژهای استاندارد	IEC 60038
جریان‌های اسمی استاندارد	IEC 60059
همانگی عایقی	IEC 60071 (ser.) IEC 60664 (ser.)
اتصالات الکتریکی در پست‌ها	NEMA CC 1
شارژر باتری برای پست	NEMA PE 5
راکتورها	IEC 60076-6
تجهیزات الکتریکی	IEC60050-442
ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری	IEC 61869-1
ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری جریان	IEC 61869-2
ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ القایی	IEC 61869-3
ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ خازنی	IEC 61869-5
ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری در شبکه قدرت	IEC 61869-103
ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری برای نوسانات فرورزونانس در پست‌های برق دارای ترانس ولتاژ	IEC 61869-102
تابلوهای فشار قوی	IEC 60694
جریان اتصال کوتاه در شبکه سه فاز	IEC 60909
اتصال کابل به تابلوهای GIS با ولتاژ بالاتر از 72.5KV	IEC 60859
تخلیه جزئی در تست تجهیزات فشار قوی	IEC 60270
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- الزامات عمومی	IEC 60255-1

IEC 60173	رنگ‌های مربوط به مغزی کابل‌ها و سیم‌های انعطاف‌پذیر
IEC 60189	کابل‌ها و سیم‌های فرکانس پایین با عایق و غلاف P
IEC 60227	کابل‌های با عایق PVC با ولتاژ نامی کوچک‌تر یا مساوی ۴۵۰/۷۵۰ ولت
IEC 60230	آزمون‌های ضربه بر روی کابل‌ها و متعلقات آنها
IEC 60304	رنگهای استاندارد برای عایق‌های کابل‌ها و سیم‌های فرکانس پایین
IEC 60331	مشخصه‌های مقاومت کابل‌های الکتریکی در برابر آتش
IEC 60332	آزمون‌های مربوط به کابل‌های الکتریکی و نوری تحت شرایط آتش
IEC 60649	محاسبه حداکثر قطر خارجی کابل‌ها برای نصب داخل ساختمان
IEC 60719	محاسبه محدوده‌های بالا و پایین جهت میانگین ابعاد خارجی کابل با هادی مسی
IEC 60724	راهنمای محدوده‌های حرارتی اتصال کوتاه کابل‌های الکتریکی
IEC 60811	روش‌های رایج آزمون برای مواد به کار رفته در عایق و غلاف کابل‌های الکتریکی و نوری
IEC 60853	محاسبه جریان نامی دوره‌های و اضطراری کابل‌ها
IEC 60885	روش‌های آزمون الکتریکی کابل‌ها
BS 801	مشخصات ساخت غلاف‌های سربی و آلیاژهای سربی در کابل‌های الکتریکی
BS 4066	آزمون‌های کابل‌های الکتریکی تحت شرایط آتش
BS 5099	مشخصات آزمون جرقه بر روی کابل‌های الکتریکی
BS 5467	کابل با عایق ترموستینگ
BS 6231	کابل‌های با عایق PVC تک مغزی برای سیمکشی تجهیزات کلیدزنی و کنترل
BS 6234	مشخصات عایق و غلاف پلی اتیلن در کابل‌های الکتریکی
BS 6360	مشخصات هادی‌ها در کابل‌ها و سیم‌های عایق شده
BS 6500	مشخصات کابل‌ها و سیم‌های عایق شده انعطاف‌پذیر
BS 6622	کابل‌های زره دار با عایق ترموست
IEC 60840	کابل‌های قدرت
IEEE 524	راهنمای IEEE برای نصب هادی‌های خطوط انتقال هوایی
IEC 61089	رساناهای رشته‌ای الکتریکی هم مرکز با سیم گرد برای خطوط انتقال هوایی
IEC 60889	سیم آلومینیومی سخت کشیده برای هادی‌های خطوط هوایی

موضوع	استاندارد
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- رله‌های جهتی	IEC 60255-12
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- رله دیفرانسیلی	IEC 60255-13
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- تست	IEC 60255-21
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- سازگاری الکترومغناطیسی	IEC 60255-26
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- سنکرونایزینگ	IEEE/IEC 60255-118-1
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- رله دیستنس	IEC 60255-121
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- حفاظت اضافه/ کمبود ولتاژ	IEC 60255-127
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- رله حرارتی	IEC 60255-149
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- حفاظت اضافه/ کمبود جریان	IEC 60255-151
تجهیزات و رله‌های حفاظتی و اندازه‌گیری- حفاظت فرکانسی	IEC 60255-181
خازن‌های موازی برای سیستم‌های متناوب دارای ولتاژ نامی بالاتر از ۱۰۰۰ ولت- حفاظت	IEC 60871-3
خازن‌های موازی برای سیستم‌های متناوب دارای ولتاژ نامی بالاتر از ۱۰۰۰ ولت- فیوزهای داخلی	IEC 60871-4

جدول ۸: استانداردهای حفاظت زمین

موضوع	استاندارد
ایمنی در زمین کردن پست برق	IEEE 80
اندازه‌گیری مقاومت و پتانسیل زمین	IEEE 81
بیشینه افزایش پتانسیل زمین	IEEE 367
زمین کردن تاسیسات صنعتی و تجاری	IEEE 142
تایید اتصالات زمین تاسیسات پست	IEEE 837
اتصالات موقت زمین در تاسیسات پست	IEEE 1246
زمین کردن نول در تاسیسات و تجهیزات برقی	IEEE C 62.91 IEEE C 62.92 (ser.)
میلۀ الکترود زمین	NEMA GR 1

۴- استانداردهای حوزه توزیع در صنعت برق

انرژی برق از طریق یک شبکه توزیع برق شرکت بین مشتریان توزیع می‌شود. این شبکه شامل ایستگاه‌های فرعی توزیع برق می‌شود که سطح ولتاژ خط انتقال که بین شصت و سه کیلوولت و هفتصد و شصت و پنج کیلوولت است را به سطوح ولتاژ توزیع که به‌طور معمول بیست کیلوولت هستند

کاهش می‌دهد. شبکه‌های توزیع متشکل از خطوط برق هوایی و همچنین کابل‌های زیرزمینی هستند. ولتاژ نقاط تحویل برق به مشتریان شرکت‌های برق باید بیشتر کاهش یابد.

۴-۱- استانداردهای سازه‌های نگهدارنده خطوط هوایی

چهار ابزار از رایج‌ترین ابزارهای خطوط انتقال و توزیع هوایی برق شامل تیرهای چوبی، سازه‌ها و تیرهای فلزی، تیرهای سیمانی و تیرهای کامپوزیتی/ فایبرگلاس می‌شوند. هر نوع از انواع سازه‌های نگهدارنده در ادامه به‌طور خلاصه در کنار استانداردهای قابل اعمال برای آنها بررسی می‌شوند.

استانداردهای مربوط به تیرهای چوبی در جدول (۹) آورده شده‌اند. مشخصات، طبقه‌بندی و خصوصیات تیرهای برق چوبی در استاندارد ANSI O5.1 تعیین شده‌اند. طبقه‌بندی کلاس تیرها مبتنی بر مقادیر ابعاد فیزیکی برای حداقل محیط به اینچ در بالای تیر و همچنین حداقل محیط به اینچ در شش فوت از پایین است. کلاس تیرهای توزیع چوبی استاندارد فوق از کلاس ۱۰ تا ۱ و کلاس‌های انتقال از H1 تا H5 هستند. کلاس توزیع ۱۰ کوچک‌ترین محیط بالای تیر و پایین‌ترین مقدار فشار فیبر را داشته درحالی که کلاس ۱ بزرگ‌ترین محیط بالای تیر و بیش‌ترین مقدار فشار فیبر را دارد. تیرهای برق سیمانی، پلیمر تقویت شده و فلزی هم در خطوط هوایی انتقال و توزیع برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تیرها نسبت به خرابی‌های ناشی از پوسیدگی، حشرات، هوا و آتش ایمن بوده و عمر بیش‌تری نسبت به تیر چوبی دارند. تیرهای کامپوزیت فایبرگلاس قابلیت جذب ضربه دارند که می‌تواند از منظر آسیب‌های ناشی از وسایل نقلیه مطلوب باشند. در کشور ما برای ولتاژهای متوسط و پایین در گذشته بیش‌تر از تیرهای چوبی استفاده شده و امروزه نیز تیرهای سیمانی بیش‌ترین رواج را دارند. اما ممکن است در آینده بتوان از تیرهای کامپوزیتی و پلیمری نیز استفاده کرد. در ولتاژهای بالاتر مشابه سایر کشورها، البته از دکل‌های فلزی استفاده می‌شود.

فهرستی از استانداردهای تیرهای برق سیمانی، پلیمر و چوبی در جدول (۹) ارائه شده‌اند.

جدول ۹: استانداردهای تیرها و دکل‌های برق چوبی و سیمانی

موضوع	استاندارد
تیرهای برق چوبی	
ابعاد و ساختار تیرهای چوبی	ANSI O 5.1
تیر چوبی لمینیت و رنگ شده	ANSI O 5.2
بازو و اتصالات تیر چوبی	ANSI O 5.3
آزمون ایستای تیر چوبی	ASTM D 1036
تیرهای سیمانی و کامپوزیتی	
تیر و دکل فولادی	ASCE 10 ASCE 48
تیر پلیمری	ANSI C 136.20 ASCE 104
تیر سیمانی	ANSI C 136.36B ASCE 596
نصب تیر سیمانی	IEEE 1025

موضوع	استاندارد
تعمیر، بهره‌برداری و ایمنی تاسیسات برق صنعتی و تجاری	IEEE 902
استفاده از قطع‌کننده‌های مدار در تاسیسات برق صنعتی و تجاری	IEEE 1015
تغذیه و اتصال زمین تجهیزات الکترونیکی	IEEE 1100
خطوط انتقال هوایی	IEC 60826 IEC 61936

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری بر مهم‌ترین استانداردهای بین‌المللی و ملی برای سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع برق ارائه شد. موضوع استانداردهای شبکه توزیع، از اهمیت ایمنی، اقتصادی و محیط زیستی برخوردار بوده و به‌منظور تسهیل کاهش تصدی دولت، کاهش دعاوی و اختلاف نظر با پیمانکاران ارائه دهنده سرویس و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و تلفات انرژی حائز اهمیت است. موضوعاتی چون قابلیت اطمینان، کیفیت توان، شبکه هوشمند، برهم کنش خودروهای برقی با شبکه و منابع انرژی تجدیدپذیر از موضوع‌های پژوهشی آینده در همین راستا می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Generation
- 2 Transmission
- 3 Distribution
- 4 Extra-high voltage
- 5 Anchor bolt
- 6 Lag screw
- 7 Clevis
- 8 Anchor shackle
- 9 Bolted clamp
- 10 Recloser
- 11 Equipotential

مراجع

- [۱] منجذب، محمد رضا و بیتا رضایی موحد. ۱۳۹۸. طراحی مدل پیش‌بینی تلفات در شبکه‌های انتقال و توزیع برق: مقایسه رویکردهای پویایی سیستمی و اقتصادسنجی. پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، جلد (۵) شماره (۳) صفحات ۱۵۱-۱۸۲. دانشگاه خوارزمی، البرز.
- [۲] شرع پسند محمد مهدی، فخری نعیمی و مریم شیرازی. ۱۳۹۴. روند تغییر و توسعه محورهای استانداردسازی. اولین همایش ملی استاندارد با رویکرد استانداردها، ضوابط و مقررات، دانشگاه یزد، یزد.
- [3] Ter-Martirosyan, Anna, and John Kwoka. "Incentive regulation, service quality, and standards in US electricity distribution." *Journal of Regulatory Economics* 38.3 (2010): 258-273.
- [4] Chau, Vinh Sum. "Benchmarking service quality in UK electricity distribution networks." *Benchmarking: An International Journal* (2009).
- [5] Ajodhia, Virendra, Luca Lo Schiavo, and Roberto Malaman. "Quality regulation of electricity distribution in Italy: an evaluation study." *Energy Policy* 34.13 (2006): 1478-1486.
- [6] Brown, Stephen, David Pyke, and Paul Steenhof. "Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market." *Energy Policy* 38.7 (2010): 3797-3806.
- [7] Alonzo. Robert. J. 2010. *Electrical Codes, Standards, Recommended Practices and Regulations: An Examination of Relevant Safety Considerations*. William-Andrew. London. 2010.
- [8] <https://www.iec.ch>

۴-۲- طراحی سیستم‌های توزیع

استاندارد IEEE C2 الزامات طراحی و استفاده از سیستم‌های انتقال و توزیع ولتاژ پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا را بیان کرده است. این استاندارد برای سیستم‌های توزیع و ایستگاه‌های فرعی در تاسیسات صنعتی قابل استفاده می‌باشد. این استاندارد الزامات ایمنی حداقلی برای رساناهای برق‌دار، جاده‌ها، سازه‌ها، بیلبردها، همچنین الزامات جداسازی ایمن بین رساناهای خطوط انتقال هوایی و فاصله مجاز از بخش‌های برق‌دار در ایستگاه‌های فرعی توزیع را ارائه می‌کند. بخش دوم این استاندارد، معیارهای بار برای بار مکانیکی ناشی از باد و یخ روی رساناها و سازه‌های هوایی نگهدارنده آنها شامل بازوهای روی تیرها، فنداسیون‌ها و لنگرها، سازه‌های بتنی، سیمان تقویت شده و چوب را تعیین می‌کنند. این بخش از استاندارد همچنین کم‌ترین الزامات برای عایق‌ها را تعیین کرده است. بخش سوم استاندارد به خطوط زیرزمینی برق و مخابرات می‌پردازد. راهنماهای مسیریابی کابل‌ها، از جمله توصیه‌های جداسازی خطوط مخابراتی از خطوط برق دفن شده زیرزمین، لوله‌کشی، خطوط فاضلاب، فنداسیون‌ها، کم‌ترین عمق دفن و ملاحظات ایمنی کارکنان مانند کم‌ترین فاصله نزدیک شدن برای کار روی جریان متناوب برق‌دار در این بخش آورده شده‌اند. استانداردهای IEEE C 2 و NFPA 70 طراحی ایمن سیستم‌های انتقال و توزیع با ولتاژ تا هشت صد و چهارده کیلوولت ارائه می‌دهند. استاندارد بیان شده همچنین فاصله مجاز زمین، سازه و جاده را که برای تضمین ایمنی عمومی درون و اطراف سیستم‌های توزیع و انتقال برق می‌کند. جدول (۱۰) برخی از استانداردهای موجود در زمینه طراحی سیستم توزیع برق را فهرست کرده است. این استانداردها حوزه‌هایی چون خطوط انتقال هوایی، صرفه‌جویی در انرژی و محاسبات را در مرحله طراحی در بر می‌گیرند. استاندارد IEEE 902 به دلیل در بر داشتن نکات مهمی در خصوص ایمنی، در مرحله طراحی نیز مفید بوده از این‌رو در این جدول آورده شده است.

جدول ۱۰: استانداردهای طراحی سیستم توزیع برق

موضوع	استاندارد
تابلوهای فشار ضعیف	IEC 60947
مونتاژ تابلوهای فشار ضعیف	IEC 61439
توزیع برق برای کارخانجات صنعتی	IEEE 141
اتصال زمین برای تاسیسات برق صنعتی و تجاری	IEEE 142
سیستم برق قدرت برای ساختمان‌های تجاری	IEEE 241
حفاظت و هماهنگی عایقی برای تاسیسات برق صنعتی و تجاری	IEEE 242
آنالیز تاسیسات برق صنعتی و تجاری	IEEE 399
برق اضطراری تاسیسات صنعتی و تجاری	IEEE 446
طراحی تاسیسات برق صنعتی و تجاری با قابلیت اطمینان	IEEE 493
محاسبات اتصال کوتاه برای تاسیسات برق صنعتی و تجاری	IEEE 551
صرفه‌جویی در انرژی و برنامه‌ریزی مقرون به صرفه در تاسیسات برق صنعتی	IEEE 739

طراحی و بهینه‌سازی نانو آنتن‌های آرایه‌ای نوری چند لایه به منظور افزایش تمرکز میدان الکتریکی

وحید خوشدل

استاد راهنما: دکتر مهرداد شکوه صارمی
دانشگاه فردوسی مشهد

توسعه تئوری، طراحی و پیاده‌سازی ساختار جدید فیلتر هیبرید قدرت تک‌فاز موازی

محمدصادق کرباس فروشان
استاد راهنما: دکتر محمد منفرد
دانشگاه فردوسی مشهد

از آنجایی که نانو ذرات فلزی توانایی دریافت و انتقال امواج الکترومغناطیسی نوری و تمرکز میدان نوری راه دور به راه نزدیک را دارند، از آنها به عنوان نانو آنتن‌های نوری نام برده می‌شود. نانو آنتن‌ها توانایی محدود کردن نور در ابعادی کمتر از حد پراش را دارند. این رفتار آنها ناشی از نوسانات تجمعی الکترون‌های هدایت در نزدیکی مرز فلز-عایق در فرکانس‌های نوری است. در نانو ذرات فلزی، این پدیده تشدید پلاسمون سطحی موضعی نامیده می‌شود. در این حالت، به دلیل برهم کنش قوی بین نور با الکترون‌های فلز، پارامترهای پراکندگی، جذب و میدان الکتریکی موضعی به مقدار چندین برابر ابعاد نانو ذره افزایش می‌یابند. از آنجایی که تمرکز میدان الکتریکی در نانو آنتن‌ها می‌تواند طیف وسیعی از کاربردها را پیش روی آنها قرار دهد، در طی سال‌های اخیر روش‌های مختلفی جهت بهبود و افزایش تمرکز گرایی میدان الکتریکی در نانو آنتن‌ها و افزایش کارایی آنها پیشنهاد شده‌اند. استفاده از ابعاد و هندسه‌های مختلف در نانو آنتن‌ها و تولید تزویج الکترومغناطیسی بین ساختارهای نزدیک به هم از راه حل‌های رایج برای بهبود و مهندسی شدت میدان راه نزدیک و تقویت میدان الکتریکی نانو آنتن‌های نوری هستند.

در این رساله در کنار استفاده از روش‌های مرسوم در جهت افزایش تمرکز گرایی نوری، روش استفاده از ساختارهای چند لایه و مرکب نیز بررسی و مطالعه شده است. تغییرات طیف نوری در هنگام عبور موج نوری از مرزها و همچنین چگونگی توزیع میدان الکتریکی در بین لایه‌های مختلف در ساختارهای مرکب مورد تحلیل قرار گرفته است. نانو ساختارهای پیشنهادی شامل هندسه‌هایی به شکل مستطیلی، L شکل، پاپیونی و بیضوی هستند که به صورت ساختارهای دوباره و با لایه‌های متناوب عایقی و فلزی جهت افزایش پارامتر تمرکز گرایی ارائه شده‌اند. همچنین تحلیل امپدانس یک نانو آنتن چند لایه مورد مطالعه قرار گرفته و مدار معادلی برای آن پیشنهاد شده است. پاسخ نوری میدان‌های راه دور و نزدیک هر یک از نانو آنتن‌های پیشنهادی شامل طیف‌های انتقالی، بازتابی و جذبی، توزیع چگالی بار و تغییرات میدان الکتریکی به ازای ضخامت و تعداد لایه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با توجه به اهمیت مطالعه و بررسی نقش تعداد لایه‌ها و جنس مواد به کار رفته در هر یک از ساختارها، نانو ساختارهای ارائه شده در این رساله به صورت طبقات دوتایی، سه تایی، چهار تایی و پنج تایی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آنها از جهت تمرکز گرایی میدان الکتریکی مقایسه شده‌اند. تشدیدهای رخ داده در ساختارهای چند لایه و برهم کنش بین آنها با کمک تئوری تشدید هیبریداسیون پلاسمون تحلیل شده‌اند و نتایج نشان داده‌اند که به کارگیری ساختارهای چند لایه باعث ظاهر شدن مدهای پیوندی به صورت هم‌فاز و ناهم‌فاز می‌شود. تمام ساختارهای مرکب پیشنهادی توسط روش انبوه ذرات مورد بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند و مطابق نتایج به دست آمده، ساختارهای چند لایه‌ی پیشنهادی

امروزه شاهد رشد روزافزون استفاده از بارهای غیر خطی و تزریق مؤلفه‌های هارمونیک این بارها به شبکه قدرت هستیم. فیلترهای هیبرید قدرت مرسوم به عنوان یک راهکار مطلوب جبران‌سازی هارمونیک جریان شبکه قدرت معرفی می‌گردند. در این فیلترها علی‌رغم کاهش قابل ملاحظه ولتاژ لینک DC مبدل، همچنان جریان زیادی به دلیل اتصال سری فیلتر غیرفعال و فیلتر فعال از کلیه‌های نیمه‌هادی قدرت عبور می‌کند. در ساختار جدید فیلتر هیبرید معرفی شده در این رساله، اندوکتانس فیلتر غیرفعال با فیلتر فعال موازی شده و بدین ترتیب جریان فیلتر فعال نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. این رساله به توسعه تئوری، مدل‌سازی، طراحی عناصر فیلتر، ارائه یک روش تولید جریان مرجع بهبود یافته و طراحی یک سیستم کنترل با عملکرد بالا برای ساختار جدید می‌پردازد. در این رساله، مشخصه‌های جبران‌سازی و میرایی ساختار جدید بررسی شده و طراحی عناصر مبتنی بر یک الگوریتم منظم و پایدار انجام می‌گیرد. همچنین، روش تولید جریان مرجع بهبود یافته معرفی شده دقیق بوده و از اغتشاشات بار نیز مصون است. سیستم کنترل پیشنهادی نیز به نحوی طراحی می‌گردد که عدم قطعیت‌ها و تغییر پارامترهای فیلتر و همچنین تغییرات امپدانس شبکه تأثیر ناچیزی بر عملکرد جبران‌سازی جریان شبکه بگذارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های عملی تأیید کننده مباحث تئوری مطرح شده در این رساله می‌باشند.

کلمات کلیدی:

فیلتر هیبرید قدرت، فیلتر فعال قدرت، فیلتر LCL، جبران‌سازی هارمونیک، تولید جریان مرجع، کنترل کننده خودتنظیم تطبیقی، کنترل کننده ضربان مرده دیجیتال

می‌توانند تا بیش از دو برابر ساختارهای تمام فلزی میدان الکتریکی را متمرکز کنند. در ساختارهای سه لایه نقره-عایق با درصد فلزی ۳۳٪، به ترتیب هندسه‌های پاپیونی، مستطیلی، بیضوی و L شکل بهترین عملکرد در تمرکز میدان الکتریکی را ارائه می‌دهند. کارایی همه‌ی ساختارهای پیشنهادی در کاربردهای حسگری ضریب شکست توده و مولکولی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و با توجه به نتایج حاصل شده، نانو آنتن‌های پیشنهادی توانایی خوبی در حوزه‌ی حسگری و سنجش مولکولی نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی:

پلاسمون سطحی، تمرکز میدان الکتریکی، مدهای ترکیبی، نانو آنتن چند لایه

کاهش هزینه دوربری کوانتومی در طراحی مدارهای کوانتومی توزیعی

داود دادخواه

استاد راهنما: دکتر سید ابراهیم حسینی، دکتر مریم زمردی مقدم
دانشگاه فردوسی مشهد

بهبود همزمان شفافیت و پایداری در تعامل دو طرفه انسان و ربات جراح با کمترین تهاجم به کمک کنترل کننده امیدانس هوشمند

مهدی سوزنجی کاشانی

استاد راهنما: دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی
دانشگاه فردوسی مشهد

طراحی و ساخت سیستم‌های کوانتومی با قدرت محاسباتی بالا هنوز بطور جدی محقق نشده است. از با اهمیت‌ترین چالش‌ها در موضوع سیستم‌های کوانتومی، به کارگیری سیستم کوانتومی توزیعی به عنوان یک راه حل مناسب برای غلبه بر محدودیت‌های ناشی از تعداد کیوبیت‌ها بالا و ارتباطات بین آنها می‌باشد. مدارهای کوانتومی توزیعی مدل گسترش یافته مدارهای کوانتومی به شمار می‌روند. این مدارها شامل مجموعه‌ای از زیرسیستم‌های کوانتومی می‌باشند و باید بتوان اطلاعات کوانتومی را با کمک دوربری کوانتومی بین زیرسیستم‌ها منتقل کرد. بنابراین چالش هزینه دوربری کوانتومی بحث مهمی در این مدارها می‌باشد. ارائه الگوریتم‌ها برای این مدار، کمک قابل توجهی به طراحی و توسعه مدارهای کوانتومی توزیعی خواهد کرد که باعث کاهش تعداد دوربری کوانتومی می‌شود. با توجه به اینکه ارتباط بین کیوبیت‌ها در سیستم کوانتومی توزیعی هزینه بر می‌باشد، باید به دنبال یک راه حل برای کاهش هزینه ارتباطی باشیم. که در همین راستا، دو روش پیشنهادی در رساله ارائه خواهد شد. در روش پیشنهادی نخست، به منظور کاهش ارتباطات، از جایگذاری مدارهای کوانتومی معادل و ساده سازی دروازه‌ها استفاده می‌شود. سپس، با ارائه یک الگوریتم تکاملی پیشنهادی، افزایشی را بر روی مدار کوانتومی ساده شده اعمال می‌کنیم. این روش باعث ایجاد یکسری زیر سیستم‌ها در مدار کوانتومی می‌شود و مدار کوانتومی توزیعی با حداقل تعداد ارتباطات را تشکیل می‌دهد. روش پیشنهادی اول تعداد دوربری کوانتومی را به میزان ۵۵٪ نسبت به روش‌های دیگر بهبود می‌دهد. همچنین در روش پیشنهادی دوم رساله، با کمک مرتب سازی تصادفی جایگاه کیوبیت‌ها و مدل سازی گراف، از دو الگوریتم افزایشی ژنتیک و جستجوی تابو اصلاح شده به طور جداگانه برای افزایشی گراف استفاده می‌کنیم و کمترین تعداد دوربری کوانتومی حاصل شده را به عنوان بهترین نتیجه در نظر می‌گیریم. روش پیشنهادی دوم تعداد دوربری کوانتومی را به میزان ۷۰٪ نسبت به روش‌های موجود کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی:

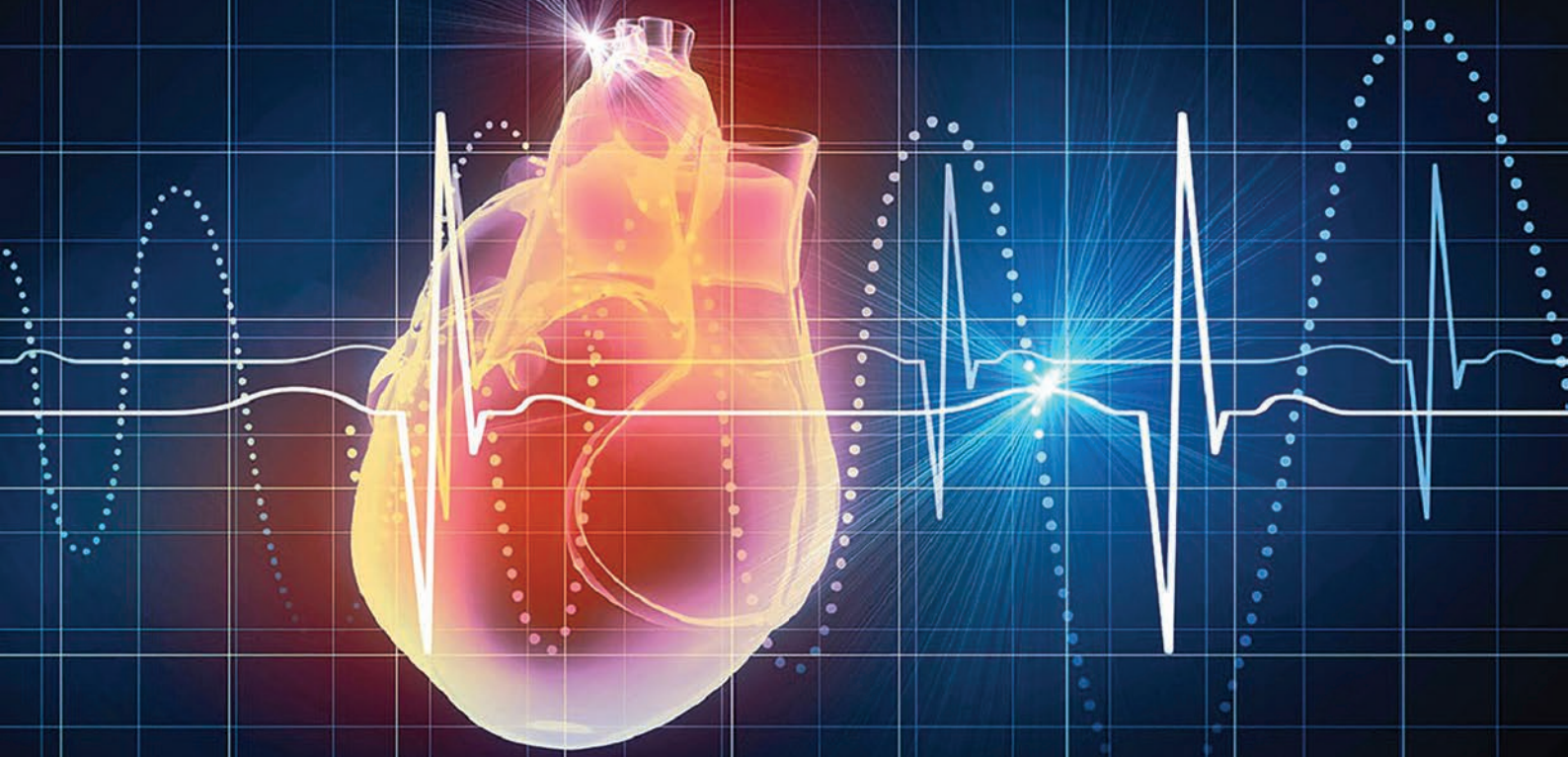
محاسبات کوانتومی، دوربری کوانتومی، الگوریتم ژنتیک

کلمات کلیدی:

سیستم جراحی از راه دور، شفافیت، کنترل مقاوم، راهبرد کنترل ولتاژ

جراحی با کمترین تهاجم به دلیل دقت بالای مورد نیاز برای جابه جایی ابزار آلات به عنوان یکی از مهم ترین زمینه های جراحی رباتیک از راه دور محسوب می شود. از جمله چالش هایی که در این مساله وجود دارد می توان به محدودیت فضای کاری، وجود انعطاف پذیری در سیستم انتقال قدرت، عدم قطعیت پارامتری و دینامیک مدل نشده ربات اشاره کرد. از طرفی وجود تأخیر زمانی نیز در سیستم انتقال اطلاعات باعث بروز صدمات جبران ناپذیری به بیمار می شود. همچنین وجود بحث هایی نظیر پایداری، عملکرد، شفافیت (احساس کامل اپراتور از محیطی که ربات کاربر در آن قرار دارد)، مقاوم بودن در برابر انواع عدم قطعیت و تطبیق پذیری سیستم در شرایط مختلف سبب شده است تا کنترل نیز به عنوان مساله ای حیاتی در این حوزه مطرح شود. بزرگترین ایراد کنترل کننده های موجود این است که به دینامیک غیر خطی و همراه با عدم قطعیت های فراوان ربات وابسته هستند. از طرفی مشاهده می شود که در پژوهش های جدیدتر مربوط به این حوزه برای سادگی مدل سازی ربات، از دینامیک محرکه ها صرف نظر می شود که این کار دقت سیستم را کاهش می دهد. در نتیجه در این رساله به دنبال آن هستیم تا برخلاف تحقیقات پیشین مدل جامعی برای غلبه بر این چالش ها ارائه دهیم تا دقت پزشک افزایش یابد و از طرفی بیمار احساس امنیت خاطر بیشتری پیدا کند.

در این رساله با طراحی یک ربات جراح که ترکیبی از ربات های موازی و سری با مفاصل انعطاف پذیر است محدودیت فضای کاری در جراحی رباتیک را برطرف می کنیم. از طرفی سیستم های کنترلی پیشنهادی را بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ طراحی می کنیم تا محاسبات کمتر و عملکرد و دقت بهتری داشته باشند. در ابتدا برای آن که کارایی ربات طراحی شده در شرایط مختلف مورد بررسی قرار بگیرد کنترل کننده های مختلفی از جمله کنترل کننده مقاوم بر مبنای سیگنال های حیاتی، کنترل کننده مقاوم مود لغزشی با استفاده از تخمینگر فازی تطبیقی غیرمستقیم و کنترل کننده امیدانس مقاوم بر مبنای جبران ساز زمان تأخیر را طراحی و پیاده سازی تئوری و آزمایشگاهی می کنیم. سپس از این ربات در سیستم جراحی از راه دور استفاده می کنیم. کنترل کننده ربات های کارفرما و کاربر به گونه ای طراحی شده است که پایداری ورودی محدود خروجی محدود (BIBO) نیز برای سیستم فراهم شود. از طرفی موضوع اساسی در تعامل انسان و ربات جراح ایجاد یک مصالحه بین شفافیت و پایداری است. زیرا این دو معیار، از اساسی ترین مسائل این حوزه تحقیقاتی می باشند و با یکدیگر در تضاد هستند. با استفاده از روش یادگیری عاطفی مغز در طراحی کنترل کننده ربات های کارفرما و کاربر و استفاده همزمان از شروط همگام سازی و شفافیت به جای ایجاد مصالحه بین این دو معیار به دنبال بهبود همزمان آنها هستیم. همچنین با استفاده از تئوری پایداری مطلق و معیار لوولین میزان تأخیر مجاز در سیستم کنترل از راه دور را نیز محاسبه می کنیم.



مقاله علمی-ترویجی

بررسی روش‌های استخراج پیک R در سیگنال ECG

■ محسن عباسی جنت آباد*، استادیار گروه مهندسی برق مؤسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران، abbasi@khorasan.ac.ir
 ■ پریسا تیموری برآبادی، مؤسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران، p.teymori2010@gmail.com
 (* نویسنده مسئول)

چکیده

سیگنال الکتروکاردیوگرام (ECG) نشان دهنده فعالیت الکتریکی قلب است که شامل سه موج P، کمپلکس QRS و T است. تشخیص پیک‌های R و در نتیجه کمپلکس‌های QRS، در سیگنال ECG از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و اطلاعاتی در مورد ضربان قلب و ناهنجاری‌های احتمالی فراهم کرده و در نتیجه به تشخیص بیماری‌های قلبی کمک می‌کند. در این مقاله، روش‌های مختلف استخراج پیک R مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها شامل الگوریتم PT، الگوریتم GR، الگوریتم UNSW، الگوریتم عملگر انرژی تیگر (TEO)، الگوریتم تحلیل ساختاری سیگنال، تبدیل هیلبرت، تبدیل موجک، فیلترهای وفتی، الگوریتم‌های تکاملی و شبکه‌های عصبی می‌باشند. همچنین عملکرد این روش‌ها بر اساس معیارهای حساسیت، پیش‌بینی مثبت، دقت و نرخ خطای تشخیص ارزیابی شده که از بین روش‌های اشاره شده، الگوریتم‌های TEO، تبدیل هیلبرت و شبکه عصبی کانولوشنی (CNN) از نرخ خطای تشخیص پایین‌تری برخوردارند.

کلمات کلیدی: پیک R، تبدیل موجک، تبدیل هیلبرت، سیگنال ECG، شبکه عصبی.

Stusy of R Peak Extraction Methods in ECG Signal

■ Mohsen Abbasi-Jannatabad*, Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering, Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran, abbasi@khorasan.ac.ir

■ Parisa Teymouri Barabadi, Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran, p.teymori2010@gmail.com

*Corresponding Author

Abstract

The electrocardiogram (ECG) signal shows the electrical activity of the heart, which includes three P, QRS and T waves. The detection of R peaks and, as a result, QRS complexes, is very important in the ECG signal and provides information about the heart rate and possible abnormalities, thus helping to diagnose heart diseases. In this article, different R peak extraction methods have been investigated. These methods include PT algorithm, GR algorithm, UNSW algorithm, Tiger Energy Operator (TEO) algorithm, signal structural analysis algorithm, Hilbert transform, wavelet transform, adaptive filters, evolutionary algorithms and neural networks. Also, the performance of these methods has been evaluated based on the criteria of sensitivity, positive prediction, accuracy and detection error rate, which among the mentioned methods, TEO algorithm, Hilbert transform and convolutional neural network (CNN) have a lower detection error rate.

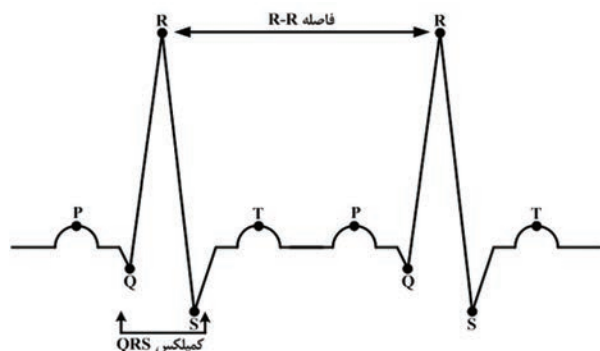
Keywords: R peak, wavelet transform, Hilbert transform, ECG signal, neural network.

۱- مقدمه

بیماری‌های قلبی طیف وسیعی از شرایطی که قلب را تحت تأثیر قرار می‌دهد، توصیف می‌کند. این بیماری‌ها در حال حاضر جزء سه علت اول مرگ و میر انسان در سراسر دنیا هست. بیماری‌های زیر مجموعه بیماری‌های قلبی شامل: عروق کرونر (در این بیماری، عروق کرونر که مواد غذایی، اکسیژن و خون را به ماهیچه قلب می‌رسانند، معمولاً به‌خاطر جمع شدن کلسترول در آن‌ها، آسیب می‌بینند، این لایه‌های کلسترولی باعث نازک شدن رگ‌ها و در نتیجه نرسیدن خون و اکسیژن کافی به قلب می‌شود. بیماری عروق کرونر می‌تواند خطر سکته قلبی یا انفارکتوس را افزایش دهد. ایسکمی نوعی از بیماری عروق کرونر است که در آن جریان خون به عضله قلب کاهش می‌یابد، بنابراین قلب، اکسیژن و مواد غذایی به اندازه کافی دریافت نمی‌کند، که به این حالت آنزین گفته می‌شود). بیماری آریتمی (تپش نامنظم قلب) شامل تکیکاردی (تپش بسیار سریع قلب)، برادیکاردی (تپش خیلی آرام قلب) و فیبریلاسیون (ضربان نامنظم قلب) می‌باشد. بلوک قلبی یا بلوک شاخه‌ای بر سیستم الکتریکی قلب تأثیر می‌گذارد. بلوک قلبی درجه یک شامل اختلالات جزئی ضربان قلب مانند ضربان یکی در میان است. بلوک قلبی درجه دو زمانی رخ می‌دهد که بعضی از سیگنال‌های الکتریکی هرگز به قلب نمی‌رسند و باعث عدم ایجاد ضربان می‌شود. بلوک قلبی درجه سوم یا کامل هنگامی است که سیگنال‌های الکتریکی بین دهلیز بالای و پایینی قلب حرکت نمی‌کنند و خطر جدی حمله قلبی وجود دارد.

در کاربردهای ECG، تشخیص صحیح پیک‌های R برای تشخیص ناهنجاری‌هایی مانند آریتمی و هیپرتروفی^۲ بطنی بسیار مهم است. همچنین تشخیص پیک‌های R و کمپلکس QRS در یک سیگنال ECG، اطلاعاتی در مورد ضربان قلب، سرعت هدایت، شرایط بافت‌های داخل قلب، عوارض و پاسخ آن بیمار در برابر داروهای مختلف را آشکار می‌سازد. تحلیل سیگنال ECG و تشخیص دقیق نقاط مشخصه، نقش مهمی در شناسایی ناهنجاری‌های قلبی دارد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، سیگنال ECG شامل پیک‌های P، کمپلکس QRS و T می‌باشد که به ترتیب نمایانگر دپلاریزاسیون دهلیزی (انقباض حفره‌های بالای قلب)، دپلاریزاسیون بطنی (انقباض حفره‌های پایین قلب) و قطبی شدن بطن (انبساط حفره‌های پایین قلب) می‌باشد. کمپلکس QRS، بخش اصلی سیگنال ECG بوده و پیک R، قسمت اصلی آن است. بنابراین، تشخیص خودکار پیک‌های R در سیگنال ECG مهم‌ترین مرحله برای تشخیص اختلالات قلبی و تحلیل تغییرات ضربان قلب است. عملکرد این سیستم‌ها به شدت به دقت تشخیص پیک R بستگی دارد. پس از تعیین مکان پیک‌های R، سایر اجزای سیگنال مانند امواج P و T را می‌توان بسته به پیک R با توجه به مکان آن‌ها نسبت به کمپلکس QRS محاسبه کرد. روش‌های تشخیص دقیق محل پیک‌های R شامل مرحله پیش پردازش، تشخیص ویژگی‌ها و تصمیم‌گیری می‌باشد. به طور کلی در مرحله پیش پردازش از تکنیک‌های مختلف پردازش سیگنال برای برجسته کردن کمپلکس QRS و از بین بردن نویز استفاده می‌شود.

مرحله تشخیص ویژگی‌ها شامل مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی است که ساختار سیگنال ECG بدون نویز را حفظ می‌کند. مرحله تصمیم‌گیری شامل مجموعه‌ای از قوانین ابتکاری و تکنیک‌هایی برای تشخیص محل دقیق پیک R است که این آستانه‌ها به طور دوره‌ای بر اساس دامنه، مدت زمان و فاصله زمانی دو پیک R



شکل ۱: پیک‌های سیگنال ECG [۱]

متوالی (بازه RR) تشخیص داده می‌شوند. در این مقاله، با مرور مقالات مختلف، روش‌های مختلف استخراج پیک R مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها شامل الگوریتم PT^۳، الگوریتم GR^۴، الگوریتم UNSW^۵، الگوریتم TEO^۶، شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN)^۷ الگوریتم تحلیل ساختاری سیگنال، تبدیل هیلبرت، تبدیل موجک، فیلترهای وفتی، الگوریتم‌های تکاملی می‌باشند. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده در مقالات، این روش‌ها با معیارهای دقت، حساسیت، پیش‌بینی مثبت و نرخ خطای تشخیص، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲- مرور روش‌های تشخیص کمپلکس QRS

۱-۲- الگوریتم PT

در مقاله [۲]، کمپلکس‌های QRS بر اساس تجزیه و تحلیل شیب، دامنه و عرض زمانی تشخیص داده شده است. این الگوریتم، شامل مراحل فیلترینگ خطی، تبدیل غیرخطی و قانون تصمیم‌گیری می‌باشد. دیاگرام بلوکی الگوریتم آشکارساز QRS در شکل (۲) نشان داده شده است. این الگوریتم به‌طور خودکار آستانه‌ها و پارامترها را به‌صورت دوره‌ای تنظیم می‌کند [۳]. فیلتر میان‌گذر، تشخیص‌های نادرست از انواع مختلف تداخل در سیگنال‌های قلبی را کاهش می‌دهد. مشتق‌گیر، شیب موج R را اصلاح می‌کند. مجذور کردن سیگنال باعث می‌شود که شیب منحنی پاسخ فرکانسی مشتق‌گیر بیشتر شود. پنجره انتگرال‌گیر متحرک، موجی را به وجود می‌آورد که شامل اطلاعاتی در مورد شیب و عرض زمانی QRS است. در این الگوریتم، دو سطح آستانه جهت آشکارسازی کمپلکس QRS و کاهش خطا در نظر گرفته شده است. عیب اصلی این الگوریتم، تمرکز آن بر روی داده‌های تمیز است که با استفاده از الکترودهای چسب زلی که در مکان‌های دقیق اعمال می‌شود، جمع‌آوری شده است [۴].

۲-۲- الگوریتم GR

این الگوریتم، دقت و مصرف پایین منابع در زمان واقعی را مورد بررسی قرار داده است. این الگوریتم بر اساس مشتق‌گیری، میانگین پنجره متحرک و مربع کردن در مرحله پیش پردازش و تعیین سطح آستانه پویا برای آشکارسازی پیک R، عمل می‌کند. سیگنال و آشکارسازی پیک‌های قلبی می‌باشد. مرحله آستانه گذاری بر اساس حالت محدود ماشین تعیین می‌شود که مقدار سطح آستانه بر اساس ارزیابی از جمله مزایای این الگوریتم، کاهش زمان محاسباتی نسبت به الگوریتم‌های PT و UNSW می‌باشد [۵]. دیاگرام بلوکی الگوریتم GR در شکل (۳) آورده شده است.

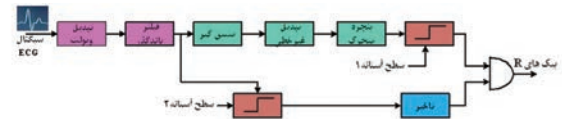
می گیرند. مزیت اصلی این الگوریتم، عملکرد خوب آن نسبت به سایر الگوریتم‌ها با توجه به انواع مختلف ثبت سیگنال ECG به کمک الکترودهای فلزی خشک است [۴].

۲-۴- الگوریتم TEO

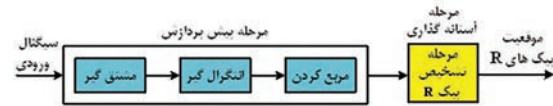
در این الگوریتم یک روش بهبود یافته برای علامت‌گذاری پیک‌های R ارائه شده است. در ابتدا از تجزیه فوریه (FDM) برای حذف نویز استفاده می‌شود. با افزایش کمپلکس‌های QRS، توسط عملگر TEO می‌توان دقت تشخیص پیک‌های R را بهبود بخشید. از تبدیل هیلبرت (H^1) و آشکارساز عبور از صفر (ZCD^1) برای علامت‌گذاری پیک‌های R استفاده می‌شود [۶]. روش پیشنهادی برای شناسایی دقیق پیک‌های R در شکل (۵) نشان داده شده است.

FDM با استفاده از بانک فیلتر فاز صفر مبتنی بر DFT^1 و $IDFT^1$ ، سیگنال داده را به چند باند فرکانسی تقسیم کرده و سیگنال فیلتر شده را از مؤلفه‌های فرکانس مورد نیاز بازسازی می‌کند. در مرحله دوم، یک نرمال سازی دامنه و TEO برای تأکید بر کمپلکس‌های QRS محاسبه می‌شود. TEO فرکانس لحظه‌ای سیگنال را می‌دهد و همچنین نسبت به تغییرات ناگهانی حساس‌تر است. از TEO برای پردازش غیرخطی استفاده می‌شود. سیگنال TEO تولید شده عملکرد پیک R را افزایش داده و سهم قابل توجهی در یافتن پیک‌های R در این الگوریتم دارد. مرحله سوم، با استفاده از ترکیب HT و ZCD، برای تشخیص پیک‌های R طراحی شده است که تشخیص دقیق بیشینه محلی با یافتن نقاط عبور از صفر در تبدیل هیلبرت سیگنال TEO امکان پذیر است و در نهایت، می‌توان با پیش بینی نقاط عبور از صفر بر روی سیگنال اصلی ECG، پیک R اصلی در سیگنال ECG را تشخیص داد.

مزیت این الگوریتم، این است که به دلیل استفاده از تجزیه فوریه (برای حذف تداخل خطوط برق بدون تأثیر بر مکان پیک‌های R)، اپراتور انرژی تیگر و تبدیل هیلبرت، عملکرد آن نسبت به سایر الگوریتم‌ها برتری داشته و بطور قابل توجهی دقت و حساسیت تشخیص پیک‌های R را افزایش می‌دهد [۶].



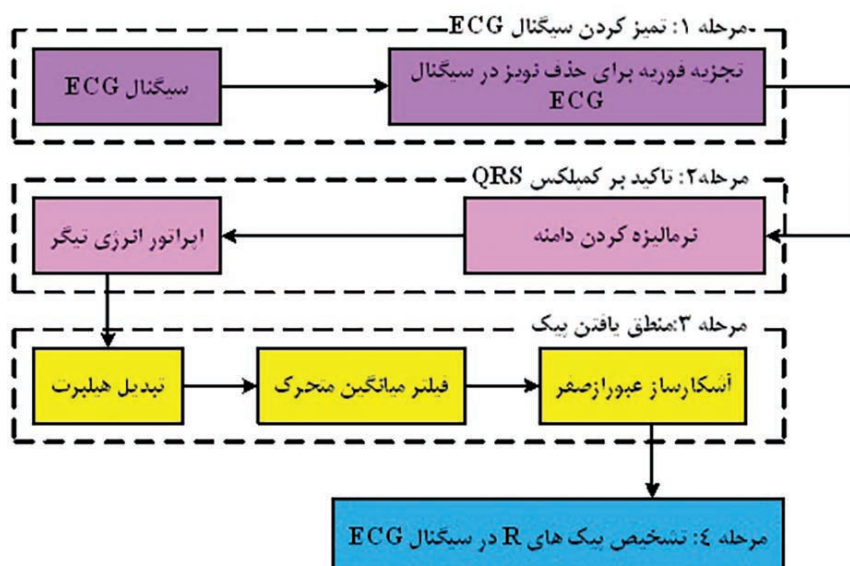
شکل ۲: دیاگرام بلوکی آشکارساز پیک موج QRS [۳]



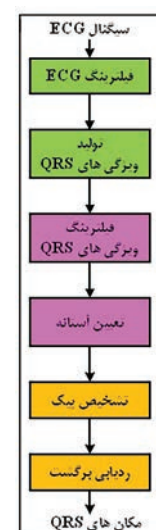
شکل ۳: دیاگرام بلوکی الگوریتم آشکارسازی کمپلکس QRS [۵]

۲-۳- الگوریتم UNSW

الگوریتم UNSW با استفاده از اطلاعات دامنه سیگنال ECG و یک مشتق گیر که با محتوای فرکانسی سیگنال ECG کنترل می‌شود و نیز یک سطح آستانه و فقی، پیک‌های R را تشخیص می‌دهد. دیاگرام بلوکی این الگوریتم در شکل (۴) آورده شده است. در مرحله فیلترینگ ECG، ابتدا سیگنال ECG به یک فیلتر میانگین با عرض $0.5/0$ ثانیه برای حذف خط پایه اعمال می‌شود. سپس، سیگنال از یک فیلتر میان‌گذر در بازه فرکانسی 0.7 تا 20 هرتز، با استفاده از یک فیلتر با پاسخ ضربه نامحدود (IIR^8) برای حفظ اجزاء فرکانسی پیک کمپلکس QRS عبور داده می‌شود. در مرحله تولید ویژگی‌های QRS، ویژگی‌های QRS بصورت ترکیبی از مشتق و ویژگی‌های دامنه سیگنال ECG فیلترشده، محاسبه می‌شود. در مرحله فیلترینگ ویژگی‌های QRS، فرکانس‌هایی که بالاتر از فرکانس اصلی در سیگنال ویژگی QRS است، تضعیف می‌شود. در مرحله تعیین آستانه، یک آستانه و فقی به‌عنوان بخشی از دامنه سیگنال ویژگی QRS، در پنجره‌هایی با مدت زمان متغیر، فیلتر شده است. در مرحله تشخیص پیک، آشکارساز پیک به سیگنال ویژگی QRS فیلتر شده برای شناسایی کمپلکس‌های QRS اعمال می‌شود. در مرحله ردیابی برگشت، نواحی حاوی QRS که احتمالاً از دست رفته یا اشتباه شده، دوباره مورد بازبینی قرار

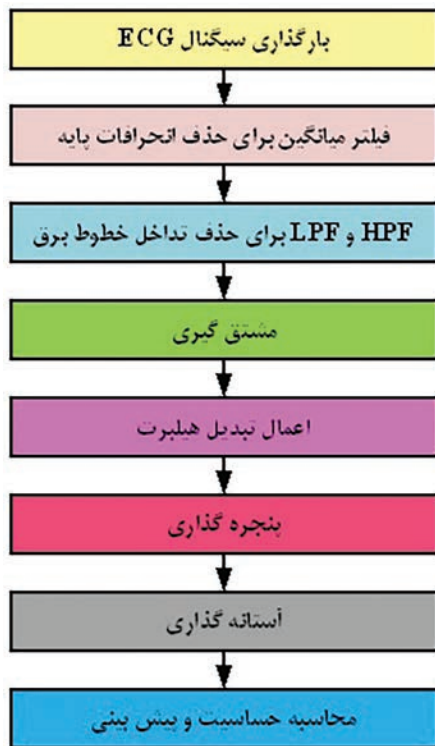


شکل ۵: دیاگرام بلوکی روش بهبود یافته علامت گذاری پیک R [۶]



شکل ۴: دیاگرام بلوکی گام‌های

الگوریتم UNSW [۴]



شکل ۷: دیاگرام بلوکی الگوریتم تشخیص QRS براساس تبدیل هیلبرت [۱۰]

و کمینه محلی را برای تشخیص تغییرات شیب به سرعت تغییر می‌دهد. این کار تشخیص پیک‌های R را فراهم می‌کند که باعث افزایش سیگنال از Q به R می‌شود. حداکثر شیبی که با کاهش سیگنال R به S سیگنال ECG بدست می‌آید، مکان پیک R را نشان می‌دهد. از تبدیل هیلبرت، به طور کلی به منظور فراهم آوردن پیک‌های برجسته‌ای از سیگنال در محل پیک‌های R استفاده می‌شود. از پنجره‌گذاری برای کاهش نشتی استفاده می‌شود، اما نشتی به طور کامل از بین نمی‌رود. در واقع، آن‌ها فقط شکل نشتی را تغییر می‌دهند. در این روش از پنجره بارتلت^{۱۵} استفاده شده است که اثرات نمونه‌های نهایی را کاهش می‌دهد. فیلترهایی که با استفاده از این پنجره طراحی شده‌اند، ناحیه‌گذار گسترده‌تری دارند. در نتیجه، لازم است که فیلتر مرتبه بالاتری مورد استفاده قرار گیرد تا ناحیه‌گذار حفظ شود. آستانه‌ها به صورت پویا با توجه به ارزیابی نویز سیگنال محاسبه می‌شوند. آستانه از ۳۵ درصد بالاترین مقدار در طول پنجره انتخاب شده است و نقاطی که از این مقدار فراتر باشند، به عنوان نقاط QRS انتخاب می‌شوند.

از جمله مزایای تبدیل هیلبرت، می‌توان به افزایش قدرت تفکیک امواج R از امواج P و T و نیز افزایش دقت تشخیص پیک R اشاره نمود. علاوه بر این، مشکلات مربوط به رانش خط پایه، مصنوعات حرکتی و نویز عضلانی را به حداقل می‌رساند. از دیگر مزایای این الگوریتم می‌توان به سادگی نسبی، حساسیت و ویژگی تشخیص بالا و کاهش خطاهای زمانی در اندازه‌گیری فواصل R-R اشاره کرد [۱۱].

عیب اصلی تبدیل هیلبرت عدم توانایی تمایز بین پیک‌های غالب در مواردی مانند، ایسکمی قلبی و بیماری‌های که در آن دامنه پیک R کم است مانند، فیبریلاسیون بطنی می‌باشد [۱۱].

۲-۵- الگوریتم تحلیل ساختاری سیگنال

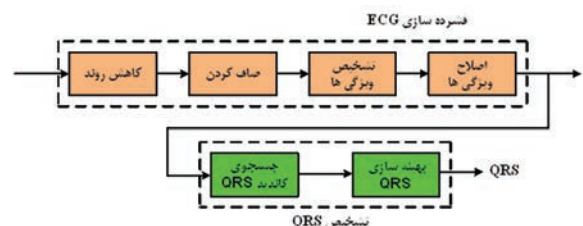
در این الگوریتم، یک روش سریع برای تشخیص کمپلکس QRS بر اساس یک تحلیل ساده از ساختار زمانی ECG ارائه می‌شود. سیگنال ECG در چند مرحله شامل حذف نویز، تشخیص ویژگی و تحلیل ویژگی، پردازش می‌شود [۷]. دیاگرام بلوکی این الگوریتم در شکل (۶) نشان داده شده است.

بخش فشرده سازی ECG، به حذف نویز و توصیف سیگنال ECG با استفاده از برجسته‌ترین ویژگی‌های ساختاری آن می‌پردازد که شامل چهار مرحله کاهش روند، صاف کردن، تشخیص ویژگی و اصلاح ویژگی می‌باشد.

در مرحله کاهش روند، نویز ایجاد شده بر اثر تنفس، فعالیت‌های عضلانی و نویز ایجاد شده بر اثر برخی امواج، با گذاشتن یک فیلتر میان‌گذر حذف می‌شود. مرحله صاف کردن، وظیفه حذف نویز فرکانس بالاگذر از سیگنال ECG مرحله قبل را دارد. بجز فیلترهای پایین‌گذر^{۱۶}، روش‌های مختلفی برای دستیابی به این هدف وجود دارد که به طور عمده بر اساس پنجره‌های لغزان است [۸]. هدف از مرحله تشخیص ویژگی، استخراج مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی است که ساختار سیگنال ECV صاف شده را حفظ می‌کند. هدف از مرحله اصلاح ویژگی، کاهش تعداد ویژگی‌ها با گروه بندی آن‌هایی است که خیلی نزدیک به امواج ECG واقعی هستند. با استفاده از این روش، نسبت فشرده‌سازی افزایش می‌یابد و تشخیص QRS بهبود می‌یابد. قسمت تشخیص QRS شامل جستجوی کاندید QRS و بهینه سازی QRS می‌باشد. مرحله جستجوی کاندید QRS، وظیفه پیدا کردن مجموعه اولیه که شامل تمام کمپلکس‌های QRS است، را برعهده دارد که بیشتر این تشخیص‌ها با توجه به سطح آستانه صورت می‌گیرد و در نهایت بهینه‌سازی کمپلکس QRS با استفاده از پنجره لغزان است [۹].

۲-۶- تبدیل هیلبرت

در این روش، سیگنال ECG از پیش پردازش شده به همراه یک پنجره برای افزایش کمپلکس‌های QRS، تحت تبدیل هیلبرت قرار می‌گیرد تا با تنظیم آستانه، پیک‌های R را شناسایی کند. دیاگرام بلوکی این روش در شکل (۷) آورده شده است [۱۰]. مرحله پیش پردازش سیگنال ECG شامل حذف انحرافات پایه با استفاده از فیلتر میانگین است. فیلتر میانگین یکی از روش‌های فیلترینگ دیجیتال غیرخطی است که برای حذف نویز استفاده می‌شود. از فیلتر میانگین به طور گسترده در پردازش سیگنال دیجیتال استفاده می‌شود، زیرا در شرایطی خاص، لبه‌ها را حفظ و نویز را از بین می‌برد.

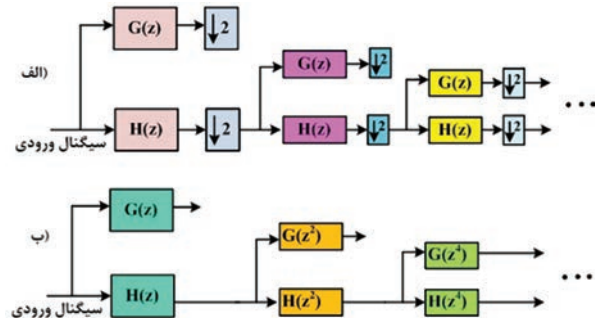


شکل ۶: دیاگرام بلوکی تحلیل ساختاری سیگنال [۷]

برای از بین بردن نویز عضلانی، تداخل موج T و حذف تداخل خطوط برق از فیلتر میانگین استفاده می‌شود. برای یافتن نرخ تغییر در سیگنال ECG، از مشتق‌گیر استفاده می‌شود که بیشینه

۷-۲- تبدیل موجک

روش‌های حذف نویز مبتنی بر تبدیل موجک را می‌توان به دو دسته، روش‌های مبتنی بر آستانه‌گذاری و روش‌های فیلترینگ تقسیم کرد [۱۲]. برای سیگنال‌های زمان گسسته، تبدیل موجک گسسته (DWT^۶) مطابق الگوریتم مالات^{۱۷} معادل یک بانک فیلتر هشت‌تایی به‌عنوان آشکارساز از سلول‌های یکسان و فیلترهای پاسخ ضربه محدود (FIR^{۱۸}) بالاگذر^{۱۹} و پایین‌گذر پیاده‌سازی شده است. فیلترهای FIR در قسمت (الف) شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: دو بانک فیلتر پیاده سازی DWT [۱۲]

در قسمت (الف)، فیلتر افزودنی نمایش سیگنال را به‌عنوان اثرات جانبی حذف می‌کند که زمان نمایش سیگنال را تغییر داده و تفکیک زمانی ضرایب موجک را برای افزایش مقیاس‌ها کاهش می‌دهد. قسمت (ب)، برای حفظ تغییرناپذیری زمانی و وضوح زمانی در مقیاس‌های مختلف، از نرخ نمونه‌گیری یکسان در همه مقیاس‌ها استفاده می‌شود. در مقاله [۱۳] دو الگوریتم کاهش نویز و تشخیص پیک R بر اساس DWT بیان شده است. دیاگرام بلوکی این الگوریتم در شکل (۹) آورده شده است.



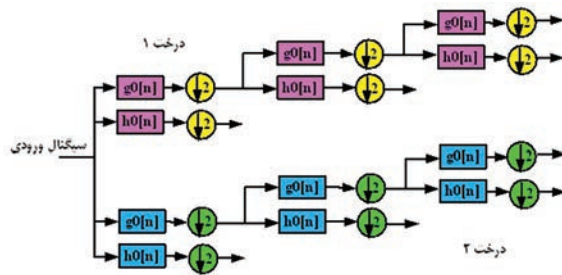
شکل ۹: دیاگرام بلوکی الگوریتم حذف نویز [۱۳]

مرحله دوم تشخیص موج R است. دیاگرام بلوکی این مرحله در شکل (۱۰) آورده شده است.



شکل ۱۰: دیاگرام بلوکی الگوریتم تشخیص پیک R [۱۲]

پس از بازسازی سیگنال ECG، از قدرمطلق ضرایب انتخاب شده برای مکان‌های کمپلکس QRS استفاده می‌شود. استفاده از پنجره تطبیقی برای آشکارسازی پیک‌های R می‌باشد. برای تعیین آستانه، موقعیت بیشینه مقدار در پنجره تطبیقی در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم از دو سطح آستانه استفاده شده است. آستانه اولی برای جستجوی پیک R استفاده می‌شود در صورتی که فاصله دو پیک بیشتر از $1/4$ برابر میانگین فاصله RR باشد، دوباره جستجو آغاز می‌شود و از آستانه دومی برای تشخیص دوباره پیک R استفاده می‌شود. آستانه اول، 0.35 برابر حداکثر پیک و آستانه دوم، 0.2 برابر بیشینه پیک می‌باشد و آخرین مرحله، تشخیص موقعیت بیشینه مقدار پیک R در بازه مشخص می‌باشد. در مقاله [۱۴] تبدیل موجک پیچیده دو درختی^{۲۰} که دیاگرام بلوکی آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. روش تبدیل موجک دو درختی از دو DWT تشکیل شده است که



شکل ۱۱: تجزیه چند سطحی دو درختی CWT [۱۴]

DWT اول قسمت حقیقی و DWT دوم قسمت موهومی را می‌دهد. این دو DWT حقیقی از دو فیلتر مجزا استفاده می‌کند که هر کدام شرایط بازسازی کامل را برآورده می‌کند. این تکنیک تا چهار سطح از تجزیه را برای محاسبه قدرمطلق ضرایب حقیقی و موهومی اجرا می‌کند [۱۶]، [۱۵].

از جمله مزایای تبدیل ویولت می‌توان به افزایش سرعت پردازش و بهبود دقت تشخیص پیک‌ها و کمپلکس QRS در سیگنال ECG برای شناسایی ناهنجاری‌ها، اشاره نمود [۱۷].

مشکل اصلی روش‌های آستانه‌گذاری تبدیل ویولت در سیگنال ECG، ایجاد اعوجاج در سیگنال بهبود یافته می‌باشد. مشکل دیگر در تشخیص پیک R، حساسیت به نویز است [۱۸].

۸-۲- فیلترهای وقتی

سیگنال‌های ECG شامل انواع نویز مانند نویز ماهیچه‌ای، انحرافات خط پایه و تداخل خطوط برق می‌باشد. در [۱۹]، برای از بین بردن این اغتشاشات از فیلترهای وقتی استفاده می‌شود. معماری سیستم در شکل (۱۲) آورده شده است.

شکل (۱۲)، چهارچوب کلی الگوریتم را نشان می‌دهد که شامل بدست آوردن سیگنال ECG از یک پایگاه داده فیزیونست^{۲۱}، طراحی با استفاده از فیلتر LMS برای از بین بردن اغتشاشات، دریافت شکل موج بدون نویز، شناسایی کمپلکس QRS و تشخیص پیک R و نرخ ضربان قلب^{۲۲} می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، همگرایی فیلترهای LMS و NLMS^{۲۳} برای بدست آوردن بهترین خروجی ساخته شده است. خروجی فیلتر LMS به‌عنوان ورودی به فیلتر NLMS برای دریافت سیگنال ECG بدون نویز، تغذیه می‌شود [۲۰].

از جمله مزایای استفاده از فیلترهای وقتی در تحلیل سیگنال ECG، می‌توان به کاهش نویز و در نتیجه افزایش کیفیت سیگنال اشاره نمود. البته بایستی از همگرایی روش وقتی اطمینان حاصل کرد که این همگرایی، با توجه به نوع الگوریتم می‌تواند مدت زمانی به طول بیانجامد که این مورد به‌عنوان یکی از معایب این روش‌ها در تحلیل بهنگام سیگنال ECG مطرح است.

۹-۲- الگوریتم‌های تکاملی

در مقاله [۲۱] یک الگوریتم برای تشخیص دقیق کمپلکس QRS ارائه شده است. در این الگوریتم یک فیلتر پیش پردازش و یک فیلتر میان‌گذر برای حذف نویز و تداخل خطوط برق اعمال شده است. پس از حذف نویز، از ترکیب روش K امین نزدیک‌ترین همسایه (KNN^{۲۴}) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^{۲۵}) برای تشخیص دقیق کمپلکس QRS در سیگنال ECG با مورفولوژی‌های مختلف استفاده می‌شود. دیاگرام بلوکی الگوریتم KNN برای تشخیص پیک R در شکل (۱۴) آورده شده است.

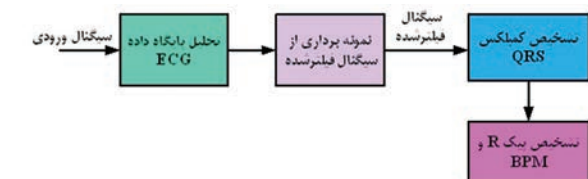
یک مدل CNN که عمدتاً از بلوک‌های کانولوشنی و شبکه‌های (SENet)^(۳) تشکیل شده است که دارای سرعت و عملکرد بالایی بوده و به خوبی تعمیم می‌یابد. مدل (CRNN)^(۴) شامل یک شبکه عصبی ترکیبی و بازگشتی است. نتایج این مدل، عملکرد مناسبی را روی چندین پایگاه داده نشان می‌دهد، اما از نظر محاسباتی پیچیده است. هر دو مدل پتانسیل قدرتمند هوش مصنوعی در تحلیل ECG را نشان می‌دهند.

مدل CNN و RNN^(۵) به ترتیب در قسمت (الف) و (ب) شکل (۱۵) نشان داده شده است و در قسمت (ج) ۳ بلوک CNN موازی به دنبال لایه ورودی وجود دارد و بلوک کانولوشن شامل شش لایه کانولوشن یک بعدی است. اولین لایه کانولوشن دارای اندازه هسته یازده است. لایه‌های کانولوشن دوم و سوم روی هم قرار گرفته‌اند و اندازه هسته آن هفت است.

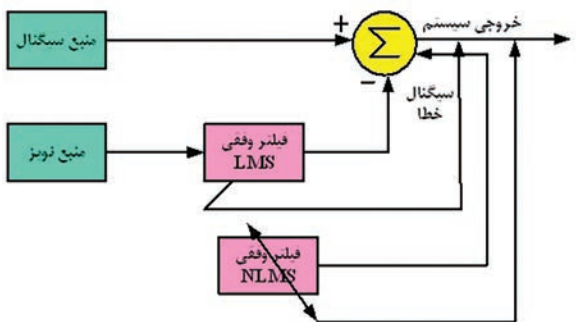
سه لایه کانولوشن باقیمانده نیز با اندازه هسته پنج روی هم قرار می‌گیرند. مجموعه‌های مختلفی از نرخ dilated برای لایه‌های کانولوشن برای این بلوک‌ها طراحی شده است. لایه نرمال سازی دسته‌ای متصل به لایه کانولوشن برای سرعت بخشیدن به روند آموزش و بهبود تعمیم استفاده می‌شود. لایه Max pooling پس از لایه نرمال سازی دسته‌ای برای کاهش ویژگی‌ها در عین حفظ اطلاعات مهم به کار گرفته شده است. سپس ویژگی‌های رده‌بندی استخراج شده توسط بلوک‌های کانولوشن به شبکه‌های SENet وارد می‌شود و به دنبال آن سه لایه به طور کامل متصل می‌شوند. آخرین لایه شبکه، تابع فعال Sigmoid است که برای پیش بینی کمپلکس‌های QRS استفاده می‌شود. همچنین اندازه لایه خروجی یک هشتم اندازه لایه ورودی می‌باشد.

در مقاله [۲۳] یک الگوریتم مبتنی بر شبکه حافظه کوتاه مدت طولانی (LSTM)^(۶) برای تشخیص پیک R معرفی شده است. شبکه‌های LSTM در مدل سازی زمانی که شامل وابستگی‌های بلندمدت می‌شود، برتری داشته و آن را برای تحلیل ECG مناسب می‌سازند. LSTM نوع خاصی از RNN است که قادر به یادگیری وابستگی‌های بلند مدت و به خاطر سپردن اطلاعات برای دوره‌های طولانی مدت به عنوان پیش فرض هستند. مدل LSTM در قالب یک ساختار زنجیره‌ای سازمان‌دهی می‌شود. با این حال ماژول تکرار شونده آن یک ساختار متفاوت دارد که به جای یک شبکه عصبی واحد RNN استاندارد، دارای چهار لایه متقابل با یک ساختار منحصر به فرد می‌باشد [۲۴]. معماری این الگوریتم در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

در مرحله نخست داده‌های ECG و ECG به همراه نویز از پایگاه



شکل ۱۲: معماری سیستم تشخیص پیک R با حذف اغتشاشات توسط فیلترهای ولفی [۱۹]



شکل ۱۳: دیاگرام بلوکی همگرایی الگوریتم‌های LMS و NLMS با هدف حذف اغتشاشات [۱۹]

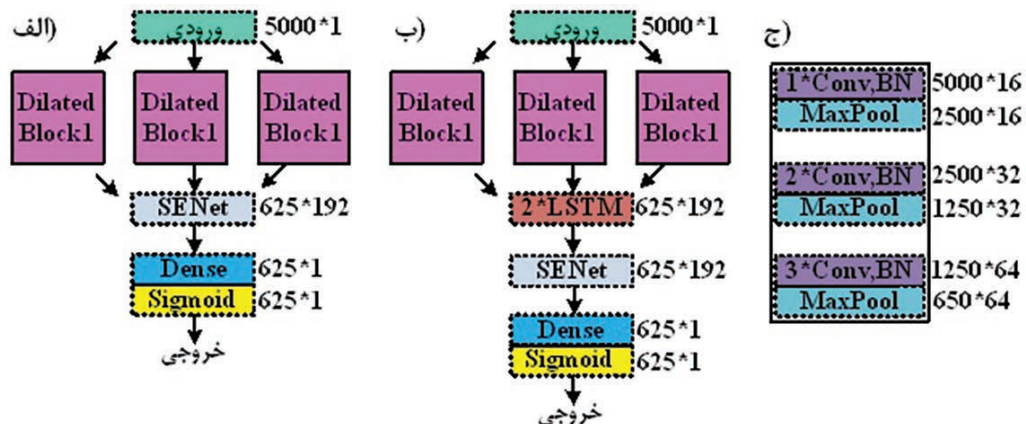


شکل ۱۴: دیاگرام بلوکی الگوریتم پیشنهادی تشخیص پیک R [۲۱]

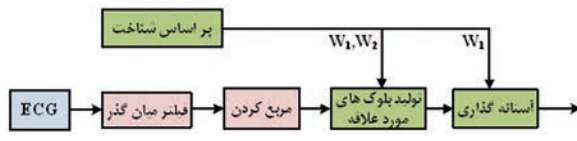
این الگوریتم شامل چهار مرحله است که عبارتند از: فیلتر دیجیتال، بهبود کمپلکس QRS، پیدا کردن پیک بر اساس KNN و انتخاب پارامتر PSO. در مرحله اول الگوریتم پیشنهادی، از فیلتر میان‌گذر برای حذف نویز سیگنال ECG استفاده می‌شود. در مرحله دوم، از یک مشتق‌گیر مرتبه اول پنج نقطه‌ای، قدرمطلق و تجمع عقب گرد برای تأکید بر کمپلکس QRS استفاده می‌شود که این مرحله حیاتی‌ترین نقش را در الگوریتم پیشنهادی ایفا می‌کند. در مرحله سوم، روش پیدا کردن پیک بر اساس KNN برای شناسایی موقعیت‌های دقیق بیشینه محلی انجام شده است و در نهایت با استفاده از الگوریتم PSO، نرخ دقیق پیک R بیشینه می‌شود.

۲-۱۰- شبکه‌های عصبی

در مقاله [۲۲]، یک روش مقاوم در برابر نویز و روش قابل تعمیم برای تشخیص دقیق کمپلکس‌های QRS پیشنهاد شده است. در این روش دو مدل شبکه عصبی عمیق کانولوشنی ارائه شده است.



شکل ۱۵: معماری مدل‌های یادگیری عمیق. (الف) مدل CNN، (ب) مدل RNN، (ج) معماری هر بلوک dilated [۲۲]



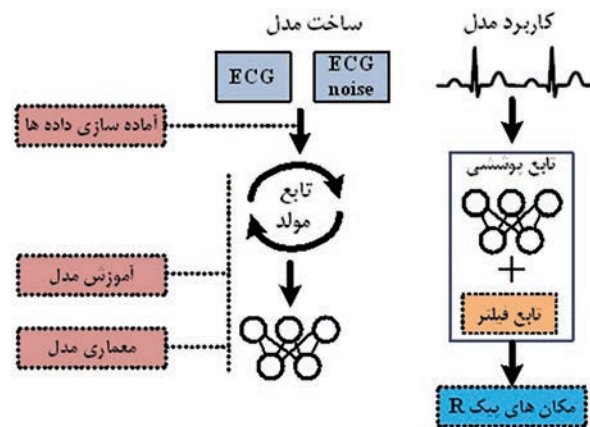
شکل ۱۷: دیاگرام بلوکی الگوریتم تشخیص QRS بر اساس شناخت [۲۵]

در مقاله [۲۶]، معماری LSTM دو جهته^{۳۱} با شبکه‌های عصبی کانولوشن با هدف استخراج ویژگی‌ها برای افزایش عملکرد طبقه‌بندی اجرا شده است. فرآیند BiLSTM به صورت ضربان به ضربان^{۳۲}، که به معنی طبقه بندی شکل موج ECG است، انجام می‌شود. برای بهبود عملکرد طبقه‌بندی، لایه‌های کانولوشن به‌عنوان استخراج ویژگی‌ها با BiLSTM کانولوشنی روی هم انباشته می‌شود. CNN ها می‌توانند ویژگی‌های محلی دنباله ECG را برای تشخیص الگوهای منطقه‌ای در پنجره کانولوشن تولید کنند. لایه کانولوشنی CNN ها به استخراج و یادگیری با اشتراک‌گذاری و اصلاح ویژگی‌های سطح پایین، کمک می‌کند. BiLSTM ها نیز قسمتی از RNN ها است. RNN ها در گذشته با مشکلات گرادین مواجه بودند. مشکلات گرادین ناشی از ماهیت تکرارشونده RN ها هستند که گرادین آن اساساً برابر با ماتریس وزنی بازگشتی است که به توان بالا رسیده است. این توان‌های ماتریس تکرارشونده باعث می‌شود که گرادین بصورت تصاعدی در تعداد مراحل رشد یا کاهش یابد. LSTM با دروازه‌های ضرب شونده که جریان خطای ثابت را از طریق حالت‌های داخلی سلول به اجرا در می‌آورد، استفاده می‌شود.

در مقاله [۲۷] یک سیستم عمومی و مقاوم برای تشخیص پیک R ارائه شده است. در این الگوریتم، یک پیاده‌سازی جدید از شبکه عصبی کانولوشنی تک بعدی (CNN) با یک مدل تأیید برای کاهش تعداد خطاها استفاده می‌شود. معماری CNN از یک بلوک رمزگذار و یک بلوک رمزگشا و به دنبال آن یک لایه طبقه‌بندی نمونه برای ساختن نقشه تقسیم‌بندی تک بعدی پیک‌های R از سیگنال ECG ورودی، تشکیل شده است. دیاگرام بلوکی این معماری در شکل (۱۸) آورده شده است.

لایه ورودی در هر دو مدل، ورودی با اندازه‌های متغیر را می‌پذیرد. طول پنجره در این معماری، ۲۰ ثانیه انتخاب شده، ولی قابل تعمیم به هر اندازه پنجره است. این مدل برای نگاشت سیگنال به سیگنال طراحی شده و شامل شش لایه در بلوک رمزگذار و شش لایه در بلوک رمزگشا با یک لایه خروجی با مجموع ۳۸۲۰۹ پارامتر قابل آموزش است. ورودی توسط رمزگذار از طریق شش لایه کانولوشن با ضریب کاهش نمونه دو، نمونه‌برداری می‌شود. اندازه هسته برای هر دو لایه متوالی ۹، ۶ و ۳ تنظیم شده است. تعداد فیلترها که از شانزده شروع می‌شود، پس از هر دو لایه متوالی، دو برابر افزایش می‌یابد. هر کانولوشن با نرمال سازی دسته‌ای و تابع فعال‌ساز ReLU دنبال می‌شود. در بلوک رمزگشا، بردار ویژگی فشرده شده با همان تعداد کانولوشن انتقالی با پیکربندی معکوس بلوک رمزگذار نمونه برداری می‌شود.

دو دلیل اصلی برای استفاده از لایه نرمال‌سازی دسته‌ای پس از لایه کانولوشن عبارتند از: تعمیم بهبودیافته و سرعت بخشیدن به روند آموزش. برای نمونه برداری از نقشه ویژگی تک بعدی با حفظ اطلاعات مهم، از لایه Max-pooling متصل به لایه نرمال سازی دسته‌ای استفاده می‌شود. ویژگی‌ها با ضریب دو در هر لایه رمزگذار نمونه‌برداری می‌شود. در نهایت، تقسیم‌بندی تک بعدی

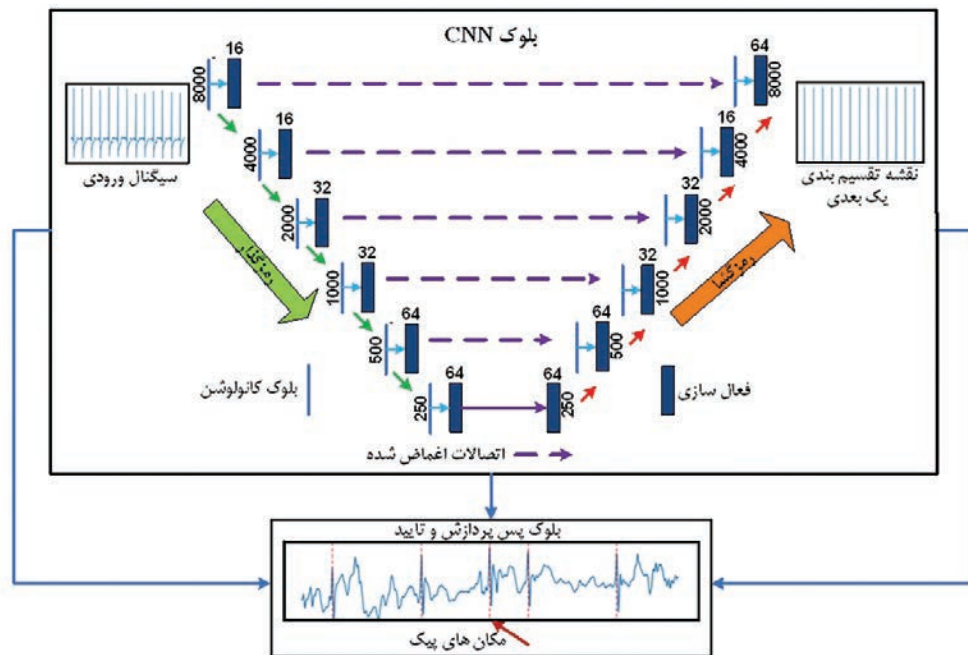


شکل ۱۶: دیاگرام بلوکی تشخیص پیک‌های R مبتنی بر الگوریتم LSTM [۲۳]

داده MIT-BIHDB برای آموزش شبکه LSTM استفاده شده است. قسمت اصلی فرآیند آموزش، تابع مولد بوده که داده‌های آموزشی را با ترکیب کردن سیگنال‌های ECG با نویز ایجاد می‌کند. در مرحله دوم از تابع پوششی برای شناسایی مکان‌های پیک R استفاده می‌شود. همچنین از یک تابع فیلتر استفاده شده که اجازه می‌دهد تا با استفاده از فاصله و پیش بینی مدل به‌عنوان معیار تصمیم، پیک‌های R را که به‌طور غیرطبیعی به وجود می‌آید، فیلتر کند.

روش تشخیص QRS شامل دو فیلتر میانگین متحرک است که بر اساس شناخت، تنها با استفاده از دو پارامتر تنظیم می‌شود. روش پیشنهادی می‌تواند به راحتی در طراحی فیلتر دیجیتالی پیاده‌سازی شود [۲۵].

با توجه به فلوچارت شکل (۱۷)، الگوریتم مبتنی بر شناخت از تصمیم‌گیری در دو مرحله ایجاد بلوک‌های مورد علاقه و آستانه گذاری پشتیبانی می‌کند. انتظار می‌رود که توسعه یک آشکارساز که به شناخت قبلی از ویژگی‌های ECG بستگی دارد، عملکرد کلی و دقت تشخیص را بهبود بخشد. شناخت قبلی از مدت زمان رویدادهای اصلی سیگنال ECG می‌تواند به استخراج ویژگی‌ها کمک کند و از تصمیم‌گیری الگوریتم، پشتیبانی کند. W_1 در تولید بلوک‌های مورد علاقه و آستانه‌گذاری تعیین می‌شود و به‌طور مشابه، میانگین مدت زمان ضربان قلب W_2 را در تولید بلوک‌های مورد علاقه تعیین می‌کند. W_1 و W_2 را می‌توان با شناخت قبلی، مقداردهی اولیه کرد. با این حال، این مدت زمان‌ها از فردی به فرد دیگر متفاوت است. برای حذف نویز در سیگنال ECG از فیلتر میان‌گذر استفاده شده است. سیگنال، نقطه به نقطه مربع می‌شود تا مقادیر بزرگ را افزایش دهد و اجزای فرکانس بالا را تقویت کند. بلوک‌های مورد علاقه با استفاده از دو فیلتر میانگین متحرک تولید می‌شود. فیلتر میانگین متحرک اول برای استخراج ویژگی‌های QRS و فیلتر میانگین متحرک دوم برای استخراج ضربان قلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس، یک آستانه به بلوک‌های تولید شده اعمال می‌شود تا بلوک‌های حاوی پیک‌های R را از بلوک‌هایی که شامل نویز هستند، متمایز کند. هدف از فیلتر میانگین متحرک QRS، صاف کردن چندین پیک مربوط به فواصل کمپلکس QRS به منظور تأکید و استخراج ناحیه QRS می‌باشد و آخرین مرحله پیدا کردن بیش‌ترین مقدار قدرمطلق در هر بلوک (که پیک R است)، می‌باشد.



شکل ۱۸: رویکرد سیستم و معماری شبکه CNN [۲۷]

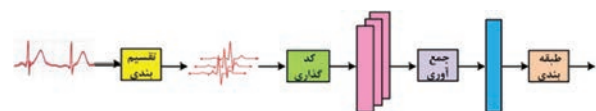
طبقه‌بندی نمایش‌های محاسبه شده برای انجام تشخیص اختلالات قلبی صورت می‌گیرد. در مقاله [۲۹] اطلاعات شکل موج P-QRS-T تولید شده و فعالیت دهلیزی و بطنی با تبدیل موجک برش فرکانس^{۳۵} (FSWT) و ماتریس‌های زمان-فرکانس دوبعدی بدست می‌آید. یک پنجره کشویی برای تبدیل ماتریس‌های زمان-فرکانس دوبعدی به بردارهای ویژگی تک بعدی با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین^{۳۶} (ML)، استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد طبقه‌بندی هسته گوسی ماشین بردار پشتیبان^{۳۷} (GKSVM) براساس بهینه‌سازی بیزین برتری دارد. نمودارهای زمان-فرکانس سیگنال‌های ECG توسط فناوری FSWT بدست می‌آید. سپس ماتریس‌های زمان-فرکانس دوبعدی به بردارهای ویژگی تک بعدی تبدیل می‌شوند و در پایان الگوریتم‌های ML برای طبقه‌بندی بیماری‌ها استفاده می‌شود. مدل FSWT-ML دو مزیت دارد. اول، استخراج و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های سیگنال‌های ECG است که حاوی چندین شکل موج پیوسته QRS-T-P است. دوم، آموزش مدل FSWT-GKSVM با عملکرد بهتر از مدل‌های ML است، این مدل برای دستیابی به تشخیص خودکار بیماری آسان‌تر می‌باشد.

از جمله مزایای شبکه‌های عصبی می‌توان به قدرت بالای یادگیری الگوهای موجود در سیگنال ECG به منظور تشخیص ناهنجاری‌های قلبی اشاره کرد. از طرفی نیازمند حجم داده آموزشی بالا و در نتیجه زمان محاسباتی و پیچیدگی زیاد است که از جمله معایب این شبکه‌ها محسوب می‌شود.

۱۱-۲- مقایسه روش‌ها

در جدول (۱)، روش‌های اشاره شده برای استخراج پیک R بر اساس معیارهای دقت $ACC(\%) = TP / (TP + FN + FP)$ ، حساسیت $SE(\%) = TP / (TP + FN)$ ، پیش‌بینی مثبت $PER(\%) = TP / (TP + FP)$ و نرخ خطای تشخیص $DER(\%) = (FP + FN) / TP$ ، با یکدیگر مقایسه شده‌اند [۶]. در این روابط، TP تعداد تشخیص درست، FP تعداد تشخیص اشتباه، FN تعداد عدم تشخیص اشتباه پیک‌های R است.

خروجی با استفاده از اندازه فیلتر برای عملیات کانولوشن در آخرین لایه تولید خواهد شد. به جز لایه نهایی، تمام لایه‌های کانولوشن در این معماری از تابع فعال ساز ReLU استفاده می‌کنند. در لایه آخر از تابع فعال ساز SoftMax برای بدست آوردن یک نقشه تقسیم بندی تک بعدی برای پیک‌های R استفاده می‌شود. فیبریلاسیون دهلیزی^{۳۳} (AF) یک وضعیت پزشکی جدی است که نیاز به درمان مؤثر و به موقع برای جلوگیری از سکت دارد. در مقاله [۲۸]، برای یادگیری چرخه قلبی و تشخیص مطمئن AF از سیگنال‌های ECG، از شبکه‌های عصبی عمیق^{۳۴} (DNN) استفاده شده که شامل سه مرحله است. ابتدا، سیگنال ثبت شده، به دنباله‌ای از ضربان‌های قلب فرد براساس تشخیص پیک R تقسیم می‌شود. سپس ضربان‌های قلب با استفاده از یک DNN کدگذاری می‌شود که ویژگی‌های قابل تفسیر ضربان قلب را با جدا کردن مدت زمان آن استخراج می‌کند. در مرحله دوم، دنباله کدهای ضربان قلب به یک DNN ارسال می‌شود تا با سیگنالی که ضربان قلب را ثبت می‌کند، ترکیب شود. در مرحله سوم، برای تشخیص AF، نمایش سیگنال به DNN انتقال داده می‌شود. طراحی کلی این روش شامل چهار مرحله است که در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۹: معماری تشخیص فیبریلاسیون دهلیزی [۲۸]

دیگرام بلوکی شکل (۱۹) شامل چهار مرحله بوده که در مرحله اول آن، برش سیگنال اصلی به دنباله‌هایی با طول‌های متغیر که سیگنال را پوشش می‌دهند، انجام می‌شود. در مرحله دوم، رمزگذاری دنباله‌ها برای بدست آوردن یک نمایش با ابعاد کاهش یافته از هر دنباله صورت می‌گیرد. مرحله سوم، جمع‌آوری تمام نمایش‌های دنباله استخراج شده از یک سیگنال به منظور بدست آوردن یک نمایش واحد از کل سیگنال است. در مرحله چهارم،

نویز شود با دقت بالایی پیک کمپلکس QRS را شناسایی کند. این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم PT، الگوریتم GR، الگوریتم UNSW، الگوریتم TEO، الگوریتم تحلیل ساختاری سیگنال، تبدیل هیلبرت، تبدیل موجک، فیلترهای ولفی، الگوریتم‌های تکاملی و شبکه‌های عصبی می‌باشند. به منظور مقایسه عملکرد روش‌های مختلف، معیارهای متفاوتی شامل حساسیت، پیش‌بینی مثبت، نرخ خطای تشخیص و دقت در نظر گرفته شده که از این میان، روش‌های TEO، تبدیل هیلبرت و CNN دارای حساسیت، پیش‌بینی مثبت و دقت مناسبی برخوردار بوده و همچنین دارای نرخ خطای پیش‌بینی پایینی هستند.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Electrocardiogram
- 2 Hypertrophy
- 3 Pan-Tompkins
- 4 Gutiérrez-Rivas
- 5 University of New South Wales
- 6 Teager Energy Operator
- 7 Convolutional Neural Network
- 8 Infinite Impulse Response
- 9 Fourier Decomposition Method
- 10 Hilbert Transformation
- 11 Zero Crossing Detector
- 12 Discrete Fourier Transform
- 13 Inverse Discrete Fourier Transform
- 14 Low Pass Filter

اطلاعات جدول (۱)، بر اساس نتایج اجرای الگوریتم‌های اشاره شده روی داده‌های پایگاه داده MIT-BIH به‌دست آمده است. این پایگاه داده شامل ۴۸ سیگنال ECG با نرخ نمونه برداری ۳۶۰ هرتز بوده که در مدت زمان یک ساعت ثبت شده‌اند. بر اساس نتایج جدول (۱)، روش‌های TEO، تبدیل هیلبرت و CNN نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری در تشخیص کمپلکس QRS دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود حساسیت، پیش‌بینی مثبت و دقت در روش‌های اشاره شده تقریباً با یکدیگر برابر است، ولی نرخ خطای تشخیص در روش‌های TEO، تبدیل هیلبرت و CNN پایین‌تر می‌باشد.

برتری الگوریتم TEO، به دلیل استفاده از مزایای تجزیه فوری، اپراتور انرژی تیگر و تبدیل هیلبرت می‌باشد. با کمک تجزیه فوری می‌تواند سیگنال‌های تداخلی را بطور مؤثر بدون اینکه برمکان‌های پیک مورد نیاز و سایر ویژگی‌های سیگنال تأثیر بگذارد، حذف کند. بنابراین، کمپلکس QRS توسط TEO بهبود یافته‌اند و بطور قابل توجهی دقت تشخیص پیک‌های R را افزایش می‌دهد تا دقت و حساسیت بالایی را به دنبال داشته باشد.

۳- نتیجه‌گیری

کمپلکس QRS مهم‌ترین پیک در سیگنال‌های ECG است. زیرا اطلاعات زیادی درباره وضعیت قلب نشان می‌دهد. الگوریتم‌های گوناگونی ارائه شده تا بتواند در شرایطی که سیگنال ECG دچار

جدول ۱: مقایسه روش‌های مختلف برای استخراج پیک R بر اساس معیارهای دقت، حساسیت، پیش‌بینی مثبت و نرخ خطای تشخیص

شماره ردیف	نوع الگوریتم	شماره مرجع	SE(%)	ACC(%)	PER(%)	DER (%)
۱	PAN-TOPMPKINS	۲	۹۹.۷۶	۹۹.۳۲	۹۹.۵۲	۰.۶۷
۲	GR	۴	۹۹.۵۴	۹۹.۲۸	۹۹.۷۴	۰.۷۲
۳	UNSW	۵	۹۹.۷۷	—	۹۹.۷۹	—
۴	TEO	۶	۹۹.۹۸	۹۹.۹۷	۹۹.۹۸	۰.۱۹
۵	الگوریتم تحلیل ساختار سیگنال	۷	۹۹.۵۷	—	۹۹.۳۷	—
۶	HT	۱۰	۹۹.۹۳	۹۹.۸۳	۹۹.۹۱	۰.۱۷
۷	توصیف سیگنال ECG بر اساس تبدیل موجک	۱۱	۹۹.۸۰	۹۹.۶۵	۹۹.۸۶	۰.۳۴
۸	DWT	۱۲	۹۹.۷۰	۹۹.۳۴	۹۹.۶۵	۰.۶۵
۹	Dual-Tree (CWT)	۱۳	۹۲.۱۱	۸۲.۱۴	۸۸.۴۷	۲۱.۷۳
۱۰	بهینه‌سازی با فیلتر ولفی	۱۶	۹۹.۹۱	۹۹.۹۲	۹۵.۹۳	۱.۴
۱۱	KNN	۱۸	۹۹.۹۴	۹۹.۱۱	۹۹.۱۶	۰.۸۹
۱۲	CRNN	۱۹	۹۹.۲۷	۹۹.۶۷	۹۹.۳۱	۱.۴۲
۱۳	LSTM	۲۰	۹۹.۱۹	۹۹.۱۱	۹۹.۰۷	۰.۸
۱۴	بهینه‌سازی بر اساس شناخت	۲۲	۹۹.۷۸	۹۹.۷۰	۹۹.۹۲	۰.۲۹
۱۵	CNN	۲۴	۹۹.۸۲	۹۹.۸۳	۹۹.۸۵	۰.۲۱
۱۶	LSTM دو جهته	۲۳	۹۷.۵۶	۹۹.۶۰	۹۹.۷۱	—
۱۷	DNN	۲۵	۹۶.۸۴	۹۸.۶۷	۹۲.۱۴	—
۱۸	FSWT	۲۶	۹۶.۴۳	۹۸.۱۵	۹۶.۵۶	—

- 2013 IEEE 15th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom 2013). 2013.
- [14] A. S. Abdulbaqi, S. Aldin, "Feature Extraction and Classification of ECG Signal Based on The Standard Extended Wavelet Transform Technique: Cardiology Based Telemedicine". In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.
- [15] F. M. Ghombavani, K. Kiani, "A powerful novel method for ECG signal de-noising using Different thresholding and Dual Tree Complex Wavelet Transform". in 2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI). 2015.
- [16] J. Sutkovic, A. Jašarević, "A review on Nanoparticle and Protein interaction in biomedical applications". Periodicals of engineering and natural sciences, 2016.
- [17] Z. Peng, G. Wang, "A novel ECG eigenvalue detection algorithm based on wavelet transform". BioMed research international, 2017. pp. 1-12.
- [18] H. Rabbani, M. P. Mahjoob, E. Farahabadi, A. Farahabadi, "R peak detection in electrocardiogram signal based on an optimal combination of wavelet transform, Hilbert transform, and adaptive thresholding". Journal of medical signals and sensors, 2011. 1(2): pp. 91-98.
- [19] P. Sahoo, P. Manohar, "Structural Optimization of Adaptive Filter for ECG Extraction (R-Peak)". International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM), 2021. 7, pp. 1-7.
- [20] P. Zahradnik, M. Šusta, B. Šimák, "Cascade structure of narrow equiripple bandpass FIR filters". IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2016. 64 (4): pp. 407-411.
- [21] R. He, K. Wang, Y. Yuan, N. Zhao, Y. Liu, "A novel method for the detection of R-peaks in ECG based on K-Nearest Neighbors and Particle Swarm Optimization". EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2017. 1: pp. 1-14.
- [22] W. Cia, D. Hu, "QRS complex detection using novel deep learning neural networks". IEEE Access, 2020. 8: pp. 97082-97089.
- [23] J. Laitala, M. Jiang, E. Syrjälä, E. K. Naeini, "Robust ECG R-peak detection using LSTM". in Proceedings of the 35th annual ACM symposium on applied computing.
- [24] S. Hochreiter, J. Schmidhuber, "Long short-term memory". Neural computation, 1997. 9 (8): pp. 1735-1780.
- [25] M. Elgendi, "Fast QRS detection with an optimized knowledge-based method: Evaluation On 11 standard ECG databases". PloS one, 2013. 8 (9): pp. 1-19.
- [26] S. Nurmaini, A. Darmawahyuni, M Rachmatullah, "Beat-to-Beat Electrocardiogram Waveform Classification Based on a Stacked Convolutional and Bidirectional Long Short-Term Memory". IEEE Access, 2021. 9: pp. 92600-92613.
- [27] M. U. Zahid, S. Kiranyaz, T. Ince, "Robust R-Peak Detection in Low-Quality Holter ECGs Using 1D Convolutional Neural Network". IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2021. 69 (1): pp.119-128.
- [28] A. Dubatovka, J. M. Buhmann, "Automatic Detection of Atrial Fibrillation from Single-Lead ECG Using Deep Learning of the Cardiac Cycle". BME Frontiers, 2022. pp. 1-12.
- [29] Y. Yue, C. Chen, P. Liu, Y. Xing, X. Zhou, "Automatic Detection of Short-Term Atrial Fibrillation Segments Based on Frequency Slice Wavelet Transform and Machine Learning Techniques". Sensors, 2021. 21 (16): pp. 1-15.
- 15 Bartlett
- 16 Discrete Wavelet Transform
- 17 Mallat
- 18 Finite Impulse Response
- 19 High Pass Filter
- 20 Dual-Tree Wavelet Transform
- 21 Physionet
- 22 Beat per Minute
- 23 Least Mean Square
- 24 Normalized Least Mean Square
- 25 K-Nearest Neighborhood
- 26 Particle Swarm Optimization
- 27 Squeeze-and-Excitation Network
- 28 Convolutional Recurrent Neural Network
- 29 Recurrent Neural Network
- 30 Long Short-Term Memory
- 31 Bidirectional Long Short-Term Memory
- 32 Beat – to – Beat
- 33 Atrial Fibrillation
- 34 Deep Neural Network
- 35 Frequency Slice Wavelet Transform
- 36 Machine Learning
- 37 Gaussian Kernel Support Vector Machine
- مراجع
- [1] R. Tafreshi, A. Jaleel, J. Jim, L. Tafreshi, "Automated analysis of ECG waveforms with atypical QRS complex morphologies". Biomedical Signal Processing and Control, 2014. 10: pp. 41-49.
- [2] R. Tafreshi, A. Jaleel, J. Jim, L. Tafreshi, "Automated analysis of ECG waveforms with atypical QRS complex morphologies". Biomedical Signal Processing and Control, 2014. 10: pp. 41-49. J. Pan, W. J. Tompkins, "A real-time QRS detection algorithm". IEEE transactions on biomedical engineering, 1985 (3): pp. 230-236.
- [۳] محمدرضا قادری، دکتر حسین بوبرشاد، "روشی بهینه جهت آشکارسازی پیک موج SRQ سیگنال GCE"، همایش ملی مهندسی برق، مخابرات و توسعه پایدار، موسسه آموزش عالی خاوران، شماره ۹، زمستان ۱۳۹۱، صفحات ۱۰-۱.
- [4] H. Khamis, R. Weiss, Y. Xie, C.W. Chang, "QRS detection algorithm for telehealth electrocardiogram recordings". IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2016. 63 (7): pp. 1377-1388.
- [5] R. Gutiérrez-Rivas, J. J. Garcia, W. P. Marnane, "Novel real-time low-complexity QRS complex detector based on adaptive thresholding". IEEE Sensors Journal, 2015. 15 (10): pp. 6036-6043.
- [6] H. Ponnamp, J. H. Shaik, "An Improved R-Peaks Marking Method Using Fourier Decomposition and Teager Energy Operator". Traitement du Signal, 2020. 37 (3), pp.511-518.
- [7] A. Burguera, "Fast QRS detection and ECG compression based on signal structural analysis", IEEE journal of biomedical and health informatics, 2019. 23 (1), pp. 123-131.
- [8] N. M. Arzeno, Z. D. Deng, C.S. Poon, "Analysis of first-derivative based QRS detection algorithms", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2008. 55 (2): pp. 478-484.
- [9] D. Pandit, L. Zhang, C. Liu, S. Chattopadhyay, "A lightweight QRS detector for single lead ECG signals using a max-min difference algorithm". Computer methods and programs in biomedicine, 2017. 144: pp. 61-75.
- [10] P. Valluraah, B. Biswali, "ECG signal analysis using Hilbert transform". in 2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC). 2015.
- [11] H. Beyramienanlou, N. Lotfivand, "ECG signal analysis using Hilbert transform". IEEE Power Communication and Information Technology Conference (PCITC). 2015. pp. 1-5.
- [12] J.P. Martínez, R. Almeida, O. Olmos, "A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases". IEEE Transactions on biomedical engineering, 2004. 51 (4): pp. 570-581
- [13] H.Y. Lin, S. Y. Liang, H. Y. Ho, "Discrete-wavelet-transform based noise reduction and R wave detection for ECG signals".

مروری بر روش‌های ریاضی سنتز منطقی مدارهای کوانتومی

■ آرزو راجایی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، rajaei@mshdiau.ac.ir

■ محبوبه هوشمند*، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، houshmand@mshdiau.ac.ir

■ سید عابد حسینی، گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، hosseyini@mshdiau.ac.ir

*نویسنده مسئول

چکیده

محاسبات کوانتومی یک روش جدید پردازش اطلاعات و حاصل ترکیب مکانیک کوانتومی، علوم کامپیوتر و نظریه اطلاعات کلاسیک است. یک گیت کوانتومی به صورت ریاضی با یک ماتریس یکانی نمایش داده می‌شود. سنتز منطقی مدارهای کوانتومی به فرایند تبدیل یک گیت کوانتومی به یک سری گیت‌های پایه قابل پیاده‌سازی در فناوری‌های کوانتومی گفته می‌شود و به دو دسته کلی مبتنی بر تجزیه و ترکیب تقسیم می‌گردد. در روش‌های دسته نخست با بهره‌گیری از روش‌های تجزیه ماتریسی و در روش دوم با استفاده از ضرب ماتریسی گیت‌ها، مدارهای کوانتومی سنتز می‌شوند. این مطالعه به دسته نخست می‌پردازد که از الگوریتم‌های ریاضی برای دستیابی به مشخصه نهایی مدار کوانتومی بهره گرفته می‌شود.

کلمات کلیدی: روش‌های ریاضی، سنتز مدارای کوانتومی، محاسبات کوانتومی، سنتز تحمل‌پذیر اشکال

A Review on Mathematical Approaches to Quantum Circuit Synthesis

■ Arezoo Rajaei, Department of Computer Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, rajaei@mshdiau.ac.ir

■ Mahboobeh Houshmand*, Department of Computer Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, houshmand@mshdiau.ac.ir

■ Seyyed Abed Hosseini, Department of Electrical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, hosseyini@mshdiau.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

Quantum computing is a new method of information processing based on the concepts of quantum mechanics which leads to strange and powerful events in the field of quantum. Each unitary matrix represents a quantum gate. Synthesis of quantum circuits refers to the process of converting a quantum gate into a series of basic gates implementable in quantum technologies and is divided into two general categories, namely decomposition and composition-based. In the first category, quantum circuits are synthesized by using matrix decomposition methods and in the second category, they are synthesized by using matrix multiplication of gates. This study deals with the first category, which uses mathematical algorithms to achieve the final characteristic of a quantum circuit.

Keywords: Mathematical approaches, Synthesis of quantum circuits, Quantum computing, Fault-tolerant synthesis

۱- مقدمه

در طول چند دهه‌ی گذشته با پیشرفت شگفت‌انگیز فناوری، روند کوچک‌سازی ترانزیستورها در ساخت تراشه‌های کامپیوتری پدیدار شده است، به‌گونه‌ای که امروزه ریزپردازنده‌ها دربرگیرنده‌ی بیش از صدها میلیون ترانزیستور هستند. قانون مور بیان می‌کند که در هر ۱۸ ماه تا دو سال تعداد ترانزیستورهای یک تراشه‌ی الکترونیکی دو برابر می‌شود [۱]. پیروی از قانون مور سبب می‌شود که اندازه‌ی ترانزیستورها در نهایت به اندازه‌ی اتم باشد. در چنین ابعادی قوانین کوانتومی بر ساخت تراشه‌ها حاکم خواهد شد، نه قوانین کلاسیک موجود در طراحی و ساخت تراشه‌های امروزی. بدین منظور، دانشمندان نظریه‌ی جدیدی تحت عنوان محاسبات کوانتومی بیان نمودند که در مقیاس بسیار کوچک، قوانین موردنظر، قوانین مربوط به مکانیک کوانتومی هستند [۲]. محاسبات و فناوری اطلاعات کوانتومی علم پردازش اطلاعات توسط سیستم‌های مکانیک کوانتوم است. این عرصه از علم در حقیقت شامل سه علم نظریه‌ی اطلاعات، علوم کامپیوتر و فیزیک کوانتوم است [۲-۴].

هر ماتریس یکانی نمایش دهنده ریاضی یک گیت کوانتومی است. سنتز مدارهای کوانتومی به فرایند تبدیل یک گیت کوانتومی به یک سری گیت‌های پایه اطلاق می‌شود. مسئله سنتز و بهینه‌سازی مدارهای کوانتومی یک مسئله سخت است [۵]. سنتز مدارهای کوانتومی به دو دسته کلی مبتنی بر تجزیه و ترکیب تقسیم می‌گردد. در روش‌های دسته اول با بهره‌گیری از روش‌های تجزیه ماتریسی مدارهای کوانتومی سنتز می‌شوند. در روش‌های دسته دوم با استفاده از روش‌های جستجو (به خصوص الگوریتم‌های تکاملی) اقدام به یافتن مداری متشکل از کتابخانه گیت‌های موردنظر می‌شود که مقاله مروری [۶] به بررسی این روش‌ها می‌پردازد.

ساختار ادامه این نوشته از این قرار است. در بخش ۲، پیش‌زمینه‌های موردنیاز در رابطه با محاسبات کوانتومی بیان شده‌اند. در بخش ۳ کارهای مرتبط در زمینه سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر ریاضی بررسی شده‌اند. بخش ۴ به جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای کارهای آتی می‌پردازد.

۲- پیش زمینه

۲-۱- تاریخچه محاسبات کوانتومی

محاسبات کوانتومی شاخه جدیدی از پردازش اطلاعات بر مبنای اصول مکانیک کوانتومی است. هرچند هنوز کامپیوترهای کوانتومی کاملاً عملی، ساخته نشده‌اند، اما آینده کامپیوترهای کوانتومی بسیار روشن به نظر می‌رسد.

برای اولین بار در دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰، متخصصین فیزیک و کامپیوتر از قبیل چارلز بنت^۱، پل بنیوف^۲، دیوید دویج^۳ و ریچارد فاینمن^۴ ایده دستگاه محاسباتی بر مبنای مکانیک کوانتومی به دلیل مواجه شدن با محدودیت‌های اساسی محاسبات را مطرح کردند. آن‌ها متوجه شدند که اگر فناوری طبق قانون مور^۵ به جلو رود، اندازه عناصر مداری که بر روی تراشه‌های سیلیکونی تعبیه می‌شود، عاقبت بیشتر از چند اتم نخواهد بود. مشکلی که در اینجا پیش می‌آید این است که در اندازه اتمی، قوانین مکانیک کوانتومی بر رفتار اتم‌ها حاکم هستند، نه قوانین مکانیک کلاسیک.

در سال ۱۹۸۲، فاینمن [۷]، جزو اولین افرادی بود که مدلی انتزاعی را پیشنهاد داد که نشان می‌داد چگونه یک سیستم کوانتومی می‌تواند محاسبات را انجام دهد. سپس در سال ۱۹۸۵، دوستج [۸]، یک مقاله‌ای را منتشر کرد که به‌صورت نظری نشان می‌داد هر فرآیند فیزیکی را

می‌توان به‌طور کامل با یک کامپیوتر کوانتومی مدل کرد.

در سال ۱۹۹۴، شور^۶ با کمک کامپیوترهای کوانتومی توانست روشی را برای شکستن یک مسئله مهم در نظریه اعداد- تجزیه اعداد به عوامل اول [۷] تا [۸] پیدا کند. به‌علاوه او نشان داد که مجموعه‌ای از اعمال ریاضی که برای کامپیوتر کوانتومی طراحی شده‌اند، قابلیت تجزیه اعداد بزرگ را بر روی کامپیوترهای کوانتومی، بسیار سریع‌تر از کامپیوترهای کلاسیک دارند. در نتیجه کشف این روش و الگوریتم جستجوی گراور [۹]، باعث شد دانشمندان زیادی به حوزه محاسبات کوانتومی علاقه‌مند شوند.

۲-۲- اصول محاسبات کوانتومی

در این بخش، اصول محاسبات کوانتومی و تعریف‌های ریاضی مربوطه موردبررسی قرار می‌گیرند.

۲-۲-۱- کیوبیت‌ها

حالات کوانتومی را می‌توان برحسب بردارها و یا با نماد معروف تر براکت^۷ نمایش داد. کت‌ها همانند $|X\rangle$ نمایشگر بردارهای ستونی هستند و عموماً برای توصیف حالات کوانتومی به کار می‌روند. حالت برا $|1\rangle$ را $|X\rangle$ نمایشگر ترانهاده مزدوج^۸ $|X\rangle^T$ است. حالات پایه $|0\rangle$ و $|1\rangle$ را می‌توان به‌صورت $(1,0)^T$ و $(0,1)^T$ بیان کرد. هر ترکیبی از $|0\rangle$ و $|1\rangle$ ، $|\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ ، را می‌توان به‌صورت $(\alpha, \beta)^T \in C^2$ نشان داد. $\langle x|y\rangle$ نمایشگر ضرب داخلی^۹ دو بردار است. برای نمونه چون $|0\rangle$ و $|1\rangle$ عمود هستند داریم: $\langle 0|1\rangle = 0$. نماد $\langle x|y\rangle$ نشان‌دهنده ضرب خارجی^{۱۰} دو بردار است.

یک کیوبیت^{۱۱}، یک بردار یکه، در فضای دو بعدی مختلط است که برای این فضا بردارهای پایه مشخص که با نماد $|0\rangle$ و $|1\rangle$ نمایش داده می‌شوند انتخاب شده‌اند. بردارهای پایه $|0\rangle$ و $|1\rangle$ به ترتیب همتهای کوانتومی بیت‌های کلاسیک ۰ و ۱ می‌باشند. برخلاف بیت‌های کلاسیک، کیوبیت‌ها می‌توانند در هر برهم نهی^{۱۲} از $|0\rangle$ و $|1\rangle$ همانند $|\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ قرار بگیرند که α و β اعداد مختلطی هستند که

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

۲-۲-۲- گیت‌های کوانتومی

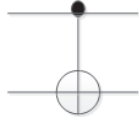
اعمال کوانتومی را می‌توان با شبکه‌ای از گیت‌ها محقق کرد. نمایش ریاضی هر گیت کوانتومی، یک تبدیل خطی است که با یک ماتریس یکانی^{۱۳} مؤثر بر روی فضای n کیوبیتی تعریف می‌گردد. ماتریس U یکانی است اگر $UU^\dagger = I$ که $U^\dagger$ ، ترانهاده مزدوج ماتریس U می‌باشد. ماتریس یکانی عمومی که بر روی n کیوبیت عمل می‌کند، با نماد $U(2^n)$ نمایش داده می‌شود. چون هر عمل یکانی، معکوس‌پذیر است، هر گیت کوانتومی نیز معکوس‌پذیر است. بنابراین اگر خروجی‌های یک گیت کوانتومی را داشته باشیم، می‌توان ورودی‌های متناظر با آن را به‌دست آورد.

از معروف‌ترین گیت‌های تک‌کیوبیتی، اعضای مجموعه پائولی^{۱۴} $P = \{I, X, Y, Z\}$ می‌باشد که از چهار عملگر زیر تشکیل شده است:

$$I \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, X \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, Y \equiv \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, Z \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

I تبدیل همانی^{۱۵}، X گیت چرخش بیت^{۱۶}، Z گیت چرخش فاز^{۱۷} و ترکیبی از هر دو است. اثر این تبدیلات بر روی حالات پایه $|0\rangle$ و $|1\rangle$ به‌صورت زیر است.

$$\begin{aligned} X: |0\rangle &\rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow |0\rangle \\ Y: |0\rangle &\rightarrow i|1\rangle, |1\rangle \rightarrow -i|0\rangle \\ Z: |0\rangle &\rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow -|1\rangle \end{aligned}$$



شکل ۱: نمایش مداری گیت CNOT

گیت‌های $C^k U$ ، بر روی k کیوبیت کنترل و یک کیوبیت هدف عمل می‌کنند. وقتی که تمام k کیوبیت کنترل در حالت $|1\rangle$ باشند، گیت U به کیوبیت هدف اعمال می‌شود.

یک ماتریس مربعی، قطری نامیده می‌شود چنانچه درایه‌های خارج از قطر اصلی آن صفر باشند. یک گیت قطری که بر روی n کیوبیت اعمال می‌شود یک ماتریس یکانی $2^n \times 2^n$ قطری دارد و با نماد Δ_n نمایش داده می‌شود. یک ماتریس مربعی می‌تواند به ماتریس‌های مربعی کوچک‌تری با اندازه‌های مساوی تقسیم شود که بلوک خوانده می‌شوند. اگر بلوک‌های خارج از قطر اصلی صفر باشند، ماتریس قطری بلوکی خوانده می‌شود.

یک مالتی‌پلکسر کوانتومی $[10]$ ، m کیوبیت هدف و $s = n - m$ کیوبیت انتخاب دارد و 2^s ترکیب مختلف خطوط انتخاب مشخص می‌کنند که چه گیت کوانتومی متفاوتی به خطوط هدف اعمال شود. این مجموعه گیت‌ها، در $[11]$ با عنوان گیت‌های به‌طور یکنواخت کنترلی چندکیوبیتی^{۲۲} نامیده و به‌صورت $F_r^s(U(2^m))$ نمایش داده می‌شوند که در آن مجموعه τ کیوبیت‌های هدف را مشخص می‌کند. در حالتی که کیوبیت‌های انتخاب با ارزش‌ترین کیوبیت‌ها باشند، مالتی‌پلکسرهای کوانتومی یک نمایش قطری بلوکی همانند رابطه (۱) دارند که در آنها $0 \leq i \leq 2^{n-m} - 1$ ، $U_i(2^m)$ بلوک‌های روی قطر اصلی هستند و هر $U_i(2^m)$ یک ماتریس یکانی $2^m \times 2^m$ است.

$$U(2^n) = \begin{bmatrix} U_0(2^m) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & U_{2^{n-m}-1}(2^m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

یک خط انتخاب در یک مالتی‌پلکسر کوانتومی همان‌گونه که در $[10]$ استفاده شده است، با $\square$ نمایش داده می‌شود. اگر تنها یک خط انتخاب داشته باشیم، رابطه (۱) به شکل رابطه (۲) در خواهد آمد که در این صورت ماتریس $U(2^n)$ را با نماد $U_0(2^{n-1}) \oplus U_1(2^{n-1})$ نمایش می‌دهیم. اگر کیوبیت اول در حالت $|0\rangle$ باشد، بر روی کیوبیت دوم U_0 ، و اگر در حالت $|1\rangle$ باشد، بر روی کیوبیت دوم U_1 اعمال می‌شود.

$$U = \begin{bmatrix} U_0 & 0 \\ 0 & U_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

در حالتی که تنها یک کیوبیت هدف (با نام t) داریم و گیت‌های کوانتومی اعمال شده در خط هدف R_p, t ، $p \in \{x, y, z\}$ باشند، مالتی‌پلکسر کوانتومی، R_p مالتی‌پلکس شده نامیده می‌شود.

۲-۲-۳- مدارهای کوانتومی

یکی از مدل‌های محاسبات کوانتومی، مدل مداری از گیت‌های کوانتومی است. در این مدل، محاسبات کوانتومی با مدارهای کوانتومی نمایش داده می‌شوند. یک مدار کوانتومی، از مجموعه‌ای از سیم‌های افقی (کیوبیت‌ها) و یک توالی از گیت‌های کوانتومی تشکیل می‌گردد. در این مدل، یک ثابت کوانتومی در یک وضعیت تعریف شده اولیه قرار می‌گیرد. وضعیت آن با یک سری اعمال یکانی (گیت‌ها) بر روی وضعیت اولیه تغییر می‌کند تا به یک وضعیت نهایی برسیم. سپس

این ماتریس‌ها، یکانی و هرمیتی هستند. از دیگر گیت‌های پرکاربرد تک‌کیوبیتی دیگر، گیت‌های دوران به دور محورها x ، y و z با زاویه α هستند که به ترتیب با ماتریس‌های زیر نمایش داده می‌شوند:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} & i \sin \frac{\alpha}{2} \\ i \sin \frac{\alpha}{2} & \cos \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix}$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} & -\sin \frac{\alpha}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} & \cos \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix}$$

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\alpha}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha}{2}} \end{bmatrix}$$

از جمله گیت‌های تک‌کیوبیتی پرکاربرد دیگر، گیت‌های هادامارد^{۱۸} (H) ، گیت فاز^{۱۹} (P) و گیت T است. ماتریس‌های مربوط به این گیت‌ها در ادامه آورده شده است.

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}, \quad P^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/2} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}, \quad T^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{bmatrix}$$

اگر U ، یک گیت تک‌کیوبیتی، با نمایش ماتریسی $U = \begin{bmatrix} u_{00} & u_{01} \\ u_{10} & u_{11} \end{bmatrix}$

باشد، آنگاه، گیت U کنترلی^{۲۰}، گیتی است که بر دو کیوبیت اثر می‌کند به‌طوری که کیوبیت اول، کیوبیت کنترل و کیوبیت دوم، کیوبیت هدف است. اگر کیوبیت کنترلی برابر $|1\rangle$ باشد، گیت یکانی U بر روی کیوبیت هدف اعمال می‌شود و اگر کیوبیت کنترل، $|0\rangle$ باشد، کیوبیت هدف بدون تغییر باقی می‌ماند. نمایش ماتریسی این گیت به‌صورت زیر است:

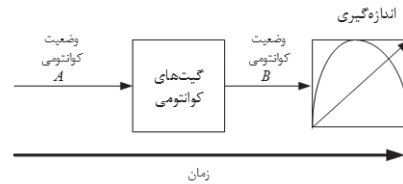
$$\text{Controlled-}U \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_{00} & u_{01} \\ 0 & 0 & u_{10} & u_{11} \end{bmatrix}$$

گیت معکوس کننده-کنترلی^{۲۱}، CNOT، یک گیت دوکیوبیتی است. کیوبیت اول، در نقش کنترل و کیوبیت دوم در نقش هدف است. اگر کیوبیت کنترل، $|1\rangle$ باشد، CNOT، کیوبیت هدف را معکوس می‌کند و اگر کیوبیت کنترل، $|0\rangle$ باشد، کیوبیت هدف بدون تغییر خارج می‌شود. به عبارت دیگر، خروجی دوم، XOR کیوبیت کنترل و هدف می‌باشد. نمایش مداری گیت CNOT به‌صورت زیر است:

$$\text{CNOT} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

شکل (۱) نمایش مداری گیت CNOT را نشان می‌دهد.

وضعیت نهایی در پایه‌های محاسباتی اندازه‌گیری می‌شود. یک مدار کوانتومی همواره از چپ به راست ارزیابی می‌شود؛ بنابراین حرکت از چپ به راست در یک مدار کوانتومی به معنای حرکت به جلو در زمان است [۱۲]. محاسبات کوانتومی که با مدارهای کوانتومی مدل شده، در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: محاسبات کوانتومی که با مدارهای کوانتومی مدل شده است. [۲۱]
مدارهای کوانتومی تفاوت بسیاری با مدارهای کلاسیک دارند از جمله:
• مدارهای کوانتومی فاقد هرگونه دور^{۲۳} و گنجایش خروجی^{۲۴} هستند.
• در مدارهای کوانتومی، تعداد کیوبیت‌های ورودی با تعداد کیوبیت‌های خروجی همیشه یکسان بوده و پیش از عمل اندازه‌گیری، می‌توان از حالت خروجی به حالت ورودی دست یافت.

۲-۴- انواع کتابخانه‌های گیت‌های کوانتومی

چندین کتابخانه از گیت‌های کوانتومی برای سنتز مدارهای کوانتومی معرفی شده‌اند که معروف‌ترین آنها عبارتند:
• کتابخانه گیت‌های پایه‌ای که از گیت‌های CNOT و کلیه گیت‌های کوانتومی تک کیوبیتی تشکیل شده است.
• کتابخانه گیت‌های ابتدایی که از گیت‌های CNOT و گیت‌های دوران تک کیوبیتی تشکیل شده است.
• کتابخانه کلیفورد^{۲۵} T+ (CTL) که از گیت‌های CNOT، H، P و T تشکیل شده است. این کتابخانه یک کتابخانه تقریباً جهانی هست.

۲-۵- معیارهای ارزیابی مدار کوانتومی

• **تعداد گیت‌های تک کیوبیتی و CNOT:** تعداد گیت‌هایی که برای سنتز منطقی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معیاری برای ارزیابی روش‌های سنتز منطقی است. به‌طور کلی بر اساس کتابخانه‌های تعریف‌شده، در مدارهای کوانتومی این هزینه شامل گیت‌های تک کیوبیتی و گیت CNOT تولید شده است.

• **هزینه کل گیت‌ها:** این معیار برابر با تعداد کل گیت‌های تولیدشده در روش سنتز منطقی مدارهای کوانتومی است.

• **عمق مدار:** گیت‌های پایه‌ای که در یک مدار کوانتومی می‌توانند باهم اجرا شوند به‌عنوان یک سطح منطقی^{۲۶} در نظر گرفته می‌شوند [۱۳]. تعداد سطوح منطقی یک مدار، عمق منطقی مدار^{۲۷} نامیده می‌شود. عمق یک مدار کوانتومی C، نشان داده‌شده با D_C ، می‌تواند از رابطه (۳) به دست آید که در آن، T_C تعداد کل گیت‌ها و P_C تعداد گیت‌هایی در مدار C که موازی هستند را نشان می‌دهد.

$$D_C = T_C - P_C \quad (3)$$

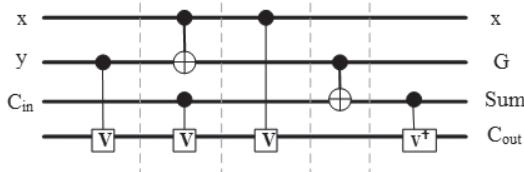
• **هزینه نزدیک‌ترین همسایه (NNC):** یک گیت دو کیوبیتی کوانتومی نظیر g را در نظر بگیرید که در آن کیوبیت کنترل و کیوبیت هدف به ترتیب بر روی خط C و خط t ام مدار قرار گرفته است ($0 \leq c, t < n$). در این صورت NNC^{28} برای این گیت به‌صورت تعریف می‌شود (فاصله بین کیوبیت‌های کنترل و هدف). بر این اساس، NNC برای یک مدار به‌صورت حاصل جمع NNC گیت‌ها خواهد بود.

• **تعداد گیت T^{۲۸}:** تعداد کل گیت‌های T استفاده‌شده در مدار کوانتوم است.

• **عمق گیت^{۲۹} T:** تعداد لایه‌های گیت T در مدار است، جایی که یک لایه شامل عملیات کوانتومی است که می‌تواند به‌طور هم‌زمان انجام شود.

• **تعداد کیوبیت (خطوط) کمکی^{۳۰}:** خطوط کمکی، خطوطی هستند علاوه بر ورودی و خروجی اصلی تابع موردنظر به مدار اضافه می‌شوند و بر مبنای کاربرد به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- دسته نخست حالتی است که کیوبیت‌های کمکی به مدار اضافه می‌شوند تا یک تابع معکوس‌ناپذیر را به یک تابع معکوس‌پذیر تبدیل کنند. در این حالت می‌توان حداقل و حداکثری برای مقدار کیوبیت‌های کمکی موردنیاز برای معکوس کردن مدار، در نظر گرفت.
۲- دسته دوم حالتی است که مدار موردنظر معکوس‌پذیر است؛ به عبارت دیگر با همان تعداد ورودی (خروجی) می‌توان مدار را سنتز کرد؛ اما کیوبیت‌های کمکی به دلایل مختلفی چون کاهش هزینه کوانتومی [۱۴]، [۱۵] و کاهش عمق [۱۶] به مدار اضافه می‌شوند و در الگوریتم‌های سنتز [۱۳] و یا بهینه‌سازی از آن استفاده می‌شود.
مثال ۱: در شکل (۳) یک مدار ساده از نظر هزینه کوانتومی و نیز فشرده شده از نظر عمق برای تمام جمع‌کننده نشان داده شده است [۱۷]. سطوح منطقی مدار با نقطه‌چین از یکدیگر جدا شده‌اند. هزینه کوانتومی این مدار برابر ۶ و عمق آن معادل ۴ است. به دلیل آنکه تعداد کیوبیت‌های درگیر در خط چهارم مدار برابر ۴ است، عمق ۴ در این مدار بهینه خواهد بود. NNC این مدار برابر عدد ۳ است. در این مدار یک کیوبیت کمکی برای معکوس‌پذیر کردن تابع استفاده شده است. تعداد خروجی اصلی این مدار ۲ است، بنابراین ۲ خروجی x و G به‌عنوان خروجی بدون استفاده در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۳: مدار ساده‌شده از نظر هزینه با سطوح منطقی فشرده‌شده برای یک تمام جمع‌کننده [۷۱]

۲-۶- مساله بهینه‌سازی چند هدفه

یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه^{۳۱} را می‌توان را به شکل زیر فرمول‌بندی کرد:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F(x) &= (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ \text{with } x &= (x_1, x_2, \dots, x_m) \in X \\ \text{subject to } g(x) &= (g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x)) \leq 0 \\ x_1 &\in D_1, x_2 \in D_2, \dots, x_n \in D_n \end{aligned}$$

که در آن برداری از m متغیر است، X فضای تصمیم‌گیری است، هر مؤلفه از $F(x)$ ، یک تابع هدف^{۳۲} است و $g(x)$ برداری از k محدودیت^{۳۳} است که یک ناحیه ممکن^{۳۴} X_f را تعریف می‌کند. هر نقطه از $x \in X_f$ یک جواب ممکن^{۳۵} است.

طبقه این تعریف، یک مسئله بهینه‌سازی مقید دارای مجموعه‌ای از متغیرها $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ است که به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی^{۳۶} شناخته می‌شوند. تابعی $F(t)$ با نام تابع هدف بر روی متغیرهای بهینه‌سازی اعمال می‌شود و این تابع بایستی کمینه گردد. همچنین، مجموعه‌ای از قیدها می‌توانند به‌صورت تساوی (=) و یا نامساوی ($\leq$ یا $\geq$) بر روی متغیرهای بهینه‌سازی اعمال شوند. مجموعه‌های $D_1, D_2, \dots, D_n$ به‌ترتیب به‌عنوان

دامنه‌های متغیرهای $x_1, x_2, \dots, x_n$ هستند که می‌توانند به‌عنوان قیدهای دامنه‌ای (یا محدودیت) در مسئله بهینه‌سازی مقید بیان شوند. این نکته لازم است عنوان شود که محدودیت را می‌توان در برخی موارد به‌صورت قیدهای تساوی و یا نامساوی نیز بیان کرد. به‌عنوان مثال، محدودیت نامنفی بودن متغیر x_i را می‌توان به‌صورت قید نامساوی $x_i \geq 0$ نوشت. در بهینه‌سازی چند هدفه، هدف بهینه‌سازی هم‌زمان

بیشتر از یک تابع هدف مختلف و گاه متضاد است. یکی از روش‌های حل بهینه‌سازی چند هدفه، پیدا کردن مجموعه‌ی جواب بهینه پرتو است که در آن مجموعه جواب‌های غیرغالب در تمام فضای جستجو ارائه می‌شود. یک جواب غیرغالب خوانده می‌شود اگر مقدار هیچ یک از توابع هدف آن نتواند بدون خراب کردن برخی دیگر از توابع هدف بهتر شود.

۳- روش‌های سنتز منطقی مبتنی بر روابط ریاضی

حوزه محاسبات کوانتومی مدرن، با کشف توزیع کلید کوانتومی [۱۸]، توانایی ارسال یک بیت کوانتومی به کمک دو بیت کلاسیک و یک بیت درهم تنیدگی (مخابره از راه دور کوانتومی [۱۹])^{۳۸} و توانایی ارسال دو بیت کلاسیک با ارسال یک بیت کوانتومی و یک بیت درهم تنیدگی (کدگذاری چگال کوانتومی [۲۰])^{۳۹} آغاز شد. سپس محققین، تلاش‌های عمیق‌تری برای ترکیب منابع مخابرات کلاسیک، مخابرات کوانتومی و درهم‌تنیدگی برای فرمول‌بندی پروتکل‌های جدید کوانتومی انجام دادند.

برای درک مفهوم سنتز در مدارهای کوانتومی می‌توان آن را با مسئله‌ی سنتز مستقل از تکنولوژی^{۴۰} در دنیای کلاسیک هم‌ارز دانست. در دنیای کلاسیک هنگامی که در سطح بالا توصیفی از عملکرد مدار وجود داشته باشد، در اولین گام سعی می‌شود با استفاده از کتابخانه‌ی گیت‌های پایه‌ی کلاسیک (مانند AND) این توصیف را بیان کرده و تا حد امکان با توجه به محدودیت‌های مداری و بدون در نظر گرفتن بستری که مدار در آن پیاده‌سازی خواهد شد، آن را ساده‌سازی کرد. مشابه این تعریف در دنیای کوانتوم با عملگرهای کوانتومی امکان‌پذیر است.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، روش‌های سنتز مدارهای کوانتومی به دو دسته مبتنی بر تجزیه و مبتنی بر ترکیب تقسیم می‌شوند. در روش مبتنی بر ترکیب از الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌شود. الگوریتم‌های تکاملی از روش‌ها و عملیات ابتدایی برای حل مساله استفاده می‌کنند و در طی یک سری از تکرارها به راه‌حل مناسب برای مسئله می‌رسند. این الگوریتم‌ها غالباً از یک جمعیت حاوی راه‌حل‌های تصادفی شروع می‌کنند و در طی هر مرحله تکرار سعی در بهتر کردن مجموعه راه‌حل‌ها دارند. در آغاز کار تعدادی از اعضای جامعه به‌صورت تصادفی حدس زده شده، سپس تابع هدف یا برازندگی برای هر یک از این اعضا محاسبه و نخستین نسل ایجاد خواهد شد. اگر هیچ یک از معیارهای خاتمه بهینه‌سازی دیده نشوند، ایجاد نسل جدید آغاز خواهد شد. اعضا برحسب میزان شایستگی‌شان برای تولید فرزندان انتخاب می‌شوند. این افراد به‌عنوان والدین محسوب می‌شوند و بازترکیب فرزندان را تولید می‌نمایند. سپس تمامی فرزندان با یک مقدار معینی از احتمال، یعنی همان جهش، تغییر ژنتیکی می‌یابند. اکنون میزان شایستگی (برازندگی) فرزندان تعیین و در اجتماع جایگزین والدین شده و نسل جدید را ایجاد می‌نمایند. این چرخه آنقدر تکرار می‌شود تا یکی از معیارهای پایان بهینه‌سازی کسب شود. این روش‌ها از نظر یافتن به مدار کوانتومی با کاربرد خاص بهینه‌سازی شده، و امکان در نظر گرفتن هم‌زمان چند معیار بهینه‌سازی حائز اهمیت هستند.

یکی از مشکلاتی که در سنتز منطقی کوانتومی مبتنی بر ترکیب وجود دارد محدود بودن تعداد کیوبیت‌ها است، چون فضای جستجوی بسیار بزرگی برای یافتن جواب بهینه وجود دارد و ارزیابی تابع برازندگی برای هر جواب نامزد به زمان زیادی نیاز دارد، به طوریکه در پژوهش‌هایی که تا کنون انجام شده، این نوع سنتز روی مدارهایی با حداکثر تعداد ۵ کیوبیت جواب می‌دهند [۶].

با استفاده از ویژگی‌های ماتریسی مدار و گیت‌های کوانتومی و نیز تعریف گیت‌های خاص و روش‌های تجزیه آنها با توجه به روش‌های تجزیه ریاضی، ماتریس مدار موردنظر به دسته ماتریس‌های خاص که همان گیت‌های کوانتومی هستند، تجزیه می‌شود. در این بخش، مروری بر انواع مختلف روش‌های سنتز مبتنی بر ریاضی صورت می‌گیرد.

۳-۱- استفاده از تجزیه QR در جبر خطی

مقاله [۲۱] نشان می‌دهد که تکنیک‌های استاندارد جبر خطی عددی را می‌توان برای نمایش محاسبات کوانتومی به‌عنوان دنباله‌ای از عملیات کوانتومی ساده که عملگرهای داده‌های کوانتومی نامیده می‌شوند، روی تک کیوبیت‌های کوانتومی استفاده کرد. در نتیجه تعداد گیت‌های CNOT در مرتبه $O(n^3 4^n)$ حاصل می‌گردد.

۳-۲- استفاده از بیش‌ترین کران پایین

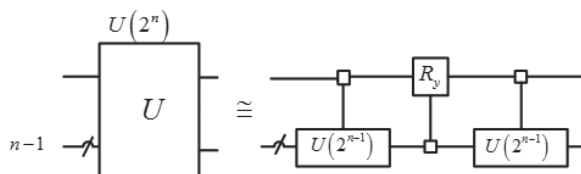
مقاله [۲۲]، مدارهای کوانتومی ارائه می‌دهد که یک عملگر واحد دو کیوبیتی دلخواه را تا یک فاز جهانی شبیه‌سازی می‌کند. برای چندین کتابخانه گیت کوانتومی، ثابت می‌کند که شمارش گیت‌ها در بدترین و متوسط حالت بهینه است به این معنا که بیش‌ترین کران پایین^{۴۲} برای تعداد CNOTها برابر با $\lceil \frac{1}{4}(4^n - 3n - 1) \rceil$ می‌باشد. ذخیره‌سازی موقت استفاده نمی‌شود زیرا پیاده‌سازی فیزیکی گران است. با مشخص شدن این حد مرزی امکان محاسبه فاصله مقادیر محاسبه شده در روش‌های معرفی شده تا حالت بهینه شناخته شده تا کنون (یعنی سنتز با کم‌ترین تعداد CNOT) میسر شده است.

۳-۳- روش تجزیه CS

تجزیه CS [۲۳] برای ماتریس دلخواه یکان $2^{n-1} \times 2^{n-1}$ با نام U ، با استفاده از رابطه (۴) انجام می‌شود که در این رابطه ماتریس‌های R_1, L_1, L_2 و R_2 ماتریس‌های یکانی $2^{n-1} \times 2^{n-1}$ و C و S ماتریس‌های $2^{n-1} \times 2^{n-1}$ یکانی قطری با مقادیر حقیقی هستند به‌طوری‌که $C^2 + S^2 = I_{n-1}$.

$$U = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & S \\ -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

سمت چپ و راست رابطه (۴)، گیت‌های به‌طور یکنواخت کنترل‌ی چند کیوبیتی هستند. ماتریس میانی، ساختار یکسانی با گیت R_y ماتریس پلکس شدهای دارد که کیوبیت هدف آن با ارزش‌ترین کیوبیت است. از این رو نمایش مداری این تجزیه همانند شکل (۴) است.



شکل ۴: شکل مداری تجزیه SC [۳۲]

۳-۴- روش سنتز CSD

در روش معرفی‌شده در [۲۴] الگوریتم سنتزی تحت عنوان CSD^{۴۳} پیشنهاد شده است که از روش تجزیه CS برای تجزیه ماتریس دلخواه یکانی $U(2^n)$ استفاده می‌کند. در این الگوریتم، تجزیه CS به‌صورت

به‌طور یکنواخت کنترلی مجاورشان، رابطه (۸) به‌دست‌آمده است.

$$F_n^{n-1}(U(2)) = \Delta_n \tilde{F}_n^{n-1}(U(2)) \quad (7)$$

$$U(2^n) = \Delta_n \tilde{F}_n^{n-1}(U(2)) \prod_{i=1}^{2^n-1} \tilde{F}_{n-\gamma(i)}^{n-1}(R_y) \tilde{F}_n^{n-1}(U(2)) \quad (8)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در روش CSD با شروع از تجزیه CS و ادامه آن به‌صورت بازگشتی، گیت‌های به‌طور یکنواخت کنترلی تک‌کیوبیتی تولید می‌شوند. روش تجزیه‌ای برای این دسته از گیت‌ها معرفی شده است که آن‌ها را به گیت‌های CNOT و گیت‌های تک‌کیوبیتی (کتابخانه گیت‌های پایه‌ای) تبدیل می‌کند. با ارائه راه‌کارهایی هزینه مدار تولیدشده با کاهش تعداد گیت‌ها بهبود پیدا می‌کند.

نمایشی از تجزیه مدار سه کیوبیتی با استفاده از روش سنتز CSD در شکل (۸) نشان داده شده است. زنجیره گیت‌های R_z در انتهای مدار تجزیه گیت قطری Δ_3 را نشان می‌دهد. نماد $\tilde{U}$ در این شکل به منظور نمایش گیت‌های هدف در گیت‌های $(\tilde{F}_i^m(U(2)))$ که در بالا معرفی شدند به کار رفته است.

تعداد CNOT‌های هر گیت به‌طور یکنواخت کنترلی تک‌کیوبیتی برابر با $2^{n-1}-1$ و تعداد تک‌کیوبیتی‌های آنها برابر با 2^{n-1} است. برای محاسبه تعداد CNOT‌های کل تولیدشده در این روش کافی است تعداد گیت‌های به‌طور یکنواخت کنترلی تک‌کیوبیتی را در تعداد گیت‌های CNOT هرکدام ضرب کرده و عدد به‌دست‌آمده را با تعداد گیت CNOT گیت قطری تولیدشده در انتهای مدار جمع کنیم تا هزینه نهایی مدار حاصل شود. با بهینه‌سازی که در [۱۳] معرفی شده، تعداد CNOT‌ها یک واحد و تعداد تک‌کیوبیتی‌ها n واحد بیشتر کاهش‌یافته و به ترتیب به‌صورت $\frac{1}{2}4^n - 2^{n-1} - 2$ و $\frac{1}{2}4^n - 2^{n-1} - n - 1$ محاسبه می‌شوند.

۳-۵- روش سنتز QSD

در مقاله [۱۰]، ماتریس‌های قرارگرفته در سمت راست و نیز سمت چپ رابطه (۵) را می‌توان با گیت $(F_r^1(U(2^{n-1})))$ نشان داد. به‌علاوه، ماتریس میانی نشان داده‌شده در این رابطه برابر است با گیت $(F_1^{n-1}(R_y))$. بدین ترتیب رابطه (۵) در نمایش گیتی خود می‌تواند به‌صورت رابطه (۹) نوشته شود.

$$U(2^n) = F_r^1(U_1(2^{n-1})) F_1^{n-1}(R_y) F_r^1(U_2(2^{n-1})) \quad (9)$$

در [۸] نشان داده‌شده است که هر ماتریس قطری بلوکی می‌تواند به رابطه (۱۰) تجزیه شود.

$$\begin{bmatrix} U_1 & 0 \\ 0 & U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V & 0 \\ 0 & V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & \Delta^\dagger \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix} \quad (10)$$

ماتریس‌های V و Δ به‌صورت زیر از U_2 و U_1 به دست می‌آیند.

$$U_1 U_2^\dagger = V \Delta^2 V^\dagger$$

Δ و V می‌توانند از U_1 و $U_2^\dagger$ با روش استاندارد قطری‌سازی [۲۵] استخراج شوند. همچنین $W = \Delta V^\dagger U_2$ در رابطه (۱۱) نمایش این رابطه با گیت، نشان داده شده است.

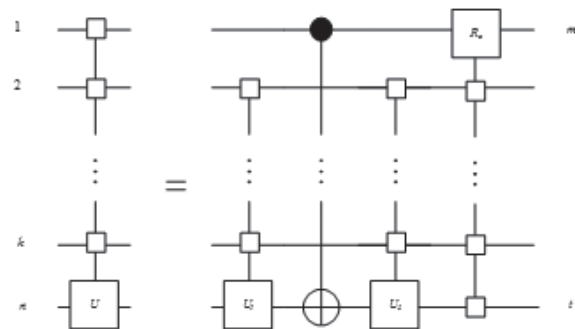
$$F_r^1(U(2^{n-1})) = U(2^{n-1}) F_1^{n-1}(R_z) U(2^{n-1}) \quad (11)$$

بازگشتی بر روی گیت‌های به‌طور یکنواخت کنترلی چندکیوبیتی در رابطه (۴) اعمال می‌شود و تا زمانی که همه گیت‌ها به گیت‌های به‌طور یکنواخت کنترلی تک‌کیوبیتی تبدیل شوند، روند بازگشتی ادامه می‌یابد. روند سنتز روش CSD به‌طور دقیق‌تر در رابطه (۵) نشان داده شده است. در این رابطه $\gamma(i)$ تابع خط‌کش^{۴۴} معرفی شده در [۲۴] است. $\gamma(i)+1$ محل کم‌ارزش‌ترین بیت غیرصفر را در نمایش دودویی i نشان می‌دهد.

$$U(2^n) = F_n^{(n-1)}(U(2)) \prod_{i=1}^{(2^n-1)} F_{(n-\gamma(i))}^{(n-1)}(R_y) F_n^{(n-1)}(U(2)) \quad (5)$$

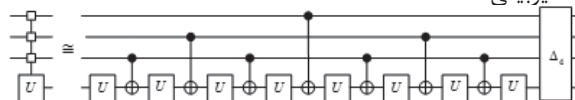
گیت‌هایی که در رابطه (۵) ظاهر شده‌اند، می‌توانند با استفاده از رابطه (۶) تجزیه و به سه گیت با اندازه‌های کوچک‌تر و یک گیت CNOT تبدیل شوند. در این رابطه گیت CNOT با نماد $C^{t,l}$ نشان داده شده که C و t به ترتیب محل بیت کنترلی و بیت هدف را مشخص می‌کنند. نمایش این تجزیه در شکل (۵) نشان داده شده است.

$$F_n^{n-1}(U(2)) = F_n^{n-2}(U(2)) C^{t,n} F_n^{n-2}(U(2)) F_n^{n-1}(R_z) \quad (6)$$



شکل ۵: روند بازگشتی تجزیه مربوط به رابطه (۵) [۴۲]

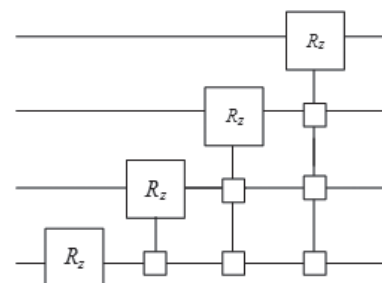
با ادامه رابطه (۶) به‌صورت بازگشتی، مداری با $2^{n-1}-1$ گیت به‌طور یکنواخت کنترلی تک‌کیوبیتی و یک گیت قطری Δ_n به‌دست می‌آید. گیت Δ_n قابل تجزیه به مداری با 2^n-2 گیت CNOT و گیت تک‌کیوبیتی است [۲۵].



شکل ۶: تجزیه یک گیت قطری بلوکی با چهار کیوبیت [۵۲]

در شکل (۶) تجزیه گیت به‌طور یکنواخت کنترلی تک‌کیوبیتی با چهار کیوبیت نشان داده شده است.

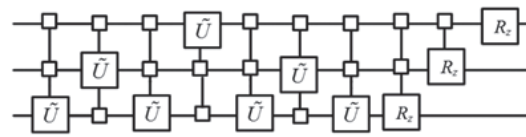
گیت Δ_n ظاهر شده در انتهای تجزیه گیت قطری بلوکی U ، با زنجیره‌ای از گیت‌های قطری بلوکی همانند شکل (۷) قابل پیاده‌سازی است.



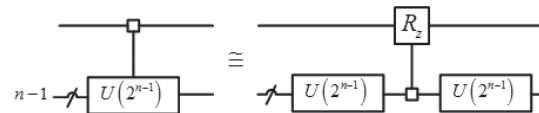
شکل ۷: تجزیه گیت قطری [۵۲]

در [۲۴] به‌منظور کاهش تعداد گیت‌های CNOT، با معرفی رابطه (۷) و جایگذاری آن در رابطه (۵) و نیز ادغام گیت‌های با گیت‌های Δ_n

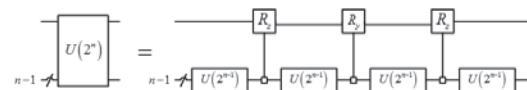
عمل تجزیه این ماتریس‌ها در شکل (۹) نشان داده شده و این عمل تجزیه دی‌مالتی‌پلکس کردن یک مالتی‌پلکسر نامیده شده است.



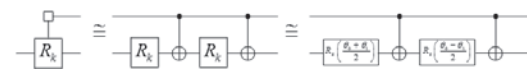
شکل ۸: مثالی از تجزیه گیت سه کیوبیتی با روش DSC [۴۲]



شکل ۹: نمایش مداری رابطه (۱۱) [۸]



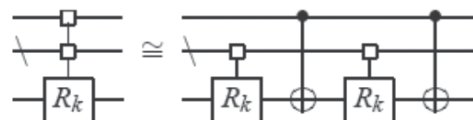
شکل ۱۰: روش سنتز DSQ برای [۸]



شکل ۱۱: تجزیه گیت قطری بلوکی بر روی دو کیوبیت [۸]

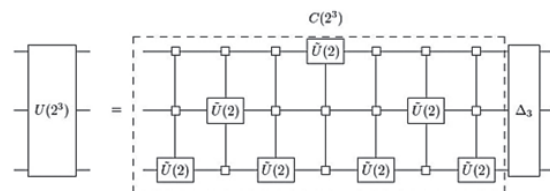
با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۹) رابطه (۱۲) به دست می‌آید که عمل QSD^{۴۵} را نشان می‌دهد. این رابطه بازگشتی تا ادامه داده می‌شود و مدار بهینه به دست آمده برای U(4) در [۲۴] با سه گیت CNOT، به جای آن قرار داده می‌شود.

در شکل (۱۰) روش سنتز QSD نشان داده شده است. به این ترتیب ماتریس $U(2^n)$ به چهار ماتریس $U(2^{n-1})$ و سه گیت R_k ($k \in \{y, z\}$) تبدیل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش QSD از گیت‌های R_y و R_z مالتی‌پلکس شده برای سنتز مدار استفاده می‌شود. روش معرفی شده برای سنتز گیت‌های فوق در [۸] در ادامه بررسی می‌شود. تجزیه گیت R_k قطری بلوکی بر روی دو کیوبیت در شکل (۱۱) نشان داده شده است که در این شکل $k \in \{y, z\}$ می‌باشد. با تعمیم شکل (۱۱) و افزودن کیوبیت انتخاب به دو طرف رابطه می‌توان به شکل (۱۲) رسید.



شکل ۱۲: تجزیه بازگشتی گیت قطری بلوکی R_k [۸]

با جایگذاری بازگشتی شکل‌ها در یکدیگر می‌توان به تجزیه نهایی

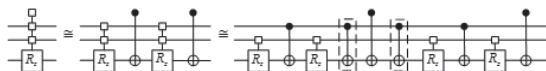


شکل ۱۴: مدار حاصل از سنتز سه کیوبیتی با روش DSC [۶۲].

گیت قطری بلوکی R_k رسید. مدار نهایی تنها از گیت‌های CNOT و گیت‌های تک کیوبیتی تشکیل شده است. مثالی از این تجزیه برای $k=4$ کیوبیت در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که تجزیه نشان داده شده در شکل (۱۳) و حالت‌های تعمیم یافته آن متقارن^{۴۶} است. بنابراین با جایگذاری وارون تجزیه به جای گیت قطری بلوکی دوم در شکل (۱۳) (همان‌طور که در مدار سمت راست مشاهده می‌شود)، می‌توان تعدادی گیت CNOT را در هر مرحله جایگذاری حذف کرد. تعداد CNOT های نهایی برای گیت قطری بلوکی R_k برابر 2^m می‌باشد که m تعداد کیوبیت‌های انتخاب را در گیت قطری بلوکی مورد نظر نشان می‌دهد.

موضوع مهمی که باقی می‌ماند این است که سطحی^{۴۷} انتخاب شود که در آن بازگشت مجدد متوقف شود و موارد پایانی با تکنیک‌های هدف خاص رسیدگی شود.



شکل ۱۳: تجزیه گیت قطری بلوکی بر ۴ کیوبیت [۸]

بنابراین، فرض می‌شود C_j حداقل تعداد گیت‌های CNOT مورد نیاز برای پیاده‌سازی یک عملگر یکانی j کیوبیتی با استفاده از برخی از الگوریتم‌های سنتز مدار کوانتومی باشد. با توجه به شکل (۱۰)، رابطه (۱۳) برای C_j تعریف می‌شود:

$$C_j \leq 4C_{j-1} + 3 \times 2^{j-1} \quad (13)$$

اکنون می‌توان این روش سنتز را به صورت بازگشتی اعمال کرد که با تکرار نابرابری فوق مطابقت دارد. اگر عملگرهای l کیوبیتی ممکن است با استفاده از $C_l \leq$ تعداد گیت‌های CNOT پیاده‌سازی شوند، می‌توان نابرابری زیر را برای از طریق القاء اثبات کرد.

$$C_n \leq 4^{n-l} (C_l + 3 \times 2^{l-1}) - 3 \times 2^{n-1} \quad (14)$$

درمقاله [۸]، $l=1$ و $C_l=0$ برای عملگرهای تک کیوبیتی و $l=2$ و $C_l=3$ برای عملگرهای دو کیوبیتی در نظر گرفته است.

با بهینه‌سازی‌هایی که بر روی این روش انجام می‌شود، یعنی با حذف $(4^{n-l} - 1)/3$ و اضافه کردن $4^{n-2} - 1$ در رابطه بازگشتی (۱۴) با در نظر گرفتن حالت $l=2$ ، $C_l=3$ تعداد CNOT ها برای روش QSD در رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$C_n \leq \left(\frac{23}{48}\right) 4^n - \left(\frac{3}{2}\right) 2^n + \frac{4}{3} \quad (15)$$

فرض می‌شود S_j حداقل تعداد گیت‌های تک کیوبیتی مورد نیاز برای پیاده‌سازی یک عملگر یکانی j کیوبیتی با استفاده از برخی از الگوریتم‌های سنتز مدار کوانتومی باشد، رابطه بازگشتی (۱۶) برای S_j تعریف می‌شود:

$$S_j \leq 4S_{j-1} + 3 \times 2^{j-1} + 1 \quad (16)$$

اکنون می‌توان این روش سنتز را به صورت بازگشتی اعمال کرد که با تکرار نابرابری فوق مطابقت دارد. اگر عملگرهای l کیوبیتی ممکن است با استفاده از $S_l \leq$ تعداد گیت‌های تک کیوبیتی پیاده‌سازی شوند، می‌توان نابرابری زیر را برای S_n از طریق القاء اثبات کرد.

$$S_n \leq 4^{n-l} (S_l + 3 \times 2^{l-1} + 1) - 3 \times 2^{n-1} - 1 \quad (17)$$

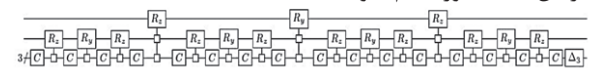
در این قسمت $l=2$ و $C_l=7$ برای عملگرهای تک کیوبیتی در نظر گرفته است. به طور مشابه و با انجام بهینه سازی هایی بر روی رابطه بازگشتی (۱۷)، تعداد گیت های تک کیوبیتی برای روش QSD در رابطه (۱۸) به دست می آید.

$$S_n \leq \frac{17}{24} 4^n - \frac{3}{2} 2^n + \frac{2}{3} \quad (18)$$

مقاله [۸]، توضیح مختصری درباره معیار NNC داده است. همه گیت های CNOT که از این سنتز به دست آمده اند، دو کیوبیتی هستند. گیت هایی که کیوبیت هدف و کنترل در مجاورت همدیگر قرار دارند یعنی مقدار فاصله شان (k) برابر با یک است، مقدار NNC شان برابر با صفر است. اما در شکل (۱۳)، 2^{n-k} گیت های CNOT دو کیوبیتی با طول k وجود دارد، پس NNC هر کدام از این نوع گیت CNOT برابر $k-1$ می باشد. در نهایت هزینه NNC کل مدار برابر با مجموع NNC تک گیت های CNOT می باشد.

۳-۶- روش سنتز BQD

در مقاله [۲۶]، با ترکیب دو روش QSD و CSD روش جدیدی به نام BQD^{۲۸} ارائه شده که موازنه ای^{۴۹} را بین تعداد گیت های CNOT و تعداد گیت های تک کیوبیتی فراهم می کند. در این روش، ابتدا سنتز بازگشتی QSD برای سنتز ماتریس $U(2^n)$ مورد استفاده قرار می گیرد، سپس در ادامه با تعیین سطح تجزیه l ($l \geq 3$)، سنتز QSD متوقف شده و ماتریس های باقیمانده در روند الگوریتم بازگشتی سنتز با استفاده از روش CSD سنتز شده و بهینه سازی هایی که در روند سنتز لحاظ شده اند، جایگزین می شوند. بهینه سازی های اعمال شده بدین ترتیب هستند که می توان گیت های قطری Δ_l را که در ماتریس های یکانی l کیوبیتی سنتز شده به روش CSD تولید می شوند از خطوط کنترلی گیت های R_p مالتی پلکس شده $(p \in \{y, z\})$ عبور داده و با ماتریس های مجاور ادغام نمود.



شکل ۱۵: مدار حاصل از سنتز پنج کیوبیتی با روش DQB با فرض سطح تجزیه [۶۴]

در این مقاله، مدار حاصل از سنتز یک ماتریس یکانی l کیوبیتی به روش CSD که گیت قطری از آن مدار حذف شده است با نام بلوک پایه l کیوبیتی بیان شده است. در این مقاله، یک بلوک پایه l کیوبیتی با نماد $C(2^l)$ مشخص می شود. به طور مثال در شکل (۱۴)، بلوک پایه سه کیوبیتی به صورت $C(2^3)$ مشخص شده است. شکل نتیجه حاصل از سنتز گیت دلخواه پنج کیوبیتی را با روش BQD با فرض سطح تجزیه $L=3$ نشان می دهد. در شکل (۱۵) هر یک از بلوک های پایه سه کیوبیتی با C نمایش داده می شوند.

۳-۷- روش سنتز IBQD

در [۲۷]، یک روش بهبود یافته پارامتری برای سنتز مدارهای کوانتومی مبتنی بر روش BQD با نام IBQD^{۵۰} معرفی شد. روش IBQD یک روش پارامتری و کلی سنتز است که روش های پیشین از جمله CSD، QSD و BQD حالت های خاصی از آن می باشند. دو تابع هزینه کوانتومی و عمق برای مدارات تولید شده در فضای جواب توسط این روش بر حسب پارامترهای روش محاسبه و سنتز با یافتن جواب های بهینه مربوط به این توابع هزینه انجام شد. نشان داده شد روش IBQD موازنه ای بین هزینه کوانتومی و عمق مدار ایجاد می کند. برای سنتز چهار کیوبیتی، IBQD در مقایسه با روش های QSD، CSD و BQD کمترین هزینه کوانتومی را تولید می کند. نقاط کمینه برای هزینه عمق مدار در حالتی که روش IBQD معادل روش QSD است، رخ می دهد. همچنین با

توجه به این که مساحت مدار تابعی از معیار هزینه کلی گیت و زمان اجرای مدار تابعی از عمق مدار است، لذا مجموعه جواب های به دست آمده در روش IBQD موازنه ای بین مساحت و زمان اجرای مدارهای سنتز شده ایجاد می کنند.

به علاوه، روش IBQD می تواند نتایج بهتری از لحاظ هزینه کوانتومی و عمق مدار نسبت به روش BQD تولید کند.

۳-۸- سنتز مدار کوانتومی مبتنی بر بهینه سازی شبکه منطقی

در مقاله [۲۸]، از طریق بهینه سازی شبکه منطقی برای کاهش دادن معیار عمق T مدارهای کوانتومی استفاده کرده است. عمق ضریبی یک شبکه منطقی بر روی گیت های پایه $\{AND, OR, NOT\}$ ، بزرگترین تعداد گیت های ۸ در هر مسیر از ورودی اولیه تا خروجی اولیه در شبکه است. به این منظور یک الگوریتم سنتز منطقی مبتنی بر برنامه نویسی پویا را برای کاهش عمق ضریبی شبکه های منطقی را پیشنهاد داده است که از شمارش برش^{۵۱}، تعادل درخت^{۵۲} و نمایش های مجموع حاصل ضرب انحصاری (ESOP)^{۵۳} استفاده می کند. همچنین این الگوریتم برای رمزنگاری و محاسبات کوانتومی کاربرد دارد، که در آن کاهش معیار عمق ضریبی مستقیماً به کاهش معیار عمق T مدار کوانتومی مربوطه ترجمه می شود. نتایج تجربی این مقاله بهبودهایی در معیار عمق T را نسبت به روش های پیشرفته بهینه سازی شده با دست در تعدادی از مدارهای کوانتومی به عنوان مثال، AES، SHA و محاسبات ممیز شناور نشان می دهد.

۳-۹- سنتز مدار کوانتومی با قابلیت تحمل پذیری اشکال

از آنجا که سیستم های کوانتومی بیشتر از محاسبات کلاسیک در معرض خطا هستند، مدارهای کوانتومی با قابلیت تحمل پذیری اشکال^{۵۴} برای پیاده سازی عملی مورد نیاز هستند.

طبق تعریف سنتز تحمل پذیر اشکال، در ابتدا عملگر یکانی ورودی با کمک یکی از روش های معمولی سنتز، تجزیه می شود و پس از آن گیت های تک کیوبیتی تولید شده به مجموعه ای CTL تجزیه می شوند. بسیاری از کدهای تصحیح اشکال کوانتومی [۲۹] تا [۳۲] برای ممکن ساختن محاسبات تحمل پذیر اشکال ارائه شده اند که از گیت های کتابخانه حاوی گیت های کلیفورد و T استفاده می کنند. برخی پژوهش های اخیر در حوزه سنتز کوانتومی نیز به سنتز کوانتومی باهدف تحمل پذیری اشکال می پردازند. در این پژوهش های [۳۲] تا [۳۶] سنتز منطقی مدارهای کوانتومی عمدتاً با استفاده از کتابخانه گیت های کلیفورد و T صورت می گیرند.

همان طور که گفته شد، کتابخانه کلیفورد و T یک کتابخانه تقریباً جهانی هست. یکی از راهکارهایی که برای کاهش محدودیت این کتابخانه ارائه شده است، گسترش آن است [۳۴]، یعنی افزودن گیت های جدید به کتابخانه. این عمل سبب می شود در صورت وجود این گیت ها در مدار کوانتومی بدون خاصیت تحمل پذیر اشکال نیازی به سنتز آن نباشد. همین امر سبب بهبود هزینه های این سنتز خواهد شود. حتی باوجود گسترش کتابخانه بازهم امکان تجزیه دقیق یک گیت دلخواه به گیت های کلیفورد و T ، وجود ندارد.

۳-۹-۱- انواع سنتز بر پایه کتابخانه CTL

سنتزهای مختلفی که بر روی کتابخانه CTL انجام شده اند، به دو دسته تقسیم می شوند:

سنتز تقریبی^{۵۵}: در سنتز تحمل پذیر اشکال به طور معمول تجزیه ی نهایی به صورت تقریبی از عملگر یکانی دلخواه U بیان می شود. در این حالت عملگر تجزیه ی عملگر یکانی دلخواه U به صورت زنجیرهای از گیت ها طبق (۱۹) نمایش داده می شود، به نحوی V نزدیکترین پاسخ به عملگر U باشد.

$$V \approx U = g_0 g_1 g_2 \dots g_n \quad (19)$$

فاصله‌ای که در انتها U و V با یکدیگر دارند، آستانه‌ی خطا^{۵۶} ϵ نامیده می‌شود. ϵ یک مقدار تجربی است و بر مبنای کاربرد تعریف می‌شود [۳۷-۳۹].

راه‌حلی برای مسئله سنتز تقریب مدار تک کیوبیتی در [۴۰] با استفاده از جستجوی ناآگاهانه^{۵۷} برای یافتن مدارهای بهینه پیشنهاد شد. با این حال، جستجوی ناآگاهانه به زمان اجرای نمایی نیاز دارد و به نظر می‌رسد که منابع محاسباتی کلاسیک برای مقادیر خطای تقریبی ϵ کمتر^{۴-۱۰} به آخر می‌رسد. دقت تقریب را می‌توان با استفاده از الگوریتم Solovay-Kitaev [۴۱] با دنباله‌ای از گیت‌ها به طول $O\left(\log^{3.97}\left(\frac{1}{\epsilon}\right)\right)$ و با زمان اجرای $O\left(\log^{2.71}\left(\frac{1}{\epsilon}\right)\right)$ بهبود بخشید.

در [۴۲]، الگوریتمی همراه با پیاده‌سازی‌اش که تقریب‌های بهینه T ، دوران‌های Z تک کیوبیتی را با استفاده از مدارهای کوانتومی متشکل از گیت‌های Clifford+T پیدا می‌کند، ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی قادر به مدیریت اشکال در تقریب تا اندازه 10^{-15} است که منجر به طرح‌های مدار تک کیوبیتی بهینه مورد نیاز برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های کوانتومی مقیاس پذیر می‌شود.

در مقاله [۳۴]، یک روش کارا برای سنتز مدار کوانتومی با قابلیت تحمل پذیری اشکال ارائه شده است. ورودی این سنتز یک مدار کوانتومی غیر FT و خروجی آن یک مدار FT بهینه شده برای شش PMD^{۵۸} مختلف است و همچنین از الگوریتم SKA^{۵۹} و جدول کش^{۶۰} برای گردآوری داده‌های کوانتومی استفاده کرده است. برای ارزیابی این سنتز از دو معیار هزینه استفاده می‌شود: تعداد عملیات اولیه^{۶۱} (ops) و چرخه‌های اجرای در مسیر بحرانی^{۶۲} (چرخه). نتایج نشان می‌دهد که با توجه به PMDهای مختلف به طور متوسط هزینه ۵۸٫۱ ops درصد تا ۸۷٫۰ درصد و هزینه چرخه بین ۴۲٫۸ تا ۷۶٫۴ درصد کاهش می‌یابد.

در مقاله [۴۳]، مدارهای کوانتومی از آبشاری از گیت‌های کوانتومی تشکیل شده‌اند. در یک مدار منطقی کوانتومی ناآگاه از طراحی فیزیکی، فرض می‌شود که یک گیت بر روی مجموعه دلخواه کیوبیت‌ها، بدون در نظر گرفتن مکان فیزیکی کیوبیت‌ها، عمل می‌کند. با این حال، در واقعیت، کیوبیت‌های فیزیکی باید در یک شبکه قرار گیرند. هر گره از شبکه، یک کیوبیت را نشان می‌دهد. این شبکه یک معماری کامپیوتر کوانتومی را پیاده‌سازی می‌کند. یک محدودیت فیزیکی وجود دارد که اغلب اعمال می‌شود، که گیت‌های کوانتومی فقط می‌توانند روی کیوبیت‌های مجاور در شبکه کار کنند. بنابراین، اگر کیوبیت‌های مدار منطقی مجاور نباشند، باید یک کانال ارتباطی ساخته شود. این مقاله، ابزاری به نام سنتز مدار کوانتومی تحمل پذیر اشکال آگاه از طراحی فیزیکی (PAQCS)^{۶۳} را معرفی می‌کند. این روش شامل دو الگوریتم است: یکی برای قرار دادن کیوبیت فیزیکی و دیگری برای مسیریابی ارتباطات. با کمک این دو الگوریتم، سربار تبدیل یک مدار منطقی به فیزیکی به طور متوسط ۳۰٫۱ درصد نسبت به کار قبلی [۳۴] کاهش می‌یابد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی در PAQCS بر روی مدارهای پیاده‌سازی شده با استفاده از عملیات کوانتومی که توسط دو توصیف مختلف ماشین فیزیکی کوانتومی و سه کد تصحیح خطای کوانتومی پشتیبانی می‌شوند، ارزیابی می‌شوند. آنها تعداد عملیات اولیه را ۱۱/۵٪-۶۸/۶٪ و تعداد چرخه‌های اجرا را ۱۶/۹٪-۵۹/۴٪ کاهش می‌دهند. یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌هایی که در سنتز تقریبی استفاده می‌شود، الگوریتم STA^{۶۴} است. الگوریتم STA بهبود یافته الگوریتم فلور^{۶۵} است که در تعریف ۱-۲ بیان شده است.

تعریف ۲-۱: الگوریتم فلور برای تخمین گیت تک کیوبیتی ورودی بهتوالی از گیت‌های تک کیوبیتی مجموعه‌ی مرجع ۵ استفاده می‌شود. در این الگوریتم در ابتدا برای گیت یکانی ورودی، توالی از گیت‌های مجموعه‌ی مرجع با طول مشخص، که معمولاً ۱۵ است، تعیین و در جدولی ذخیره می‌شود. در گام بعد برای تجزیه‌ی گیت یکانی با طول $N+1$ با کمک ساختار جستجوی درختی^{۶۶} در جدول به دست آمده، در میان تجزیه‌های با طول N جستجو می‌کند. در این جستجوی درختی از تجزیه‌ی مقادیر محاسبه شده پرس^{۶۷} می‌کند. در صورتی که تجزیه‌ی جدیدی محاسبه شود به مجموعه گیت به دست آمده افزوده خواهد شد. انجام جستجوی درختی سبب افزایش نمایی زمان اجرای الگوریتم می‌شود [۴۴].

در الگوریتم STA برای کاهش زمان جستجو در جدول موجود چندین راه‌کار ارائه شده است:

۱- **جستجوی دوطرفه**^{۶۸}: در این حالت دو جستجوی موازی از ابتدای جدول تا وسط آن و دیگری از وسط جدول تا انتهای آن انجام می‌شود. این روش جستجو سبب کاهش زمان اجرا به نصف زمان اجرای الگوریتم فلور می‌شود [۴۵].

۲- **افزایش دقت جستجو در نخستین مرحله**: این افزایش دقت سبب می‌شود زمان یافتن عملگرهای یکانی در جستجوهای بعدی کاهش یابد [۴۵].

با وجود این راه‌کارها برای کاهش زمان اجرای این الگوریتم، باز هم زمان اجرای آن به صورت نمایی است. کم بودن رشد تعداد گیت خروجی با کاهش آستانه‌ی خطا، مزیت این الگوریتم نسبت به الگوریتم SKA است. در مقابل، نمایی بودن زمان اجرا عیب این الگوریتم است [۴۵]. مرتبه‌ی محاسبه شده برای تولید تعداد گیت خروجی، از مرتبه‌ی $O(\log^{0.292})$ است [۴۴].

سنتز دقیق: به صورت تجزیه‌ی دقیق حالت‌هایی از ورودی به کتابخانه‌ی CTL بیان می‌شود.

در [۴۲]، یک هم‌ارزی از مجموعه یکانی‌های قابل محاسبه توسط مدارها بر روی CTL و مجموعه یکانی‌هایی بر روی حلقه $\mathbb{Z}[1/\sqrt{2}, i]$ ^{۶۹}، در حالت تک کیوبیتی نشان داده شده است. سپس از یک الگوریتم سنتز کارآمد، با تضمین بهینه بودن دقیق بر روی تعداد گیت‌های هادامارد و T استفاده شده است. حدس زده می‌شود که این نوع هم‌ارزی در حالت n کیوبیتی هم برقرار است.

در [۴۶]، رویکرد در [۴۲] را به گیت‌های چند کیوبیتی گسترش داده و ثابت می‌شود که یک ماتریس یکانی n کیوبیتی نمایش دقیقی بر روی مجموعه گیت CTL با کیوبیت‌های کمکی محلی دارد، اگر و تنها اگر ورودی‌های آن در حلقه $\mathbb{Z}[1/\sqrt{2}, i]$ باشند. این روش از تجزیه به ماتریس‌های ۱ و ۲ سطحی استفاده می‌کند، که در آن همیشه یک کیوبیت کمکی کافی است. اگر ورودی‌های ماتریس روی n کیوبیت به صورت

$$\frac{a+b\sqrt{2}+i(c+d\sqrt{2})}{\sqrt{2}^k}$$

باشند، آنگاه این الگوریتم به کران بالایی از تعداد گیت‌های $O(3^{2n}nk)$ برای سنتز کردن این گیت‌هایی که با بهینه بودن فاصله زیادی دارد، منجر می‌شود.

در مقاله [۴۷]، به بررسی مشکلات موجود در روش سنتز ارائه شده در مقاله [۴۶] می‌پردازد و سعی در بهبود آن در سطح جهانی دارد و از نمودار تصمیم گیری چند مقداری کوانتومی^{۷۰} برای نمایش ماتریس به صورت کارا استفاده می‌کند. همچنین از گیت‌های کتابخانه کلیفورد و T استفاده کرده است و هدف اصلی تولید مدار با حداقل تعداد گیت

T است.

مقاله [۴۸]، یک الگوریتم سنتز مدار کوانتومی را برای اجرای محاسبات کوانتومی با قابلیت تحمل پذیری اشکال جهانی بر اساس کدهای پیوسته^{۲۱} ارائه می دهد. برای تحقق محاسبات کوانتومی تحمل پذیر اشکال، باید پروتکل های کوانتومی تحمل پذیر به مدارهای کوانتومی قابل اجرا بر اساس معیار نزدیک ترین همسایه (NNC) تبدیل شوند. برخلاف کدهای توپولوژیکی^{۲۲} که اساساً مبتنی بر عملیات محلی تعریف می شوند، برای کدهای پیوسته، می توان مدارهای متشکل از عملیات محلی را با اعمال سنتز مدار کوانتومی به دست آورد. با این حال، با سنتز مدار کوانتومی موجود توسعه یافته برای الگوریتم های محاسباتی کوانتومی معمولی، ممکن است قابلیت تحمل پذیری اشکال پروتکل در مدار نهایی حفظ نشود. علاوه بر این، باید روش جدیدی برای پیاده سازی مدار کوانتومی محاسبات کوانتومی تحمل پذیر اشکال جهانی در نظر گرفته شود.

۳-۱۰- سنتز کارای مدارهای کوانتومی در پیاده سازی عملگرهای گروه کلیفور

در مقاله [۴۹]، یک رویکرد سنتز خودکار برای مدارهای کوانتومی که عملگرهای گروه کلیفور را پیاده سازی می کنند، ارائه شده است. این مدارها برای بسیاری از کاربردهای کوانتومی مانند مدارهای تثبیت کننده، مخابره از راه دور کوانتومی و غیره ضروری هستند و جنبه های اصلی عملکرد کوانتومی را پوشش می دهند. روش ارائه شده، برخلاف رویکردهای قبلی برای سنتز، از تکیه بر یک کتابخانه گیت عمومی اجتناب می کند و در عوض، از اثرات ویژه عملگرهای گروه کلیفور در ماتریس یکانی که باید سنتز شود، بهره می برد. علاوه بر این، نمودارهای تصمیم گیری چندمقداری کوانتومی برای نمایش کارآمد این ماتریس ها استفاده می شود. نتایج تجربی تایید می کنند که این رهیافت، امکان تحقق فشرده عملکرد کوانتومی مربوطه را فراهم می کند. کار آینده بر گسترش روش پیشنهادی برای رسیدن به به عملکرد کوانتومی عمومی تر متمرکز است.

۳-۱۱- سنتز کارای ماتریس های یکانی در کامپایلرهای مدار کوانتومی

تجزیه یکانی یک روش پرکاربرد برای نگاشت الگوریتم های کوانتومی به مجموعه های دلخواه از گیت های کوانتومی است. اجرای کارآمد این تجزیه امکان ترجمه گیت های یکانی بزرگ تر به عملگرهای کوانتومی ابتدایی را فراهم می کند، که کلید اجرای این الگوریتم ها در رایانه های کوانتومی موجود است. همچنین تجزیه می تواند به عنوان یک روش بهینه سازی تهاجمی برای کل مدار و همچنین برای آزمایش بخشی از یک الگوریتم بر روی یک شتاب دهنده کوانتومی^{۲۳} استفاده شود. برای انتخاب و اجرای الگوریتم تجزیه، کیوبیت های کاملی در نظر گرفته شده اند.

مقاله [۵۰]، تکنیک تجزیه خود را براساس QSD قرار می دهد که تعداد $O(4^n)$ گیت های غیرکنترلی را برای یک گیت ورودی n کیوبیتی ایجاد می کند. مدارهای حاصل تا ۱۰ برابر کوتاه تر از سایر روش ها در این زمینه هستند. در مقایسه این روش با ابزار Qubiter نشان داده شده است که این پیاده سازی مدارهایی با نصف تعداد گیت های CNOT و یک سوم طول کل مدار تولید می کند. علاوه بر آن، سرعت آن نیز تا ۱۰ برابر بیشتر است. بیشتر بهینه سازی ها برای بهره بردن از ساختار اساسی بالقوه در ماتریس های ورودی یا میانی و همچنین به حداقل رساندن زمان اجرای تجزیه پیشنهاد شده اند.

۳-۱۲- سنتز مدارهای کوانتومی مبتنی بر SAT {CNOT, T}

یک برنامه کوانتومی به صورت یک مدار کوانتومی کلیفور + T مدل سازی شده است که باید به منظور مطابقت با محدودیت های تکنولوژی

کوانتومی بهینه سازی شود. هدف اکثر الگوریتم های بهینه سازی کاهش تعداد گیت های T است. با این وجود، یک هدف بهینه سازی ثانویه باید به حداقل رساندن تعداد عملگرهای دو کیوبیتی (گیت های CNOT) باشد زیرا آن ها در مقایسه با عملگرهای تک کیوبیتی نرخ خطای بالاتری دارند. مقاله [۵۱] یک الگوریتم دقیق مبتنی بر SAT را برای بازنویسی مدار کوانتومی توسعه داده است که هدف آن کاهش گیت های CNOT بدون افزایش تعداد گیت های T است. این الگوریتم، حداقل اندازه مدار $\{CNOT, T\}$ را برای یک توصیف چندجمله ای پایه از یک تبدیل یکانی پیدا می کند. آزمایش ها کاهش CNOT در مدارهای کوانتومی با تعداد T بهینه سازی شده را تایید می کنند. این مقاله، مدارهای کوانتومی را برای همه گیت های تک هدفی که توابع کنترلی آن ها یکی از نمایندگان کلاس های هم ارزی طیفی ۴۸ تایی از توابع بولی با پنج ورودی هستند، ترکیب می کند. آزمایش های این مقاله کاهش متوسط تعداد CNOT برابر با ۲۶/۸۴٪ را نشان می دهد.

۳-۱۳- الگوریتم ملاقات در وسط برای سنتز سریع مدارهای کوانتومی با عمق بهینه

مقاله [۵۲]، الگوریتمی را برای محاسبه تجزیه با عمق بهینه برای عملگرهای منطقی ارائه می کند، و از یک تکنیک ملاقات در وسط^{۲۴} برای ارائه سرعت قابل توجهی نسبت به الگوریتم های جستجوی ناآگاهانه ساده استفاده می کند. به عنوان مثال، این الگوریتم عوامل عملگرهای منطقی کوانتومی متداول را در گیت های ابتدایی در مجموعه کلیفور و T به دست آورده است. به طور خاص، این روش تجزیه گیت تافولی را بر روی مجموعه ای از گیت های کلیفور و T گزارش می کند. این تجزیه، به یک مقدار عمق کل T برابر با ۳ دست می یابد، در نتیجه کاهش ۴۰ درصدی نسبت به تجزیه شناخته شده قبلی برای گیت تافولی ایجاد می کند. با توجه به اندازه فضای جستجو، این الگوریتم فقط برای پارامترهای کوچک مانند تعداد کیوبیت ها و تعداد گیت ها برای اجرای بهینه عملی است.

۴- مرور کلی بر سنتزهای مختلف منطقی مبتنی بر روش های ریاضی

در جدول (۱) خلاصه ای از روش های مختلف از الگوریتم های مبتنی بر ریاضی و سنتز منطقی با قابلیت تحمل پذیری اشکال در مدارهای کوانتومی بررسی شده اند.

در اکثر مقاله هایی که مورد بررسی قرار گرفته اند، از معیارهای ارزیابی تعداد CNOT و تعداد گیت های تک کیوبیتی برای یافتن مدار بهینه کوانتومی استفاده شده است.

در سنتزهایی که به دلیل قابلیت تحمل پذیری اشکال از کتابخانه CTL استفاده کرده اند، مهم ترین هدف کاهش تعداد گیت T و عمق T است.

۵- جمع بندی و پیشنهادهایی برای کارهای آتی

در این مطالعه، ابتدا مقدمه ای بر محاسبات کوانتومی بیان شد. سپس، مقدمه های بر مفاهیم اولیه محاسبات کوانتومی مطرح شد. بعد از آن، مسئله سنتز منطقی مدارهای کوانتومی مورد بررسی قرار گرفت. هر ماتریس یکانی نمایش دهنده یک گیت کوانتومی است. سنتز مدارهای کوانتومی به فرایند تبدیل یک گیت کوانتومی به یک سری گیت های پایه اطلاق می شود و یک مسئله سخت است. در این مطالعه، مروری بر روش های سنتز منطقی ریاضی مدارهای کوانتومی ارائه شد. روش های سنتز منطقی مدارهای کوانتومی به طور کلی به دو دسته روش های کلی و روش های آگاه از تحمل پذیری اشکال (سنتز تقریبی به کتابخانه CTL) تقسیم می شوند که در سال های اخیر روش های دسته دوم بیشتر

جدول ۱: خلاصه‌ای از برخی مقالات مرتبط با سنتز مدارهای کوانتومی مبتنی بر الگوریتم‌های ریاضی منتشرشده در مدل مداری کوانتومی

مرجع	سال انتشار	نوع الگوریتم	نکته قابل توجه
[۲۱]	۲۰۰۱	استفاده از تجزیه QR در جبر خطی	تعداد گیت‌های CNOT در مرتبه $O(n^3 4^n)$
[۲۲]	۲۰۰۴	استفاده از Highest Lower Bound	تعداد گیت‌های CNOT به $\lceil (1/4)(4^n - 3n - 1) \rceil$ رسید
[۲۴]	۲۰۰۴	استفاده از CSD	تعداد گیت‌های CNOT به $(4^n - 2^{n+1})$ رسید
[۹]	۲۰۰۵	بهبود روش CSD	تعداد گیت‌های CNOT به $2 - 2^n - \frac{1}{2} 4^n$ رسید و تعداد کمتری از گیت‌های تک کیوبیتی را تولید می‌کند.
[۸]	۲۰۰۶	سنتزی مبتنی بر تجزیه CS با عنوان QSD	تولید $(2^{3/48} 4^n - (3/2) 2^n + \frac{4}{3})$ تعداد گیت CNOT
[۲۶]	۲۰۱۱	Block-Based Quantum Decomposition (BQD)	ترکیبی از دو روش CSD و QSD
[۴۵]	۲۰۱۳	طراحی یک روش سنتز دقیق با توجه به کتابخانه کلیفورد و T	استفاده از کیوبیت‌های کمکی برای عملگرهای کلیفورد و T، تعداد کل گیت‌های ابتدایی این کتابخانه به کار رفته $O(3^{2n} nk)$ مؤلفه k معرج ^{۷۵} است)
[۵۲]	۲۰۱۳	الگوریتم Meet-in-the-Middle برای سنتز سریع مدارهای کوانتومی با عمق بهینه	از گیت‌های کتابخانه کلیفورد و T استفاده کرده است و هدف اصلی تولید مدار با تعداد حداقل گیت T است.
[۴۹]	۲۰۱۴	استفاده از رویکرد سنتز خودکار، عدم تکیه بر کتابخانه گیت عمومی و استفاده از نمودارهای تصمیم‌گیری چندمقداری کوانتومی	نتایج تجربی تایید می‌کنند که این امکان تحقق فشرده عملکرد کوانتومی مربوطه را فراهم می‌کند
[۲۷]	۲۰۱۶	IBQD	فضای جستجوی بزرگ‌تری را برای یافتن بهترین جواب از لحاظ معیارهای مختلف سنتز مداری جستجو می‌کند و همچنین از ارزیابی معیار عمق مدار استفاده می‌کند
[۵۱]	۲۰۱۸	توسعه یک الگوریتم دقیق مبتنی بر SAT را برای بازنویسی مدار کوانتومی	کاهش تعداد گیت‌های T و به حداقل رساندن تعداد عملگرهای دو کیوبیتی (گیت‌های CNOT)
[۴۷]	۲۰۲۰	بهبود روش سنتز دقیق پیشنهاد شده توسط [۴۶] در سطح جهانی و استفاده از Quantum Multiple-Valued Decision Diagram برای نمایش ماتریس به صورت کارا	از گیت‌های کتابخانه کلیفورد و T استفاده کرده است و هدف اصلی تولید مدار با تعداد حداقل گیت T است.
[۲۸]	۲۰۲۲	سنتز منطقی مبتنی بر برنامه‌نویسی پویا و بهینه‌سازی شبکه منطقی	هدف اصلی کاهش عمق T
[۴۸]	۲۰۲۲	ارائه یک سنتز منطقی با قابلیت تحمل‌پذیری اشکال با استفاده از کدهای پیوسته	استفاده از معیار NNC
[۵۰]	۲۰۲۲	تکنیک تجزیه مبتنی بر QSD	ایجاد تعداد $O(\frac{3}{4} 4^n)$ گیت‌های غیرکنترلی برای یک گیت ورودی n کیوبیتی و همچنین به حداقل رساندن زمان اجرای تجزیه

مورد تاکید و اهمیت هستند. به عنوان یک کار آتی، پیشنهاد می‌شود به روش‌های سنتز منطقی در مدل محاسبات کوانتومی یک‌طرفه پرداخته شود.

پی‌نوشت‌ها

10 Outer Product

11 Qubit

12 Superposition

13 Unitary

14 Pauli

15 Identity

16 Bit Flip

17 Phase Flip

18 Hadamard gate

19 Phase rotation

20 Controlled-U

21 Controlled-NOT

22 Uniformly-controlled multiqubit gate

23 Feedback

24 Fan out

25 Clifford+T library

26 Logical level

1 Charles H. Benet

2 Paul A. Benioff

3 David Deutsch

4 Richard P. Feynman

5 Moore's Law

6 Peter Shor

7 Bra/Ket

8 Transpose Conjugate

9 Inner Product

- Symposium on Foundations of Computer Science, 1994.
- [8] P. W. Shor, "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer," SIAM Journal on Scientific Computing, vol. 26, 1997.
 - [9] L. K. Grover, "A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search," in Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC), 1996, pp. 212-219.
 - [10] V. V. Shende, S. S. Bullock, and I. L. Markov, "Synthesis of quantum-logic circuits," IEEE Trans. On CAD, vol. 25, no. 6, pp. 1000-1010, Jun. 2006.
 - [11] V. Bergholm, J. J. Vartiainen, M. Mottonen, and M. M. Salomaa, "Quantum circuits with uniformly controlled one-qubit gates," Physical Review A, vol. 71, no. 5, pp. 23-30, May 2005.
 - [12] A. U. Khalid, "FPGA Emulation of Quantum Circuits." Vol. MS thesis: McGill University, 2005.
 - [13] D. Maslov, G. W. Dueck, D. M. Miller and C. Negrevergne. "Quantum Circuit Simplification and Level Compaction." IEEE Transactions on CAD 27: 436-444, 2008
 - [14] R. Wille, and R. Drechsler, "BDD-Based Synthesis of reversible logic for large functions", Proceedings of the 46th Annual Design Automation Conference, Pages 270–275, July 2009.
 - [15] D.M. Miller, R. Wille, and R. Drechsler, "Reducing reversible circuit cost by adding lines", 40th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic, 2010
 - [16] D. Maslov, and M. Saeedi, "Reversible circuit optimization via leaving the Boolean domain.", IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems 30.6, p.p 806-816, 2011.
 - [17] D. Maslov, G. W. Dueck, D. M. Miller, and C. Negrevergne, "Quantum circuit simplification and level compaction", IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 27(3), p.p 436-444, 2008.
 - [18] G. B. Charles. H Bennet, "Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing," in Proceeding of IEEE International Conference on Computer System and Signal Processing New York, 1984, pp. 175-179.
 - [19] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, "Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels", Physical Review Letters, vol. 70, pp. 1895-1899.
 - [20] C. H. Bennett and S. J. Wiesner, "Communication via One- and Two-Particle Operators on Einstein Podolsky-Rosen states", Physical Review Letters, vol. 69, pp. 2881-2884. November. 1992
 - [21] G. Cybenko, "Reducing quantum computations to elementary unitary operations", Computing in Science and Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 27-32, Mar./Apr. 2001.
 - [22] V. V. Shende, I. L. Markov, and S. S. Bullock, "Minimal universal two-qubit quantum circuits", Physical Review A, vol. 69, pp. 062329-062321, Jun. 2004.
 - [23] C. C. Paige, and M. Wei, "History and Generality of the CS Decomposition", Linear Algebra and Applications 303-326: 208-1994, 326
 - [24] M. Mottonen, J. J. Vartiainen, V. Bergholm, and M. M. Salomaa, "Quantum circuits for general multiqubit gates", Physical Review Letters, vol. 93, p. 130502, Sep. 2004.
 - [25] M. A. Nielsen, and I. L. Chuang, "Quantum Computation and Quantum Information", Cambridge University Press. 2010.
 - [26] M. Saeedi, M. Arabzadeh, M. Saheb Zamani, and M. Sedighi, "Block-based quantum-logic synthesis", Quantum Information and Computation J., vol. 11, no. 3, pp. 262-277, Mar. 2011.
 - [27] کوروش مرجوعی، محبوبه هوشمند، مرتضی صاحب‌الزمانی و مهدی صدیقی، "سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از روش مبتنی بر بلوک بهبود یافته"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، ب-مهندسی کامپیوتر، سال ۱۴، شماره ۳، صفحه ۲۳۹-۲۴۸، پاییز ۱۳۹۵
 - [28] Häner, Thomas, and Mathias Soeken. "Lowering the T-depth of quantum circuits via logic network optimization". ACM Transactions on Quantum Computing. 2022, 3.21-15
 - [29] M. Steane, "Error correcting codes in quantum theory", Phys. Rev. Lett., vol. 77, no. 5, pp. 793-797, Jul. 1996.
 - [30] D. Bacon, "Operator quantum error-correcting subsystems for self-correcting quantum memories", Phys. Rev. A, vol. 73, 27 Logical depth
 - 28 Nearest Neighbor Cost
 - 29 T-count
 - 30 T-depth
 - 31 ancilla qubit
 - 32 Multi-objective Optimization Problem
 - 33 Object function
 - 34 Restriction
 - 35 feasible region
 - 36 feasible solution
 - 37 Optimization variables
 - 38 Quantum Key Distribution
 - 39 Quantum Teleportation
 - 40 Dense Coding
 - 41 Technology independent synthesis
 - 42 Highest Lower Bound
 - 43 Cosine-Sine Decomposition
 - 44 Ruler function
 - 45 Quantum Shannon Decomposition
 - 46 Symmetric
 - 47 Level
 - 48 Block-Based Quantum Decomposition
 - 49 Trade-off
 - 50 Improved-BQD
 - 51 cut enumeration
 - 52 tree balancing
 - 53 exclusive sum-of-products representations
 - 54 Fault-Tolerant
 - 55 Approximation synthesis
 - 56 Error Threshold
 - 57 brute force
 - 58 physical machine description
 - 59 kipping table algorithm
 - 60 cache table
 - 61 number of primitive operations
 - 62 execution cycles on the critical path
 - 63 Physical Design-Aware Fault-Tolerant Quantum Circuit Synthesis
 - 64 Skipping Table Algorithm
 - 65 Flower's algorithm
 - 66 Tree lookup structure
 - 67 Skip
 - 68 Bidirectional search
 - 69 Ring
 - 70 Quantum Multiple-Valued Decision Diagram
 - 71 concatenated codes
 - 72 topological codes
 - 73 quantum accelerator
 - 74 Meet-in-the-middle
 - 75 denominator exponent

مراجع

- [1] Gordon E Moore, *Cramming more components onto integrated circuits*, 1965
- [2] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, "Quantum Computation and Quantum Information," *Cambridge university press*, 2001.
- [3] G. Benenti, G. Casati, and G. Strini, "Principles of Quantum Computation and Information," *Basic concepts: World Scientific Publishing*, vol. 1, 2004.
- [4] M. Nakahara and T. Ohmi, "Quantum Computing From Linear Algebra to Physical Realizations," *Taylor & Francis*, 2008.
- [5] M. Lukac, M. Perkowski, H. Goi, M. Pivtoraiko, C. H. Yu, K. Chung, H. Jee, B. J. Kim, and Y. D. Kim, "Evolutionary Approach to Quantum and Reversible Circuit Synthesis," in *Artificial Intelligence Review*. vol. 20, pp. 361-417, 2003.
- [6] آرزو رجایی، محبوبه هوشمند، سید عابد حسینی، "مروری بر سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی"، نشریه عصر برق، دوره ۸، شماره ۱۵ (تابستان ۱۴۰۰)
- [7] P. W. Shor, "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring", in Proceedings of the 35th Annual

- [12] N. Bhusal, M. Abdelmalak, M. Kamruzzaman, and M. Benidir, "Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions," *IEEE Access*, vol.8, pp.18064–18086, 2020.
- [13] J. Lu, J. Guo, Z. Jian, Y. Yang, and W. Tang, "Resilience Assessment and Its Enhancement in Tackling Adverse Impact of Ice Disasters for Power Transmission Systems," *Energies*, vol.11, no. 9, 2018.
- [14] H. Raoufi, V. Vahidinasab, and K. Mehran, "Power systems resilience metrics: A comprehensive review of challenges and outlook," *Sustain. Switz.*, vol.12, no. 22, pp.1–24, 2020.
- [15] Z. Zeng, S. Du, and Y. Ding, "Resilience analysis of multi-state systems with time-dependent behaviors," *Appl. Math. Model.*, vol.90, pp.889–911, 2021.
- [16] D. K. Mishra, M. J. Ghadi, A. Azizivahed, L. Li, and J. Zhang, "A review on resilience studies in active distribution systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.135, no. March 2020, 2021.
- [17] L. Das, S. Munikoti, B. Natarajan, and B. Srinivasan, "Measuring smart grid resilience: Methods, challenges and opportunities," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.130, p.109918, 2020.
- [18] S. S. H. Toroghi and V. M. Thomas, "A framework for the resilience analysis of electric infrastructure systems including temporary generation systems," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol.202, p.107013, 2020.
- [19] H. Sabouhi, A. Doroudi, M. Fotuh, F. Irizabadi, and M. Bashiri, "Electrical Power System Resilience Assessment: A Comprehensive Approach," *IEEE Syst. J.*, vol.14, pp.2643–2652, 2020.
- [20] "The Economic Design of a Smart Microgrid Considering the Reliability Indices Using the PSO Algorithm," *kaee*, vol.6, no. 12, pp.6–14, Aug. 2019.
- [21] "Determination of Optimal Location and Size of Distribution Substations to Reduce Cost, Losses and Improve Reliability," *kaee*, vol.7, no. 13, pp.41–51, Sep. 2020.
- [22] J. Nelson, N. G. Johnson, K. Fahy, and T. A. Hansen, "Statistical development of microgrid resilience during islanding operations," *Appl. Energy*, vol.279, no. July, p.115724, 2020.
- [23] A. Younesi, H. Shayeghi, P. Siano, A. Safari, and H. H. Alhelou, "Enhancing the Resilience of Operational Microgrids through a Two-Stage Scheduling Strategy Considering the Impact of Uncertainties," *IEEE Access*, vol.9, pp.18454–18464, 2021.
- [24] S. Mojtahedzadeh, S. Najafi Ravadanegh, and M. R. Haghi-fam, "Microgrid-based resilient distribution network planning for a new town," *IET Renew. Power Gener.*, vol.15, no. 15, pp.3524–3538, 2021.
- [25] B. Venkateswaran V, D. K. Saini, and M. Sharma, "Techno-economic hardening strategies to enhance distribution system resilience against earthquake," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol.213, no. December 2020, p.107682, 2021.
- [26] J. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, M. Mehrzadi, and C. L. Su, "An Efficient Framework for Improving Microgrid Resilience against Islanding with Battery Swapping Stations," *IEEE Access*, vol.9, pp.40008–40018, 2021.
- [27] H. Mehrjerdi, "Resilience improvement with zero load curtailment by multi-microgrid based on system of systems," *IEEE Access*, vol.8, pp.198494–198502, 2020.
- [28] S. A. Sedgh, M. Doostizadeh, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Resilient-enhancing critical load restoration using mobile power sources with incomplete information," *Sustain. Energy Grids Netw.*, vol.26, p.100418, 2021.
- [29] "Specializing in Lithium Batteries, Chargers, Solar Storage," *Electric Car Parts Company*.
- [30] R. Nourollahi, P. Salyani, K. Zare, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Resiliency-oriented optimal scheduling of microgrids in the presence of demand response programs using a hybrid stochastic-robust optimization approach," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol.128, no. January, p.106723, 2021.
- no, 1, pp. 4013 34001-012 012 .Jan.2006 .
- [31] D. Forney, M. Grassl, S. Guha, "Convolutional and tail-biting quantum error-correcting codes," *IEEE Trans. On Information Theory*, vol. 53, no. 3, pp. 865-880 .Mar.2007 .
- [32] M. Houshmand, S. Hosseini-Khayat, and M. M. Wilde, "Minimal memory, non-catastrophic, polynomial-depth quantum convolutional encoders," *IEEE Trans. On Information Theory*, vol. 59, no. 2, pp. 1198-1210 .Feb.2013 .
- [33] V. Kliuchnikov, D. Maslov, and M. Mosca, "Exact synthesis of multiqubit Clifford+T circuits generated by Clifford and T gates," *Quantum Information and Computation*, vol. 13, no. 7-8, pp. 607-630 Jul.2013 .
- [34] C. Lin and A. Chakrabarti, "FTQSL: fault-tolerant quantum logic synthesis," *IEEE Trans. On VLSI Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 1363-1350 .Jun.2013 .
- [35] V. Kliuchnikov, D. Maslov, and M. Mosca, "Fast and Clifford exact synthesis of single qubit unitaries generated by Clifford and T gates," *Quantum Information and Computation*, vol. 13, no. 2013, 8–7 .
- [36] Y. G. Chen, J. B. Wang, "Qcompiler: Quantum compilation with the CSD method," *Computer Physics Communications*, 184no, 3, pp. 853-865 .March.2013
- [37] M. Whiteny, "Practical fault-tolerance for quantum circuits", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.2009 ,
- [38] X. Zhou, D. W. Leung, I. L. Chuang, "Methodology for quantum logic gate construction," *Physical Review A*, vol. 62, pp. 052316 .October.2000
- [39] A. G. Fowler, A. M. Stephens, P. Groszkowski, "High-threshold universal quantum computation on the surface code," *Physical Review A*, vol. 80, pp. 052312-14–052312-1. November 2009
- [40] A. G. Fowler, "Constructing arbitrary Steane code single logical qubit fault-tolerant gates," *Quantum Information and Computation*, vol. 11, no. 9-10, pp. 873–867 .September.2011
- [41] C. Dawson and M. Nielsen, "The Solovay-Kitaev algorithm," *Quantum Information and Computation*, vol. 7, no. 5, pp. 793–796, 1996.
- [42] V. Kliuchnikov, D. Maslov, and M. Mosca, "Practical approximation of single-qubit unitaries by single-qubit quantum Clifford and T circuits," *arXiv*. 1212.6964:
- [43] C. C. Lin, S. Sur-Kolay, and N. K. Jha, "PAQCS: Physical Design-Aware Fault-Tolerant Quantum Circuit Synthesis," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Volume: 23, Issue: 7, July 2015
- [44] A. G. Fowler, "Constructing arbitrary Steane code single logical qubit fault-tolerant gates," *arXiv preprint quant-ph: 0411206*, 4, 2004.
- [45] J. Booth, "Quantum compiler optimizations," *arXiv: 1206.3348v1*, 2012.
- [46] B. Giles and P. Selinger, "Exact synthesis of multiqubit Clifford+T circuits," *Physical Review A*, vol. 87, no. 3, p. 032332 . 3102 .raM
- [47] Philipp Niemann, Robert Wille, and Rolf Drechsler, "Advanced exact synthesis of Clifford+T circuits," *Quantum Information Processing*, pp. 19-317, 2020.
- [48] Y. HWANG, "Fault-tolerant circuit synthesis for universal fault-tolerant quantum computing," *arXiv preprint arXiv: 2022.2206.02691*.
- [49] P. Niemann, R. Wille, and R. Drechsler, "Efficient synthesis of quantum circuits implementing Clifford group operations." 2014 19th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). IEEE, 2014.
- [50] A. M. Krol, et al. "Efficient decomposition of unitary matrices in quantum circuit compilers." *Applied Sciences* 12.2. 759. 2022
- [51] G. Meuli, M. Soeken, G. D. Micheli, "SAT-based {CNOT, T} quantum circuit synthesis", *International Conference on Reversible Computation. Springer, Cham*, p. 175-188, 2018.
- [52] M. Amy, et al., "A meet-in-the-middle algorithm for fast synthesis of depth-optimal quantum circuits," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* 32.6, p.p 818-830, 2013

در سال افق ۱۴۰۵، شرکت به این نتایج دست خواهد یافت

۵ درصد حداکثر تلفات انرژی
۵ دقیقه حداکثر زمان خاموشی به ازای هر مشترک در ماه
۵ درصد حداکثر فعالیت های غیر الکتریکی مرتبط با مردم

نقشه موزون استراتژی
شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی



موضوعات استراتژیک

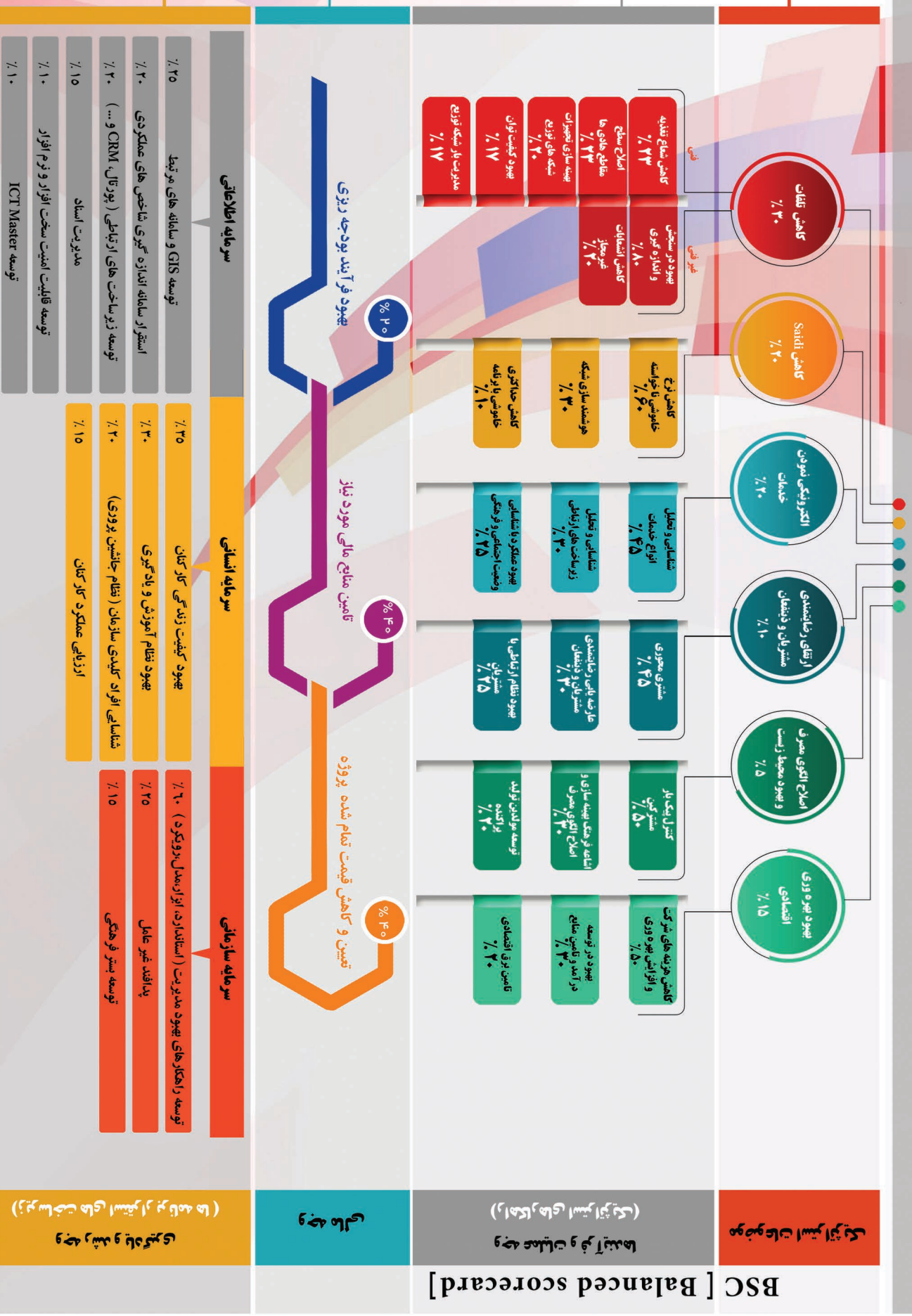
وجه عملیات و فرآیندها
(راهکارهای استراتژیک)

BSC [Balanced scorecard]

وجه مالی

وجه رشد و یادگیری
(زیرواستراتژی های استقرار بر نظام ها)

۵۵۵ در ۱۴۰۵





تعداد مشترکین
۳۹۷/۵۳۸ مشترک

میزان خاموشی به ازاء هر مشترک در سال (SAIDI)

۷۸ دقیقه بر مشترک



تعداد روستای برقدار

۹۶۸ روستا



میزان عملکرد اعتبارات سرمایه ای ۶ ماهه اول سال ۱۴۰۱

۱/۳۱۱/۳۴۸ میلیون ریال



تعداد چاه کشاورزی برقدار شده

۱۳۶۰ حلقه



تلفات شبکه های توزیع برق تا پایان سال ۱۴۰۰

۷/۸ درصد



تعداد چراغ منصوبه LED روشنایی معابر

۳۷/۸۶۶ دستگاه



درصد تبدیل شبکه سیمی فشار ضعیف به کابل خودنگهدار

۱۰۰ درصد

