



ASR-E-BARQ
ISSN: 2588-3828

عصر برق ۱۶

فصل نامه علمی انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران، شاخه خراسان سال هشتم • شماره ۱۶ • زمستان ۱۴۰۰ قیمت ۲۰,۰۰۰ تومان



شبکه‌های توزیع برق در مسیر تکامل / صانع شرق؛ از برق و انرژی تا آب و محیط زیست / مروری بر چند مدل ارزیابی پیشنهادی برای مقایسه سازندگان ماهواره از دید اپراتورهای ماهواره / فناوری‌های مورد نیاز آنتن در نسل پنجم و نسل ششم شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم / بررسی راه کارهای فنی کاهش سطح پرتوگیری در شبکه‌های تلفن همراه / یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال / یادگیری عمیق در پردازش تصاویر سی‌تی‌اسکن ریه بیماران مبتلا به کرونا / مقایسه‌ی شبکه‌های عصبی MLP و SVR جهت مدل‌سازی و عیب‌یابی توربین بادی نیروگاه بادی کهک / مروری بر پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی / بررسی الگوهای طراحی مجموعه حسگر در خودروهای خودران / مروری بر روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای با قابلیت هماهنگی با توابع پیشرفته حمایت شبکه بر روی مولدهای فتوولتائیک



شرکت فن آوران

صانع شرق®

Sane Shargh



DG Power Plants



132/20KV Mobile Substation



RO Technology



24KV Capacitor Banks



Lighting Tower



Modular Substaion



Remote Terminal Units



Compact Substations



10, 20, 24 w Alarm Units



Ring Main Unit Panel

صاحب امتیاز: انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران
مدیر مسوول: 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، مهندس رضا ربیاحی،
دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد شکوه صارمی،
مهندس علی کارگزار، دکتر عبداله کامیاب،
دکتر مهدی علومی بابیگی، دکتر مصطفی عیدانی،
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 عیدانی،
دکتر گئورگ قره پتیان، دکتر خلیل مافی نژاد،
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 مدیرمسئول؛ شبکه‌های توزیع برق در مسیر تکامل
۳	صانع شرق: از برق و انرژی تا آب و محیط زیست
۶	مروری بر چند مدل ارزیابی پیشنهادی برای مقایسه سازندگان ماهواره از دید ...
۱۷	فناوری‌های مورد نیاز آنتن در نسل پنجم و نسل ششم شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم
۲۸	بررسی راهکارهای فنی کاهش سطح پرتوگیری در شبکه‌های تلفن همراه
۳۵	یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال
۴۳	یادگیری عمیق در پردازش تصاویر سی‌تی‌اسکن ریه بیماران مبتلا به کرونا
۵۶	آنالیز تئوری اطلاعاتی سیستم تأیید موقعیت (چکیده رساله دکتری)
۵۶	طراحی بلوک‌های دیجیتال مورد استفاده در کاربردهای پزشکی (چکیده رساله دکتری)
۵۷	حفاظت پشتیبان خطوط انتقال مبتنی بر سیستم‌های اندازه‌گیری ... (چکیده رساله دکتری)
۵۷	پایدارسازی ردهای از سیستم‌های غیرخطی تکین تاخیری در ... (چکیده رساله دکتری)
۵۸	مقایسه‌ی شبکه‌های عصبی MLP و SVR جهت مدل‌سازی و عیب‌یابی توربین ...
۶۴	مروری بر پروتکل‌های مخابراتی از راه دور کوانتومی
۷۳	بررسی الگوهای طراحی مجموعه حسگر در خودروهای خودران
۸۰	مروری بر روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای با قابلیت هماهنگی با توابع ...

● 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 الکترونیک و یا سایت نشریه حتماً به دو صورت PDF و Word باشد.
- ترجمه‌ها همراه با نسخه اصلی ارسال شود.
- مسوولیت حقوقی آثار ارسالی بر عهده نویسندگان مقاله‌ها می‌باشد.



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

صنعتی سجاد، ساختمان شماره ۲، طبقه سوم

تلفن: ۰۵۱-۳۶۰۲۹۳۰۸

وب سایت: www.kiaeee.ir

پست الکترونیک: info@kiaeee.ir



شبکه‌های توزیع برق در مسیر تکامل

یادداشت مدیر مسئول

مقررات زدایی و رقابتی کردن صنعت برق نیز که اکنون بیش از سه دهه از آن می‌گذرد، امروزه مسائل متعددی مانند طراحی و بهره‌برداری از بازارهای محلی، استفاده از پاسخ تقاضا و مشارکت مردم و افزایش قدرت انتخاب آنها در خرید برق را در سطح شبکه توزیع دنبال می‌کند. در محور تمرکززدایی و راهبری شبکه برق به‌صورت غیرمرکزی نیز نقش شبکه توزیع بسیار حیاتی است. نزدیک شدن نقاط تولید و مصرف به یکدیگر و توسعه ریزشبکه‌ها از مهمترین نکاتی است که در این محور مورد توجه قرار دارد. تاب‌آوری در برابر حوادث طبیعی و حمله‌های سایبری از مهمترین دستاوردهای تمرکززدایی است.

دیجیتالی شدن نیز که روندی بسیار اساسی در عصر کنونی در همه عرصه‌های زندگی است به‌طور جدی صنعت برق را متحول کرده است. امروزه برای اجرای بسیاری از فرایندهای اقتصادی (مانند بازار برق) و فنی (مانند مدیریت و راهبری شبکه) به زیر ساخت دیجیتالی نیازمند هستیم. به‌منظور اجرای برنامه‌های مختلف پاسخ تقاضا و مشارکت مردم در کاهش اوج مصرف بایستی سیستم‌های اندازه‌گیری پیشرفته و هوشمند مورد استفاده قرار گیرند. همچنین قراردادهای مختلف بازارمحور بین تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌ها و بسیاری از خدمات جانبی و مدیریت هوشمند شبکه و بار تنها در بستر یک زیرساخت مخابراتی مناسب امکان‌پذیر می‌باشد.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت روند تغییرات بیان شده در صنعت برق در پنج محور اشاره شده، نقش شبکه‌های توزیع برق را در مدیریت فنی و اقتصادی این صنعت مضاعف کرده است. همچنین شایان توجه است که مصرف انرژی الکتریکی به‌دلیل اضافه شدن برخی از حوزه‌های مصرف انرژی به حوزه صنعت برق مانند حمل و نقل (خودروهای برقی، قطارهای برقی) به‌طور جدی در حال افزایش است. وجود همه‌ی این مسائل موجب شده است که طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع برق با پیچیدگی‌ها و چالش‌های جدیدی روبه‌رو گردد. از این‌رو بدیهی است که در این فضای جدید بایستی بازنگری جدی در کلیه فرایندهای بهره‌برداری و طراحی شبکه‌های توزیع برق صورت گیرد. مدیران شبکه‌های توزیع برق، امروزه بایستی با یک تجدید ساختار اساسی، هم از جنبه فنی و هم از جنبه اقتصادی به باز تعریف شبکه‌های توزیع همت کنند. تحت این شرایط، شبکه‌های توزیع برق فضای مناسبی برای کسب‌وکارهای جدید و ایجاد نوآوری و تحرک در صنعت برق را فراهم می‌سازند. امیدوارم نسل جدید مدیران شبکه‌های توزیع برق این مسئولیت را آگاهانه بپذیرند.

حبیب رجبی مشهدی
مدیرمسئول

در چند دهه اخیر تغییرات بزرگی مانند تجدید ساختار اقتصادی صنعت برق، گسترش نفوذ نیروگاه‌های تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع برق و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس وسیع در سیستم‌های قدرت اتفاق افتاده است. این تغییرات نقش و عملکرد شبکه‌ی توزیع برق را به طور اساسی متحول کرده است. در سیستم‌های سنتی شبکه توزیع برق به‌عنوان مرحله آخر زنجیره تأمین برق، فقط نقش تحویل برق از شبکه‌های انتقال و توزیع آن بین مصرف‌کننده‌ها و مشترکان را عهده‌دار بود. شبکه معمول توزیع برق به‌عنوان یک شبکه‌ی غیرفعال (Passive) و با ساختار شعاعی، در فضای جدید صنعت برق به شبکه‌ای فعال (Active) که در آن علاوه بر توزیع برق، مجهز به نیروگاه‌های تولید پراکنده می‌باشد و می‌تواند نقش موثری در امنیت سیستم، اقتصاد برق و بهره‌برداری بهینه از سیستم بازی کند. ارتباط موثر و مبادله اطلاعات با مشترکان در جهت مدیریت مصرف و استفاده از ظرفیت‌های پاسخ تقاضا و مدیریت هوشمند شبکه از دیگر وظایف شبکه‌های توزیع فعلی است. بدین ترتیب شبکه‌های توزیع برق در سیر تکاملی از شبکه‌های غیرفعال به شبکه‌های فعال و در مرحله بعد به شبکه‌های هوشمند در حال گذار می‌باشند. می‌توان ادعا نمود که تمام پیچیدگی‌ها و مسایلی که در سیستم‌های انتقال و تولید وجود دارد به شبکه‌های توزیع منتقل شده است و بنابراین نسل جدید شبکه‌های توزیع برق با چالش‌های متعددی مواجه می‌باشند. در یک نگاه کلان به حوزه انرژی و از جمله عرصه صنعت برق می‌توان فرایندهای مختلفی که در چند دهه اخیر در این حوزه دنبال می‌شود را در پنج محور مهم دسته‌بندی نمود:

- مردمی کردن اقتصاد (Democratization)
- کربن‌زدایی (Decarbonization)
- مقررات‌زدایی (Deregulation)
- تمرکززدایی (Decentralization)
- دیجیتالی کردن (Digitalization)

مردمی کردن اقتصاد با خصوصی‌سازی و مشارکت گسترده مردم در تولید انرژی الکتریکی امکان‌پذیر است. حضور گسترده مردم در تولید برق خانگی، فعال شدن شهرداری‌ها و تعاونی‌های مردمی که به‌طور عمده استفاده از نیروگاه‌های کوچک در سطح شبکه توزیع می‌باشد، ساختار متمرکز و دولتی حاکم بر صنعت برق را به‌طور اساسی متحول می‌کند. کربن‌زدایی که از مسایل مهم دوره کنونی در جهت حفظ محیط‌زیست و کره زمین است، در صنعت برق با رویکرد گسترده به استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی و بادی همراه بوده است. بخش زیادی از این نیروگاه‌ها در سطح ولتاژ فشار متوسط و فشار ضعیف، به شبکه توزیع برق متصل هستند. بنابراین نقش شبکه توزیع برق در این دو محور نقشی برجسته می‌باشد.



صانع شرق؛ از برق و انرژی تا آب و محیط زیست

در گفت‌وگو با مهندس محسن شادمان؛ مدیرعامل شرکت صانع شرق

شرکت صانع شرق در بیستم اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۵ فعالیت خود را در یک سوله‌ی ۳۰۰ متر مربعی با نزدیک به ۱۵ نیروی آغاز کرده و هم‌اکنون در فضایی نزدیک به ۱۸۰۰۰ متر مربع برای ۳۰۰ نفر به‌صورت مستقیم در قالب چهار کارخانه اشتغال ایجاد کرده است. برای آشنایی مخاطبان عصر برق با خدمات این مجموعه و زمینه‌های مختلف فعالیت‌های آن و البته بیان دیدگاه‌های مدیرعامل شرکت صانع شرق پیرامون موضوع‌های مهم صنعت برق و انرژی کشور گفت‌وگویی با مهندس محسن شادمان انجام شده است، آن‌چه در ادامه خواهید خواند حاصل این گفت‌وگو است.

صانع شرق در یک نگاه

صانع شرق در ابتدای فعالیت خود بر طراحی و تولید پست‌های موبایل تمرکز داشت اما پس از گسترش فعالیت‌هایش اکنون دارای چهار واحد مختلف است که یکی از آن‌ها در ساخت پست‌های سیار و کمپکت و تابلوهای برق فعالیت دارد و این شرکت را به بزرگ‌ترین سازنده تابلو در شرق کشور و بزرگ‌ترین سازنده پست‌های سیار در خاورمیانه تبدیل نموده است. نخستین بانک خازنی سیار، ساخت نخستین پست سیار GIS، طرح پست مدولار کارخانه‌ای برای نخستین بار در کشور، اجرای پست‌های مدولار ۲۳۰ کیلوولت برای نخستین بار به‌صورت AIS و ساخت پست سیار دو طبقه برای نخستین بار از جمله فعالیت‌های این بخش است. واحد تولید پراکنده و دیزل این شرکت در

زمینه‌ی تولید پراکنده و نیروگاه‌های دیزلی فعالیت دارد و بزرگ‌ترین تامین‌کننده دیزل ژنراتور و تنها کارخانه‌ی کولپینگ دیزل ژنراتور در شرق کشور است. ساخت بزرگ‌ترین کارخانه‌ی دیزلی سیار کشور به سفارش شرکت آب و فاضلاب کشور از افتخارات این شرکت است. نیروگاه سیاری که با توان ۱۰ مگاوات آمپر در ۵ مازول با قابلیت انتخاب تامین برق خروجی ۴۰۰ ولت، ۶ کیلوولت، ۱۱ کیلوولت، ۲۴ کیلوولت و ۳۳ کیلوولت می‌تواند در مدیریت بحران بسیار کارگشا باشد.

گروه محیط زیست شرکت صانع شرق هم در بحث‌هایی مانند تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، زباله‌سوز و مانند آن فعالیت دارد و ساخت بزرگ‌ترین تصفیه‌خانه‌ی MBR کشور به‌صورت محلی در پارک چهل بازه مشهد شاخص‌ترین فعالیت این

بخش است. تصفیه‌خانه‌ای که به‌صورت سرمایه‌گذاری برای شهرداری مشهد ساخته شده و هم‌اکنون در حال بهره‌برداری است. علاوه بر این‌ها، شرکت صانع شرق یک بخش تامین تجهیزات دارد که کارهای بازرگانی و تامین کالا از منابع معتبر را برای مجموعه‌ی صانع شرق و شرکت‌های همکار انجام می‌دهد.

مهندس محسن شادمان دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه فردوسی مشهد و مدیرعامل شرکت صانع شرق که ریاست هیات مدیره‌ی شهرک صنعتی ماشین ابزار، ریاست هیات مدیره‌ی سندیکای صنعت برق استان خراسان و ریاست کمیسیون انرژی اتاق بازرگانی، صنایع و معادن مشهد را هم در کارنامه‌ی فعالیت‌های صنعتی و صنفی خود دارد، این گوناگونی فعالیت‌ها در مجموعه‌ی



مهندس محسن شادمان؛ مدیر عامل شرکت صانع شرق

صانع شرق را حاصل نیازها و شرایط بازار می‌داند و می‌گوید: «یک شرکت تولیدی اگر در یک زمینه ثابت بماند بعد از مدتی بازار را از دست خواهد داد و در مجموعه‌ی مهمان شرق، تصمیم به گسترش کارها و حوزه‌ی فعالیت‌ها هم‌زمان با رخدادهای اقتصادی و بحران ارزی و تحریمی در دهه‌ی ۹۰ گرفته شد و ما برای پیوستگی و حفظ جایگاه اقتصادی باید گوناگونی در سبد محصولات را در دستور کار قرار می‌دادیم. به همین دلیل کارها به گونه‌ای گسترش یافت که در حال حاضر در مجموعه‌ی صانع شرق هر یک از بخش‌ها ظرفیت تبدیل شدن به یک یا دو شرکت مستقل را دارند اگر چه چنین تصمیمی وجود ندارد».

سیاست‌گذاری‌ها و حمایت از صنعت برق

در مورد صنعت برق و بخش انرژی، دولت و مجموعه‌های وابسته به دولت بزرگ‌ترین مشتری و مصرف‌کننده‌ی خدمات و کالاهای مربوط به این بخش هستند، به این ترتیب هر نوع سیاست‌گذاری و نگرش حمایتی در این بخش خواهد توانست بر تمام فعالیت‌های حوزه‌ی صنعت برق و انرژی تأثیر جدی بگذارد. با این حال مدیرعامل صانع شرق اعتقاد دارد اگر بخش دولتی هیچ نوع حمایت و کمکی به این بخش نکند و فقط به وظیفه‌های قانونی خود به درستی عمل کند، صنعت برق از وضعیت قابل قبولی برخوردار خواهد شد. وی به عنوان یک صنعتگر و بر اساس سال‌ها تجربه می‌گوید انتظار ما از بخش دولتی این است که دست‌کم به

پرداخت نشده است، موضوعی که نه تنها انگیزه‌های سرمایه‌گذاری بلکه امکان سرمایه‌گذاری را از بین می‌برد و بخش خصوصی را با مشکلات پرتعدادی روبه‌رو می‌سازد.

رئیس کمیسیون انرژی اتاق بازرگانی در مورد سیاست‌های حاکم بر حوزه‌ی آب و برق می‌گوید: «نوع نگرش در این حوزه اشتباه است و به جای این که به این حوزه یک نگرش اقتصادی داشته باشیم، یک نگرش سیاسی بر این بخش حاکم شده است و تمام راه‌حلهایی که ارایه می‌شود هم راه حل واقعی نیست بلکه راه‌حل‌ها سیاسی و نمایشی است. وقتی قیمت یک بطری آب معدنی ۴۰۰۰ تومان و قیمت یک کیلووات ساعت برق مصرفی ۱۱۰ تومان است، به معنای وقوع یک فاجعه‌ی اقتصادی در این بخش است. همین رخداد در بخش کشاورزی و در ارتباط با منابع آبی هم با توجه به محصولات با راندمان بسیار پایین و صرف آب بالا وجود دارد و به دلیل مسائل سیاسی و حاشیه‌های پس از آن کسی برای این بخش‌ها تصمیم درستی نمی‌گیرد. چطور می‌شود به آینده‌ی اقتصادی صنعتی امیدوار بود که برق را از منابع تولید پراکنده ۴۸۰ تومان در کیلووات ساعت و از انرژی خورشیدی ۱۲۰۰ تومان در کیلووات ساعت خریداری می‌کند و به قیمت میانگین ۱۲۰ تومان در هر کیلووات به فروش می‌رساند؟ پر واضح است که ما با یک اقتصاد فلج در این زمینه روبه‌رو هستیم و موفق شدن چنین اقتصادی غیرممکن است. نتیجه‌ی چنین نگرشی ۱۲۰۰۰ مگاوات کسری انرژی در تابستان ۱۴۰۰ است که اکنون

وظیفه‌های قراردادی و قانونی خود عمل کند. مهندس شادمان در ادامه می‌افزاید: «وقتی در کشور از سرمایه‌گذاری صحبت می‌شود و ضرورت جذب سرمایه‌گذاری در بخش‌های مولد و توسعه‌ی سرمایه‌گذاری با توجه به شرایط کشور بر همگان روشن است، رفتارهای بخش دولتی باید در عمل هم این موضوع را نشان دهد. اما در عمل وقتی شاهد هستیم قراردادهایی که سه سال از انعقاد آن می‌گذرد و بخش دولتی خدمات و کالا را دریافت نموده اما پولی بابت آن پرداخت نکرده است، صحبت از حمایت‌های دولتی اندکی دور از انتظار به نظر می‌رسد». محسن شادمان در ادامه به سرمایه‌گذاری شرکت صانع شرق در پروژه‌ی تصفیه فاضلاب شهری اشاره دارد که نه تنها از زمان شروع پروژه که از زمان شروع به بهره‌برداری پروژه در اردیبهشت سال ۱۴۰۰ هنوز ریالی به این شرکت



ساخت بزرگ‌ترین تصفیه‌خانه‌ی MBR کشور به صورت محلی در پارک چهل بازه مشهد توسط گروه محیط زیست شرکت صانع شرق



تصمیم گرفته شده است این کسری با استفاده از انرژی خورشیدی جبران شود. در حالی که ۳۵۰ هزار میلیارد تومان منابع مالی برای آن مورد نیاز است، سرمایه‌ای که نه دولت و وزارت نیرو توانایی پرداخت آن را دارد و نه در بخش خصوصی انگیزه‌ای برای این سرمایه‌گذاری وجود دارد و اگر فرض کنیم سرمایه‌گذارانی بدون توجه به بازگشت سرمایه در این زمینه حاضر به سرمایه‌گذاری شوند آیا بودجه‌ی وزارت نیرو پاسخگوی پرداخت سالانه ۷۰ تا ۸۰ هزار میلیارد تومان پول برق خریداری شده از بخش خصوصی خواهد بود؟»

تولید برق در صنایع پرمصرف

یکی از فعالیتهای شرکت صانع شرق ساخت نیروگاههای تولید پراکنده است. در برنامه‌های دولت سیزدهم برای صنایع پرمصرف ساخت نیروگاه پیش‌بینی شده است. این موضوع موافقان و مخالفانی دارد، آن‌چه از سخنان مهندس محسن شادمان مدیرعامل شرکت صانع شرق برمی‌آید با این طرح موافق است: «صنعت برق از پیک بار سال ۱۳۹۸ به صورت لب‌میزی گذر نمود و در سال ۱۳۹۹ کاهش گرمای تابستان و شرایط مناسب بارندگی‌ها کمک نمود تا خاموشی رخ ندهد. اما در اوج مصرف سال ۱۴۰۰ با کسری ۱۲۰۰۰ مگاوات انرژی خاموشی‌های گسترده رخ داد و صنایع بیشترین خاموشی‌ها را تجربه کردند در حالی که صنایع در تابستان و زمستان به‌صورت پیوسته ۴۵۰۰ مگاوات انرژی را مصرف می‌کنند و از نظر اقتصادی مشتری خوبی برای صنعت برق به شمار می‌روند و بر اساس اصول اقتصادی و مشتری‌مداری باید این مشتری حفظ شود اما در تابستان در زمان کمبود برق ابتدا تصمیم به اعمال خاموشی برای صنایع گرفته شد و این هم ناشی از همان نگرش سیاسی به صنعت برق است و خاموشی‌ها باز هم مشتری خوب را هدف قرار می‌دهد که از مصرف درست برخوردار بوده است. اکنون بحث این نیست که آیا ساخت نیروگاه توسط صنایع پرمصرف درست است یا موضوعی اشتباه است. اگر گفته شود آن‌ها تخصصی در این زمینه ندارند باید بگوییم بسیاری از صنایع برای مصارف داخلی خود دست به تولید کالاهایی مانند اکسیژن یا مواد شیمیایی می‌زنند و در کارخانه‌های قند از گذشته هم تولید

بنابراین یکی از جدی‌ترین بحران‌هایی که کشور ما به شدت با آن درگیر است بحران آب است و باز هم به نگرش‌های سیاسی مربوط می‌شود. شعارهایی که در گذشته توسط برخی از اشخاص سیاسی در مورد خودکفایی در برخی از محصولات پرمصرف کشاورزی داده شده است اکنون پیامدهای خود را در جاهایی مانند اصفهان نشان داده است. وجود ۸۵۰ هزار حلقه چاه کشاورزی که نیمی از آن‌ها بدون مجوز است و منابع آب زیرزمینی را با برداشت‌های بی‌رحمانه و بی‌رویه و خارج از استانداردهای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بی‌مهابا هدر می‌دهند تنها بخشی از این چرخه‌ی ناسالم است که توان و جسارت لازم برای تعطیلی بسیاری از شیوه‌های کشاورزی را از بین برده است و بخش دیگر این چرخه‌ی نادرست، اجرایی نشدن شبکه‌ی فاضلاب به‌صورت درست و کامل است تا زمینه‌ی بازچرخانی آب را کامل کند. شرکت آب و فاضلاب در حالی که بسیاری از مشتریان به شبکه‌ی فاضلاب متصل نیستند و بازچرخانی آب اتفاق نمی‌افتد تنها به دریافت وجه آب‌نمان فاضلاب اکتفا کرده است. در این حوزه‌ی مهم هم نیازمند تصمیم‌های سخت اما درست هستیم تا از بحران‌های بیشتر پیشگیری شود اما شرایط به‌گونه‌ای است که جسارت این تصمیم‌های سخت را به‌دلیل نگاه سیاسی حاکم بر این حوزه از مدیران کشور سلب نموده است.

برق مرسوم بوده است اگر چه بهتر است حوزه‌های تخصصی به متخصصان واگذار شود. اما موضوع مهم‌تر این است که چرا در بسیاری از صنایع مانند کاشی و سرامیک یا مواد غذایی، انتقال فناوری و سرمایه‌گذاری به وسیله‌ی بخش خصوصی رخ داده است ولی در مورد صنعت برق چنین موضوعی اتفاق نیفتاده است. پاسخ این پرسش آشکار است؛ چون صنعت برق از یک اقتصادی منطقه‌ی مبتنی بر واقعیت‌های اقتصادی برخوردار نیست. سرمایه‌گذاری که در زمینه‌ی تولید برق سرمایه‌گذاری می‌کند می‌داند که برق کالایی است که در لحظه‌ی تولید باید به مشتری عرضه شود و از قابلیت انبارش و ذخیره‌سازی برخوردار نیست و مشتری آن هم دولت است که نرخ خرید و زمان پرداخت را خودش تعیین می‌کند و چون از بودجه‌ی لازم هم برخوردار نیست، سرمایه‌گذار را دچار مشکلاتی نموده است که دیگر سرمایه‌گذاران اشتیاقی برای سرمایه‌گذاری در این زمینه نشان نمی‌دهند و هیچ سرمایه‌گذاری را نمی‌توان پیدا کرد که دوبار در صنعت تولید برق سرمایه‌گذاری کرده باشد.

آب و محیط زیست

مهندس شادمان اعتقاد دارد در حوزه‌ی آب فاجعه‌ای به مراتب بدتر از صنعت برق رخ داده است اما او به یک فرصت هم در این زمینه اشاره دارد: «در گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس ۱۰۰ بحران شناسایی شده است که سه مورد از ده مورد نخست آن به‌طور مستقیم به آب اشاره دارد.



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر چند مدل ارزیابی پیشنهادی برای مقایسه سازندگان ماهواره از دید اپراتورهای ماهواره

■ پدram حاجی پور*، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران، hajipour@itrc.ac.ir

■ غلامرضا ضمیریان، پژوهشگر پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران، zamirian@itrc.ac.ir

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

*نویسنده مسئول

چکیده

یکی از مهمترین عوامل ایجاد رقابت در نسل‌های آینده ارتباطات ماهواره‌ای، برخورداری از یک سیستم ماهواره‌ای مناسب می‌باشد. برای این امر لازم است تا اپراتورهای ماهواره‌ای، با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اقتصادی از میان سازندگان مختلف ماهواره انتخاب مناسبی داشته باشند. بنابراین، لزوم انتخاب سازنده از میان سازندگان موجود در این حوزه به عنوان یک چالش جدی مطرح می‌باشد. در این مقاله به مرور چندین روش بررسی و مقایسه معیارهای ارزیابی سازندگان ماهواره بر مبنای روش‌های بیشترین، لکزیگرافی، رضایت‌بخش خاص و رضایت‌بخش عطفی که جزو الگوریتم‌های رایج ریاضی برای مقایسه پارامترها در یک مساله هدف خواهد بود، پرداخته شده و در نهایت روش جامع و کاملتری نسبت به کارهای قبلی با ایجاد یک ماتریس ارزیابی متقابل و بر حسب معیارهای اصلی و فرعی، برای ارزیابی سازندگان ماهواره از دید اپراتور ارائه شده است. در این مقاله برای انتخاب بهتر و کاراتر، ۹ معیار اصلی و ۲۶ معیار فرعی بر حسب نوع سرویس و خدمات پیشروی ارتباطات ماهواره‌ای به منظور ارزیابی و انتخاب مابین سازندگان ماهواره ارائه و با کارهای قبلی مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: ارتباطات ماهواره‌ای، رتبه‌بندی، اپراتور ماهواره‌ای، مدل ارزیابی

An overview of several proposed evaluation models to compare satellite manufacturers from the perspective of satellite operators

■ Pedram hajipour, Faculty member of ICT Research Institute, Tehran, Iran. hajipour@itrc.ac.ir

■ Gholamreza zamirian, Researcher at ICT Research Institute, Tehran, Iran, zamirian@itrc.ac.ir

■ Parvin sojoodi sardrood, Researcher at ICT Research Institute, Tehran, Iran, p.sojoodi@itrc.ac.ir

Abstract

One of the most important factors in creating competition in future generations of satellite communications is to have a proper satellite system. For this reason, it is necessary for satellite operators to have a suitable choice

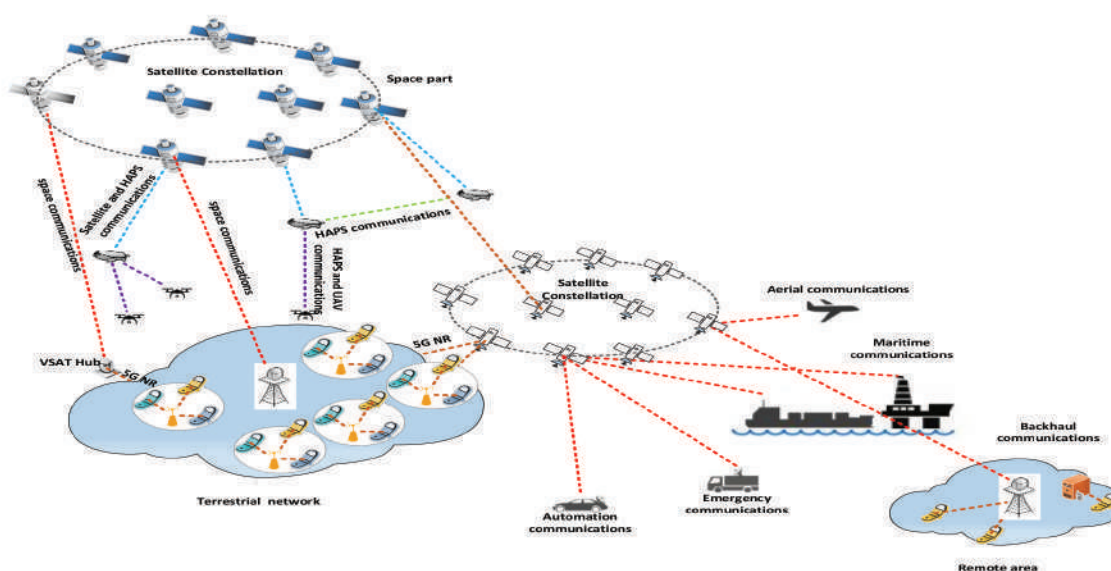
among different satellite manufacturers, taking into account technical and economic considerations. Therefore, the necessary to select a manufacturer from among the existing manufacturers in this field is a serious challenge. In this paper, we review several methods and compare the evaluation criteria of satellite manufacturers based on the methods of MAXI MAX, Lexicography, non-compensatory decision making and compensatory decision making, which will be a booklet of common mathematical algorithms to compare parameters in a target problem. Finally, a more comprehensive and complete method than previous works has been presented based creating a cross-evaluation matrix according to the main- criteria and side-criteria to evaluate the satellite manufacturers by the satellite operator. In this paper, for better and more efficient selection, nine main criteria and twenty-six side-criteria according to the type of service and favor of satellite communications are presented in order to evaluate and select among satellite manufacturers and compare with previous works.

Keywords: Satellite communications, Ranking, Satellite operator, Evaluation model

۱- مقدمه

امروزه نقش و جایگاه ارتباطات ماهواره‌ای در شبکه‌های ارتباطی نسل پنجم و بعد از آن، به‌منظور گسترش پوشش جغرافیایی و پاسخگویی به تقاضاهای روزافزون برای ارایه سرویس‌های نوین مخابراتی مانند آموزش از راه دور، خدمات پزشکی، سرویس‌های برخط در ارتباطات خودرویی هوشمند و غیره در هر مکان و در هر زمان، امری مهم و حیاتی می‌باشد [۱-۳]. علت این امر دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان بالای یک سیستم ماهواره‌ای نسبت به سایر بسترهای ارتباطی به‌خصوص در مناطق دورافتاده و بدون زیرساخت‌های ارتباطی می‌باشد که می‌تواند به‌عنوان یکی از روش‌های ارتباطی پایدار با قیمت و هزینه کمتر در بازه زمانی درازمدت نسبت به سایر زیرساخت‌های زمینی مانند لینک رادیویی و فیبر نوری مورد استفاده قرار گیرد. از مهمترین ویژگی‌های یک سیستم ماهواره‌ای بر خلاف سایر روش‌های ارتباطی، عدم آسیب‌پذیری آن در حوادث طبیعی مانند زلزله است به همین دلیل می‌تواند به‌عنوان پشتیبان شبکه‌های ارتباطی زمینی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به رشد فناوری و جهت برآورد الزامات تاخیر در ارتباطات، منظومه‌های ماهواره‌ای در مدار پایین زمین مورد توجه قرار گرفته است. امروزه داشتن یک شبکه ماهواره‌ای

متشکل از یک یا چند ماهواره در قالب شبکه ماهواره‌ای در ارتفاعات مداری یکسان یا مختلف به همراه یک شبکه ارتباطات زمینی برای همگرایی با شبکه ارتباطی جدید مانند نسل پنجم و بعد از آن به‌منظور پاسخگویی به نیازهای روز افزون سرویس‌های نوین مطرح می‌باشد. شبکه‌های بیان شده با عنوان شبکه‌های ترکیبی ماهواره با بستر زمینی (STIN) شناخته می‌شوند [۴-۶]. بنابراین با توجه به گسترش و تنوع خدمات و سرویس‌های نوین مخابراتی در این نوع شبکه‌های ترکیبی متشکل از بستر زمینی و ماهواره لزوم انتخاب یک سیستم ماهواره‌ای با کارایی و قابلیت اطمینان بالا به‌عنوان یک ضرورت در توسعه شبکه‌های ارتباطات مخابراتی هر کشور و به‌عنوان یکی از عوامل توسعه رشد اقتصادی می‌بایست مد نظر قرار گیرد. در شکل (۱) معماری پیشنهادی این نوع شبکه‌های نوین مخابراتی ارایه شده است، همان‌طور که در این شکل مشخص است در این ساختار مجموعه‌ای از ماهواره‌ها در قالب منظومه‌های ماهواره‌ای به‌منظور انتقال داده، ارایه بک‌هاال ماهواره‌ای، توسعه پوشش‌دهی خدمات در نقاط دور افتاده و غیر قابل دسترس به ارایه خدمات می‌پردازند [۷]. اپراتورهای ماهواره‌ای در یک یا چند کشور می‌توانند ارایه دهنده سرویس از طریق لینک ماهواره‌ای به کاربران نهایی خود با توجه



شکل ۱: معماری پیشنهادی برای شبکه‌های آینده مخابراتی مبتنی بر ماهواره [۷]

کوچک و همچنین پرتاب آنها موفقیت‌هایی کسب کرده است. امروزه، شرکت‌های پیشرو در زمینه طراحی و ساخت انواع ماهواره‌ها در دنیا وجود دارند که از جمله آنها می‌توان از شرکت‌های OHB SE و Airbus Defence and Space در اروپا و شرکت Space & Security Boeing Defense در آمریکا نام برد. همچنین شرکت‌های سازنده ماهواره‌های کوچک مخابراتی در آمریکا AeroAstro, Inc، در اسپانیا Alén Space می‌باشند. در زمینه طراحی پرتابگرها نیز می‌توان به پرتابگر کشور هلند به نام Delft Aerospace Rocket Engineering و در کشور هند به نام ISRO اشاره نمود. البته پرتابگرهایی توسط چندین کشور طراحی و ساخته شده که می‌توان به Arianespace، Eurockot Launch Services، COSMOS International و غیره اشاره نمود.

جدول ۱: مقایسه درآمدی اپراتورهای ماهواره‌ای از حیث درآمدی تا ابتدای سال ۲۰۲۰ میلادی [۸-۱۱]

اپراتور ماهواره	Viasat	INTELSAT	SES	EUTELSAT
مالکیت	لوکزامبورگ	آمریکا	لوکزامبورگ/آمریکا	فرانسه
تعداد ماهواره پرتاب شده	۵۲	۴	۵۹	۳۷
تعداد ماهواره آماده پرتاب	۶	۱	۸	۶
میزان درآمد حاصله در سال ۲۰۲۰ میلادی	۲/۰۶۸ میلیارد دلار	۲/۰۶۱ میلیارد دلار	۱/۹۸۳ میلیارد دلار	۱/۳۲۱ میلیارد دلار
میزان درصد رشد درآمد نسبت به سال ۲۰۰۶ میلادی	۷۹/۰۲	۱۹/۳۱	۱۸/۴۵	۲۰/۵۱

همان‌طور که گفته شد، لزوم داشتن معیارهایی که اپراتورها بتوانند سازندگان مختلف را با یکدیگر از دید فنی و اقتصادی مقایسه نمایند، امری اجتناب‌ناپذیر است. هدف از این مقاله، ارائه یک مجموعه معیار ارزیابی بر حسب واقعیت‌های امروزی اقتصاد

به نیازهای داخلی و یا حتی بین‌المللی باشند. هر اپراتور ماهواره‌ای بنا به طرح و سیاستی که کشورها در استفاده از سرویس ماهواره‌ای دارند و با ملاحظه قوانین و مقررات حوزه ملی و بین‌المللی فضایی، بخشی از دارایی خود را جهت اجاره یا خرید ماهواره هزینه خواهند نمود. این هزینه‌کرد باید به گونه‌ای باشد که سود قابل توجهی از ارایه خدمات ماهواره‌ای عاید اپراتورها شود. طبق اطلاعات آماری ارایه شده توسط اپراتورهای ماهواره‌ای، چهار اپراتور ماهواره‌ای که در جدول (۱) مشاهده می‌گردد، دارای بیشترین میزان درآمد حاصله از ارایه سرویس ثابت ماهواره‌ای تا ابتدای سال ۲۰۲۰ میلادی بودند. طبق بررسی‌های به عمل آمده نسبت به سال ۲۰۰۶ میلادی و بر حسب درآمدهای حاصله در آن، میزان رشد درآمد به ترتیب دارای ۷۹/۰۲، ۱۹/۳۱، ۱۸/۴۵ و در نهایت ۲۰/۵۱ درصد بوده است. این میزان رشد درآمد، بیانگر توجه ویژه اپراتورهای ماهواره‌ای به نیاز و خواسته کاربران ملی و بین‌المللی به منظور افزایش درآمدی در سال‌های آتی می‌باشد. اپراتورهای ماهواره‌ای برای بهبود عملکرد اقتصادی خود می‌بایست به سراغ سازندگان ماهواره و در نهایت پرتاب‌کنندگان مطمئنی بروند که بتوانند با انتخاب فناوری در ساخت و پرتاب ماهواره، توجیه مناسبی برای سرمایه‌گذاری خود در میان کشورهای تامین‌کننده مالی آنها و دریافت‌کنندگان خدمات ماهواره‌ای نمایند. بنابراین یک اپراتور ماهواره‌ای بر حسب نوع سرویس (ها) می‌بایست به مشخصاتی که یک سیستم ماهواره‌ای داشته باشد، توجه جدی نماید. یک دسته‌بندی کلی از این نوع مشخصات در جدول (۲) آورده شده است. بنابراین لزوم داشتن یک معیار ارزیابی مناسب به منظور مقایسه سازندگان ماهواره ضروری به نظر می‌رسد. سازندگان سیستم‌های ماهواره‌ای در زمینه طراحی و ساخت ماهواره‌های بزرگ تجاری مخابراتی در نقاط مداری مختلف در حال فعالیت می‌باشند.

طراحی و ساخت ماهواره‌های کوچک، آماتوری و مکعبی در ارتفاعات پایین‌تر مانند LEO نیز امروزه مورد توجه قرار گرفته است. همچنین پرتابگران سیستم‌های ماهواره‌ای بر حسب نوع و مشخصات فنی پرتابگر خود ماهواره‌ها را در مدار قرار می‌دهند. کشور ایران در دو حوزه طراحی و ساخت ماهواره غیرمخابراتی

جدول ۲: عوامل مورد توجه در انتخاب نوع ماهواره بر حسب نوع سرویس

مشخصات سرویس فضایی	عوامل مورد توجه
باند فرکانسی مجاز به‌خصوص باندهای فرکانسی جدید در نسل‌های آتی شبکه نوین مخابراتی	نحوه ارایه ظرفیت بر حسب باند فرکانسی و همچنین ساختار محموله از منظر شفاف یا قابلیت برداشتی بودن آن و با ترکیبی از آن دو در ساختار هایبریدی
باند باریک یا پهن باند بودن	میزان ظرفیت بر حسب نوع محموله
حساسیت / عدم حساسیت سرویس به تاخیر	ارتفاع مداری
نحوه ارایه سرویس به کاربران نهایی	نوع طراحی و ساخت محموله به همراه سیستم و زیر سیستم‌های به کار رفته در آن مانند ساختار و چیدمان آنتن فرستنده-گیرنده و نحوه طراحی بخش RF، گیرنده، تغذیه و غیره
میزان قابلیت اطمینان بر حسب دوره زمانی ارایه سرویس	میزان طول عمر ماهواره ساخته شده بر حسب کیفیت در طراحی و ساخت و در نهایت پرتاب ماهواره

صنعت ماهواره می‌باشد. در بخش دوم مقاله به بررسی مولفه‌های اقتصادی در زنجیره اقتصادی صنعت ماهواره پرداخته خواهد شد. در بخش سوم به ارزیابی انواع مدل‌های ارزیابی معیارها (اصلی و فرعی) و رتبه‌بندی آنها مابین سازندگان مختلف ماهواره بر حسب مدل‌های قبلی موجود در مقالات و مدل‌های جدید بر حسب نیازهای امروزی و آینده بر حسب مدل‌های رایج ریاضی خواهیم پرداخت. در مدل پیشنهادی به استخراج وزن هر کدام از معیارهای اصلی و فرعی در قالب یک ماتریس ارزیابی متقابل پرداخته و مدل بالا با سایر مدل‌های قبلی و ارزیابی شده در مقاله مقایسه خواهد شد. در نهایت، در بخش آخر به بررسی نتایج و مقایسه آنها با کار(های) قبلی پرداخته خواهد شد.

۲- بررسی مولفه‌های مهم در زنجیره اقتصادی ماهواره

امروزه، اپراتورهای ماهواره‌ای بزرگ دنیا برای افزایش میزان سودآوری و ثروت‌آفرینی خود، به دنبال افزایش رضایتمندی مشتریان خود نسبت به خواسته‌ها و انتظارات موجود می‌باشند. بنابراین، امروزه بیشتر این نوع اپراتورها، به دنبال ارزیابی جامع ارزیابی و نظارت سیستم‌های ماهواره‌ای خود که در حال ارزیابی و خدمات می‌باشند، هستند [۱۲]. باید توجه نمود که ارزیابی مدل ارزیابی، مستلزم شناخت کل زنجیره ارتباطی از اپراتور ماهواره‌ای به عنوان نهاد بالادستی زنجیره و در نهایت کاربران زمینی به عنوان مصرف‌کننده خدمات در انتهای زنجیره خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، هر نوع اپراتور ماهواره‌ای برای ارائه خدمات و سرویس به کاربران نهایی، می‌بایست از یک یا چند سیستم ماهواره استفاده نماید. این زنجیره بر اساس نحوه تعامل بین یک اپراتور ماهواره در بالاترین سطح تا کاربران نهایی با توجه به سازوکار مرجع [۱۳] پیشنهاد و ارزیابی شده است.



شکل ۲: جایگاه و نحوه ارتباط مابین اپراتور ماهواره‌ای و کاربران به منظور ارائه خدمات سرویس‌های ماهواره‌ای [۱۳]

بنابراین، فرایند به‌کارگیری و انتخاب سیستم ماهواره در این زنجیره می‌تواند بر حسب برنامه راهبردی، اقتصادی و سیاسی هر اپراتور ماهواره‌ای تعیین گردد.

۳- انواع معیارهای ارزیابی و انتخاب سیستم ماهواره‌ای از دید اپراتور ماهواره‌ای

به‌طور کلی، داشتن معیارهای انتخاب و الویت‌بندی بین سازندگان و ارائه‌دهندگان خدمات ساخت و پرتاب یک سیستم ماهواره‌ای برای اپراتورهای ماهواره‌ای فرایندی سخت و چالش‌برانگیز خواهد بود. با وجود تعداد کم سازندگان ماهواره در دنیا، فرایند انتخاب و ارزیابی می‌تواند باعث ایجاد رقابت میان آنها و بهبود حضور آنها در بازارهای داخلی و خارجی گردد. برای همین منظور لازم است تا خبرگان حوزه صنعت ارتباطات ماهواره‌ای با توجه به ملاحظات سیاسی، اقتصادی و حقوقی، معیارهایی را برای ارزیابی

و انتخاب سازندگان ماهواره ارزیابی نمایند. یکی از روش‌های ارزیابی برای هر نوع سیستم پیچیده، استفاده از مدل‌های آماری ریاضی خواهد بود که قادر است معیارها و یا حتی زیر معیارهای تعیین شده را نظیر به نظیر با یکدیگر مقایسه نماید. در همین راستا در مرجع [۱۴]، یک فرایند ارزیابی بر حسب مدل آماری (MCDM) برای ارزیابی عملکرد یک سیستم مطرح شده که در آن بر حسب یک سری معیارهای اصلی و زیر معیارهای فرعی الگوی ارزیابی پیشنهاد شده است. هدف از این شیوه ارزیابی، انتخاب بهترین گزینه یا وزن‌دهی به عوامل تاثیرگذار در فرایند ارزیابی خواهد بود. به‌طور کلی در حالتی که نقاط ضعف یا قوت یک معیار نسبت به نقاط ضعف یا قوت سایر معیارهای دیگر در فرایند ارزیابی مستقل باشد، جزء مدل‌های غیرجبران‌کننده تصمیم‌گیری (NCDM) در مدل آماری MCDM شناخته می‌شوند. هر چند که مدل آماری MCDM، مدل جبرانی تصمیم‌گیری (CDM) نیز دارد که در این مقاله به‌واسطه داشتن روش‌های آماری ساده و غیرقابل انعطاف در مدل‌های ارزیابی مورد توجه قرار نمی‌گیرد. به‌طور کلی، مدل‌های غیرجبرانی، شامل روش‌هایی مانند بیشترین بیشینه، روش Lexicography، رضایت‌بخش خاص و رضایت‌بخش عطفی می‌باشد که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت [۱۵]. در ادامه به بررسی معیارها و زیر معیارهای پیش‌بینی شده در مقاله بر حسب تجربیات گذشته در [۱۶] و نیازهای پیش رو در ارتباطات ماهواره‌ای بر حسب ضرورت و دلیل اهمیت وجود آنها خواهیم پرداخت.

۱- معیار طراحی سیستم (SD) ماهواره‌ای به جز محموله مخابراتی شامل مکانیزم طراحی، سیستم ردیابی و هدایت، سیستم کنترل وضعیت، سیستم پیش‌رانش، سیستم توزیع توان، سیستم کنترل حرارتی، سیستم مدیریت و تبادل داده خواهد بود [۱۷].

۲- ارزیابی انواع محموله مخابراتی (CPT) قابل ارزیابی توسط سازندگان ماهواره در قالب سه دسته بر اساس روشی که سیگنال را پردازش می‌کنند، عبارتند از:

۱-۲- ترانسپوندرهای شفاف یا لوله‌خمشده: ترانسپوندرهای شفاف سیگنال فراسو را طوری پردازش می‌کنند که تنها فرکانس و دامنه آنها تغییر کند و مدولاسیون و شکل طیفی آن تغییر نکند.

۲-۲- ترانسپوندرهای بازمولد: در ترانسپوندرهای باز مولد برخی پردازش‌ها در ماهواره انجام شده و سیگنال دریافتی پیش از ارسال مجدد تغییر می‌کند.

۳-۲- ترانسپوندرهای ترکیبی شفاف و باز مولد: این نوع ترانسپوندرها دارای دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مجزا هستند که قادرند به‌وسیله یک ساختار سوئیچ ماتریس پیش‌بینی شده در هر زمان و بر حسب نوع و میزان کیفیت خدمات مورد انتظار برای کاربران نهایی به‌طور همزمان از دو نوع ترانسپوندر ترکیبی شفاف و باز مولد بر حسب الویت بهره‌برند [۱۸].

۳- معیار میزان ظرفیت محموله (PC) بر حسب باند فرکانسی که شامل باندهای فرکانسی پایین مانند X، L و C که بیشتر در ماهواره‌های نظامی به منظور ارائه سرویس‌های نظامی و یا سرویس‌های مخابراتی کم ظرفیت کاربرد خواهد داشت. همچنین باندهای میانی مانند Ku و Ka که امروزه در ماهواره‌هایی با ظرفیت انتقال بالا کاربرد دارند. در نهایت باندهای فرکانسی بالا مانند تراهرتز بوده که در آینده نزدیک در شبکه‌های ماهواره

نسل ششم کاربرد خواهد داشت [۲۱-۱۹].

۴- معیار سوابق سازنده (HM) بر حسب تعداد پروژه‌های مرتبط با طراحی، ساخت و تست ماهواره و همچنین پرتاب موفق آن خواهد بود [۱۶].

۵- معیار عملکرد ماهواره (SF) بر حسب نوع ماهواره‌های در نظر گرفته شده که می‌توان به سرویس‌های مختلف مانند سرویس‌های مخابراتی، مشاهده زمین، ناوبری و سیستم موقعیت یابی جهانی (GPS) توسط ماهواره، توسعه‌های فنی و غیره اشاره نمود [۲۲].

۶- معیار میزان هزینه (C) ساخت شامل هزینه طرح ماهواره (SP)، هزینه ساخت به همراه تست ماهواره، هزینه پرتاب ماهواره، هزینه بیمه ماهواره (SI) ناشی از پرتاب ناموفق و نهایتاً سایر هزینه‌های اجرایی ناشی از الزامات فضایی خواهد بود. البته هزینه دیگری نیز می‌توان بواسطه برخی از الزامات فنی در طراحی‌های مختلف پیش‌بینی نمود که البته در مقایسه با ۳ هزینه اصلی دیگر مقدار آن ناچیز خواهد بود [۲۳-۲۴].

۷- معیار طول عمر (L) ماهواره در مدار که بر حسب ارتفاع مداری و نوع مأموریت تعیین خواهد گردید [۱۶].

۸- معیار تجهیزات زمینی (GS) قابل عرضه توسط سازندگان ماهواره به منظور ردیابی، کنترل و مدیریت تبادل داده‌های مورد نیاز خواهد بود [۱۶].

۹- معیار مدت زمان ساخت ماهواره‌ها (TD) توسط سازندگان این نوع شبکه‌های ترکیبی از ماهواره خواهد بود. باید توجه نمود که طبق قوانین و مقررات موجود در سازمان بین‌المللی مخابرات برای برخی از نقاط مداری، محدودیت زمانی برای پرتاب و قرارگیری ماهواره پیش‌بینی شده است. بنابراین معیار فوق عامل مهمی در ارتباط با این موضوع خواهد بود [۱۶].

۳-۱- روش ارزیابی متقابل معیارها بر حسب نمره‌دهی در مدل AHP

در این بخش، مطابق با مدل AHP یک سری معیار و زیرمعیار برای ارزیابی سازندگان ماهواره‌های مخابراتی بر حسب معیارهای پیشنهادی توسط نویسندگان مقاله ارائه می‌گردد. به طور کلی، مدل AHP توسط آقای توماس ساتی [۲۵]، برای ارزیابی و انتخاب بین سیستم‌های پیچیده بر حسب معیارهای پیش‌بینی شده ارائه شد. روش امتیازدهی در این مدل بر مبنای مقایسه دو به دو معیارها در قالب ماتریس ارزیابی متقابل بود که مقدار عددی این مقایسه‌ها بر حسب اهمیت و ضرورت یک معیار نسبت به معیار دیگر در جدول (۳) ارائه شده است.

۳-۲- روش ارزیابی معیارها مطابق با روش بیشترین بیشینه

در این روش بر حسب نه معیار اصلی پیش‌بینی شده با اهمیت‌ترین معیار به عنوان معیار تاثیرگذار انتخاب شده و هر سازنده ماهواره‌ای که بیشترین امتیاز را در آن معیار اخذ کند، به

عنوان سازنده برتر ماهواره شناخته خواهد شد.

جدول ۴: شیوه امتیازدهی معیارها در مدل AHP [۱۶] و [۲۵]

میزان درجه تفاوت معیارها و زیر معیارها	امتیاز
یک معیار نسبت به دیگری بسیار بسیار مهمتر است.	۹
یک معیار نسبت به دیگری بسیار مهمتر است.	۷
یک معیار مهمتر از معیار دیگری است.	۵
یک معیار کمی از معیار دیگر در الویت است.	۳
دو معیار از لحاظ اهمیت در یک سطح قرار دارند.	۱

۳-۳- روش ارزیابی معیارها مطابق با الگوریتم روش Lexicography

در این روش ارزیابی به هر کدام از نه معیار اصلی ذکر شده در قسمت قبلی بر حسب ضرورت و اهمیت بر حسب یک معیار مشخص، یک نمره مطابق با جدول (۴) داده خواهد شد. سپس معیارها بر مبنای درصدی از ۱۰۰ که نرمالیزه شده است و درصد اهمیت هر کدام از معیارها بین زیر معیارهای اصلی بر حسب بیشترین میزان درصد کسب شده مطابق با جدول (۴) الویت‌بندی خواهد شد.

این روش ساده‌ترین روش ارزیابی بوده که در آن اهمیت معیارها دو به دو نسبت به یکدیگر در وزن‌دهی نهایی در نظر گرفته نخواهد شد. اساس کار این روش ارزیابی، بدین صورت است که بالاترین معیار بر مبنای وزن‌دهی بیشتر در ارزیابی مورد توجه قرار می‌گیرد. اگر در معیار نخست ارزیابی، هر دو سازنده ماهواره در رتبه نخست قرار بگیرند، به سراغ معیار بعدی از نظر وزن‌دهی رفته و سازندگان ماهواره، نسبت به آن معیار ارزیابی و رتبه‌بندی خواهند شد. همان‌طور که در جدول (۴) مشخص است، در این روش ارزیابی داشتن تجهیزات زمینی مناسب به منظور ردیابی، کنترل و مدیریت تبادل داده‌های مورد نیاز دارای بیشترین درجه اهمیت به میزان ۲۲/۵ درصد و طراحی یک سیستم ماهواره‌ای به جز محموله مخابراتی در کنار ظرفیت قابل حصول در ماهواره دارای کمترین درجه اهمیت به میزان ۳/۲ درصد خواهد بود. این روش ارزیابی بی‌شک نمی‌تواند روش مناسبی برای ارزیابی یک سیستم ماهواره‌ای باشد چون در صورت دادن وزن بیشتر به یک معیار با توجه به یک معیار مشخص می‌تواند، ارزیابی جامع و کاملی برای یک سازنده ماهواره از دید اپراتور ماهواره‌ای ایجاد نکند. نقطه ضعف این روش ممکن است عدم اهمیت کم یک معیار در طراحی و ساخت ماهواره به دلیل انتخاب یک معیار مشخص و از پیش تعیین شده در ارزیابی‌ها باشد. این در حالی است که در کل معیارها، شرایط به گونه‌ای دیگر باشد.

جدول ۴: ماتریس ارزیابی معیارهای اصلی سازندگان منظومه ماهواره‌ای بر حسب مدل Lexicography

ارزیابی معیارها	SD	PC	L	C	CT	CPT	TD	HM	GS
نسبت به معیار SD	1	1	3	3	3	3	5	5	7
نرم‌الیزه شده معیارها	≈ 0.032	≈ 0.032	≈ 0.096	≈ 0.096	≈ 0.096	≈ 0.096	≈ 0.161	≈ 0.161	≈ 0.225
درصد وزن دهی معیارها	≈ 3.2	≈ 3.2	≈ 9.6	≈ 9.6	≈ 9.6	≈ 9.6	≈ 16.1	≈ 16.1	≈ 22.5
درجه الویت	4			3			2		1

جدول ۵: معیارها و زیر معیارهای پیشنهادی در مدل AHP بر حسب مراجع مختلف

ردیف	معیارها	زیر معیارها	معیار ارزیابی مراجع [۱۶]	زیر معیارهای پیشنهادی در مدل AHP	وزن دهی زیر معیارهای پیشنهادی بر حسب درصد	مراجع
1	System design (SD)	Structure & Mechanism (S&M)	✓	✓	۱۱/۸	[17]
		Telemetry, tracking, and command	×	✓	۱۳/۵	
		Attitude Orbital Control (AOC)	✓	✓	۱۶/۲	
		Propulsion (Pr)		✓	۱۱/۸	
		Power(P)	×	✓	۴۱/۱	
		Thermal Control (TC)	×	✓	۴/۱	
		Command & Data Handling (C&DH)	×	✓	۲۸/۵	
2	Communication pay-load type (CPT)	Bent pipe (B)	×	✓	۲۵	[18]
		Regenerative (R)	×	✓	۲۵	
		Hybrid (H)	×	✓	۵۰	
3	Payload capacity (PC)	Lower band (X,L and C)	✓	✓	≈۱۱/۱۱	[19]
		Ku band	✓	✓	≈۴۴/۴۴	
		Ka band	✓	✓	≈۳۳/۳۳	
		Upper band (Q,V and Terahertz)	×	✓	≈۱۱/۱۱	
4	Heritage of manufacture (HM)	Company Heritage (CH)	✓	✓	۳۰	[16]
		Platform Heritage (PH)		✓	۷۰	
5	Satellite function(SF)	Communication	×	✓	۶۱	[22]
		Earth observation	×	✓	۲۷	
		Navigation/GPS	×	✓	۵/۷	
		Technical Development	×	✓	۵/۷	
		Other	×	✓	۰/۶	
6	Cost(C)	Satellite design (SD)	✓	✓	۱۵	[23-24]
		Satellite manufacturing (SM) (Production and test)		✓	۴۰	
		Satellite manufacturing (SM) (Production Launch Cost (LC) and test)	×	✓	۱۰	
		Satellite insurance (SI)	×	✓	۳۰	
		Other costs (Operational tasks due to the space requirements)	×	✓	۵	
7	Life time(L)	--	✓	✓	۱۰۰	[16]
8	Ground segment(GS)	--	✓	✓	۱۰۰	
9	Time to delivery (TD)	--	✓	✓	۱۰۰	

۳-۴- روش ارزیابی معیارها مطابق با روش رضایت بخش خاص

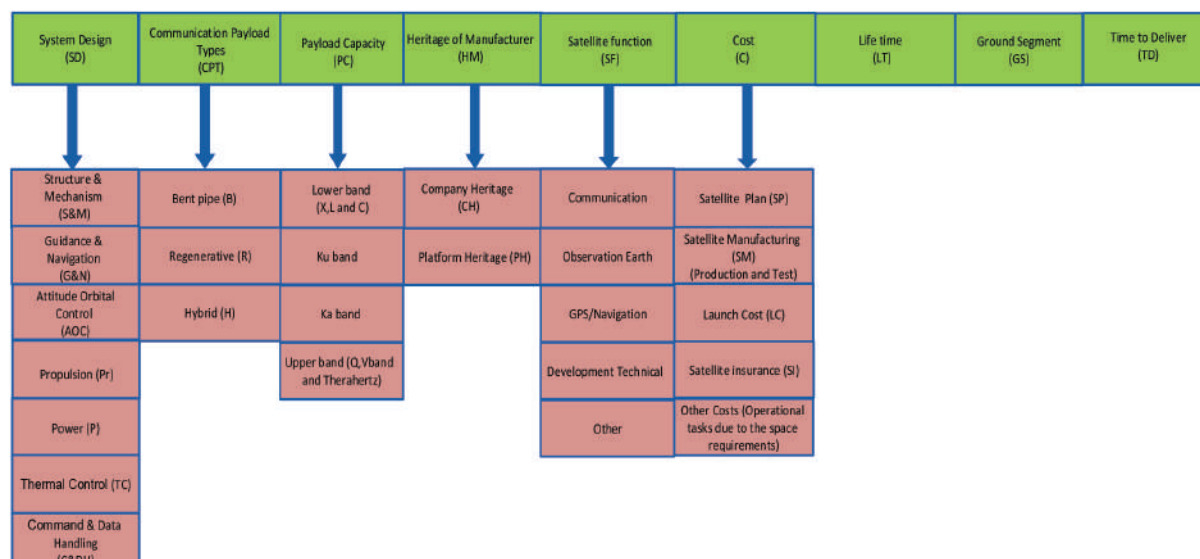
در این روش بر حسب ۹ معیار اصلی پیش‌بینی شده یک مقدار عددی به عنوان میزان قابل پذیرش آن معیار (آستانه برای حد قابل قبول) در نظر گرفته می‌شود و اگر گزینه‌ای تنها در یکی از معیارهایش به این حد مطلوب نرسد آن سازنده ماهواره از ارزیابی نهایی حذف خواهد شد.

۴- روش پیشنهادی ارزیابی معیارها و زیر معیارها

مطابق با جدول (۵) و بر حسب مراجع [۱۶-۲۴]، در این مقاله یک مدل ارزیابی جامع‌تری برای ارزیابی یک سازنده ماهواره، مطابق با شکل (۳) بر حسب ۹ معیار اصلی و ۲۶ زیرمعیار برای هرکدام از معیارهای اصلی، ارائه شده است. باید توجه نمود که در جهت تکمیل معیارها و زیر معیارهای ارائه شده در مرجع [۱۶] و بر حسب سرویس‌ها و نیازهای پیش رو در حوزه صنعت ارتباطات ماهواره‌ای، علاوه بر افزودن برخی زیر معیارهای جدید به هفت معیار قبلی، دو معیار اصلی دیگر نیز در کنار به منظور بررسی واقعی‌تر مدل ارزیابی استفاده شده است. این دو معیار اصلی شامل نوع محموله مخابراتی و همچنین نوع عملکرد سیستم ماهواره طراحی شده خواهد بود. با توجه به نوع مأموریت برخی از سیستم‌های ماهواره‌ای نیاز به پردازش سیگنال دریافتی از تجهیزات زمینی را نخواهند داشت. بنابراین بدون هیچ‌گونه پردازشی سیگنال دریافتی را به ایستگاه زمینی دیگر ارسال خواهند نمود. در اصل سیستم ماهواره در این شرایط نقش یک رله را خواهد داشت. اما در برخی از سیستم‌های ماهواره‌ای که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیاز به پردازش سیگنال دریافتی به واسطه حذف تداخلات احتمالی، اعمال فرایند کدینگ یا دیکدینگ برای ارسال یا دریافت سیگنال خواهند داشت. در فرایند انتخاب و ارزیابی معیارها و زیر معیارهای اصلی، اپراتور ماهواره‌ای با استخدام مشاوران خبره داخلی و خارجی که در حوزه طراحی، ساخت، تست و تجمیع سیستم ماهواره‌ای تجربه کافی دارند، به بررسی معیارها و زیرمعیارهای پیشنهادی می‌پردازد تا با وزن‌دهی مناسب و رتبه‌بندی سازندگان و پیشنهادکنندگان ساخت یک سیستم ماهواره بهترین آنها را برگزیند. در نهایت وزن‌دهی

هرکدام از معیارها و زیر معیارها می‌بایست متناسب با اهداف هر پروژه ماهواره‌ای به صورت پیشنهادی و بر حسب اهمیت هرکدام از آنها توسط همان مشاوران خبره و با تأیید اپراتور ماهواره‌ای تعیین و مشخص گردد. در مدل پیشنهادی نیز وزن‌دهی بر اساس اهمیت هرکدام از معیارها و زیر معیارها در مراجع ارائه شده در جدول (۵) پیشنهاد شده و بر اساس آن نتایج مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

بر حسب مدل AHP در [۱۶] علاوه بر این، برای آن که بتوان عملکرد ماهواره را با توجه به نوع سرویس ارائه شده و نیاز به یکی از دو محموله مخابراتی، عملیاتی و پیاده سازی نمود، از یک ماتریس در بخش مخابراتی ماهواره استفاده خواهد شد که از آن می‌توان برای سوچ نمودن بین دو محموله شفاف یا بازمولد همزمان استفاده کرد [۲۶]. علاوه بر این، امروزه عملکرد سیستم ماهواره با توجه به نوع سرویس قابل ارائه شاخص بسیار مهمی در ارزیابی سیستم ماهواره خواهد بود [۲۰]. از چالش‌های اصلی شبکه‌های ارتباطی مبتنی بر ماهواره تامین پوشش کامل و دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان بالا در ارائه متنوع سرویس‌ها است. بنابراین لزوم توجه به این نوع معیار در ارزیابی نهایی سازندگان ماهواره می‌بایست مورد توجه جدی از دید اپراتورهای ماهواره قرار گیرد. در بخش توسعه زیر معیارها نیز در مقاله بالا در دو بخش تغییرات عمده نسبت به مدل ارزیابی مرجع [۱۶] صورت گرفته است. نخستین تغییر در بخش زیرمعیارها متعلق به معیار طراحی سیستم بوده که باید طیف وسیعی از زیر معیارها با توجه به اهمیت و میزان هزینه‌ای که در طراحی سیستم برای سازندگان ماهواره می‌بایست در نظر گرفته شود، تعیین خواهد شد. برخی از این نوع زیر معیارها شامل طراحی سیستم کنترل حرارتی، زیرسیستم فرمان‌های تله‌متری و تله‌کام هستند که به منظور مدیریت در ارسال و کنترل سیستم ماهواره توسط تجهیزات و ایستگاه‌های زمینی موجود و همچنین طراحی سیستم موقعیت‌یابی ماهواره و در نهایت ناوبری خواهد بود [۱۷]. همچنین در بخش معیار هزینه باید هزینه تست و هزینه‌های ناشی از الزامات فضایی در صورت وجود و نیاز، در ارزیابی سازندگان ماهواره مورد توجه قرار گیرد [۲۳].



شکل ۳: معیارهای پیشنهادی به منظور ارزیابی سازندگان منظومه ماهواره‌ای

۴-۱- فرایند ایجاد ماتریس ارزیابی متقابل معیارها در مدل AHP

در این بخش، ابتدا لازم است تا فرایند ارزیابی معیارها به شکل دو به دو در قالب یک ماتریس متقارن صورت گیرد. برای این منظور از مدل ریاضی پیشنهاد شده توسط Hwang و Chen با عنوان TOPSIS استفاده شده است [۲۷-۲۸]. در این مدل با استفاده از الگوریتم ریاضی که بر حسب معیارهای تعیین شده در ماتریس ارزیابی متقابل وجود دارد، مجموع کمترین و بیشترین فاصله هندسی هر کدام از مقادیر امتیازدهی شده برای معیارها در مدل AHP، محاسبه شده و در نهایت بر حسب مقادیر به دست آمده، رتبه بندی هر کدام از سازندگان ماهواره بر حسب فاصله هندسی استخراج شده خواهد شد. بنابراین مطابق با الگوریتم ریاضی TOPSIS، لازم است تا ۵ مرحله زیر در نرم افزار MATLAB پیاده سازی شده و در نهایت مورد ارزیابی قرار گیرد. این ۵ مرحله به شرح زیر خواهد بود [۱۶]:

$$B_{ikl} = \begin{pmatrix} 1 & C_{2,1} & \dots & C_{i,1} \\ C_{1,2} & 1 & \dots & C_{i,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1,i} & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$C_{1,1} = C_{2,2} = \dots = C_{i,i} = 1.$$

که هر کدام از درایه های ماتریس بالا نسبت مقایسه هر کدام از معیارهای اصلی نسبت به سایر معیارهای اصلی بر حسب مدل AHP خواهد بود. تمام مقادیر بالا در ماتریس ارزیابی متقابل معیارها به نام B_{ikl} قرار می گیرد. باید توجه داشت که درایه های قطر اصلی مقایسه هر معیار اصلی نسبت به خود همان معیار اصلی خواهد بود. بنابراین، مقدار درایه های قطر اصلی برابر با مقدار واحد خواهد بود.

۲- نرمالیزه نمودن هر کدام از ستون های ماتریس ارزیابی متقابل معیارها به حاصل جمع هر ستون مطابق با رابطه (۲).
۳- تعیین حاصل جمع هر کدام از ردیف های ماتریس نرمالیزه ارزیابی متقابل از مرحله ۲ و پیدا نمودن حاصل جمع آنها مطابق با رابطه (۳).

$$B_{ikl} = \begin{pmatrix} \frac{1}{P_1} & \frac{C_{2,1}}{P_2} & \dots & \frac{C_{i,1}}{P_i} \\ \frac{C_{1,2}}{P_1} & \frac{1}{P_2} & \dots & \frac{C_{i,2}}{P_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{C_{1,i}}{P_1} & \dots & \dots & \frac{1}{P_i} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$P_j = \sum_{i=1}^m C_{i,j},$$

$$j = [1, 2, \dots, i].$$

$$S_{ikl} = \begin{pmatrix} S_{1kl} = \frac{1}{P_1} + \frac{C_{2,1}}{P_2} + \dots + \frac{C_{i,1}}{P_i} \\ S_{2kl} = \frac{C_{1,2}}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \dots + \frac{C_{i,2}}{P_i} \\ \vdots \\ S_{ikl} = \frac{C_{1,i}}{P_1} + \frac{C_{2,i}}{P_2} + \dots + \frac{1}{P_i} \end{pmatrix}_{ikl}, \quad (3)$$

$$S = S_{1kl} + S_{2kl} + \dots + S_{ikl}.$$

۴- تعیین حاصل جمع هر کدام از ردیف های ماتریس نرمالیزه ارزیابی متقابل از مرحله ۲ و جمع نمودن آنها با یکدیگر مطابق با رابطه (۴).

$$PW_{ikl} = \left[\frac{S_{1kl}}{S}, \frac{S_{2kl}}{S}, \dots, \frac{S_{ikl}}{S} \right] \quad (4)$$

۵- تعیین سهم ضرایب الویت دهی حاصل شده از مرحله ۴ (PW_{ikl}) بر حسب ضریب اختصاص داده شده به هر کدام از معیارهای فرعی موجود در صورت وجود بر حسب درصد ($\beta_1, \dots, \beta_j$). به عنوان نمونه، تقسیم ضریب الویت دهی برای $\frac{S_{ikl}}{S}$ مطابق رابطه (۵) خواهد بود.

$$\frac{S_{ikl}}{S} = \left(\beta_1 \times \frac{S_{ikl}}{S} \right) + \dots + \left(\beta_j \times \frac{S_{ikl}}{S} \right), \quad (5)$$

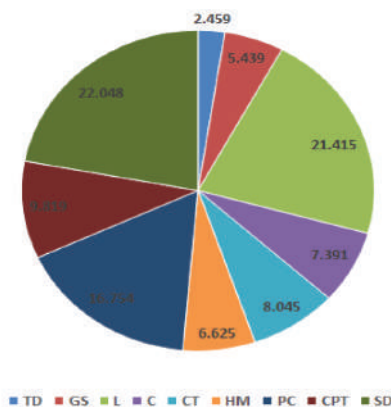
$$1 = \beta_1 + \dots + \beta_j.$$

برای انجام فرایند ارزیابی ابتدا ۹ معیار اصلی دو به دو در قالب یک ماتریس ارزیابی متقابل که در جدول (۶) ارائه شده، بر حسب شیوه نمره دهی در مدل AHP با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که در جدول (۶) مشخص است، ارزیابی هر معیار نسبت به خود آن معیار نسبت واحدی دارد که رنگی شده است. در ردیف اول این جدول بر حسب اهمیت و الویت هر کدام از معیارها، نمره هر معیار نسبت به طراحی سیستم ارزیابی شده است. همان طور که در این جدول مشخص است ارزیابی هر کدام از معیارهای اصلی نسبت به خود همان معیار برابر با یک بوده که در قطر اصلی جدول (۶) با رنگ مشخص شده است. نسبت نمره دهی در ردیف اول جدول (۶)، از رابطه (۶) به دست خواهد آمد. این رابطه و نسبت ها در تمام ردیف های جدول بر حسب الویت پیش بینی شده در فرایند طراحی و ساخت شبکه ماهواره ای در نظر گرفته شده است [۱۵].

$$\frac{CPT}{SD} = 3, \frac{PC}{SD} = 1, \frac{HM}{SD} = 5, \frac{CT}{SD} = 3, \quad (6)$$

$$\frac{C}{SD} = 3, \frac{L}{SD} = 3, \frac{GS}{SD} = 7, \frac{TD}{SD} = 5.$$

باید توجه داشت که برخی از درایه های بالا مثلی و یا پایین مثلی نسبت به قطر اصلی عکس مقادیر به دست آمده در ردیف های دیگر جدول خواهد بود. همچنین بر حسب الگوریتم ارائه شده در بخش ۳-۵-۱، ماتریس نرمالیزه شده ارزیابی متقابل در جدول (۷) ارائه شده است. سپس مقادیر موجود در هر ردیف ماتریس با یکدیگر جمع شده و در ستون آخر جدول (۷) در قالب پارامتر S ارائه شده است. در نهایت بر حسب مقادیر S وزن الویت دار هر کدام از ۹ معیار اصلی تعیین شده است. سپس سهم هر کدام از معیارهای فرعی در نظر گرفته شده مطابق با جدول (۸)، در شکل (۳) بر حسب وزن الویت دار هر کدام از معیارهای اصلی متناسب با درصد اهمیت پیش بینی شده برای هر زیر معیار تعیین شده است. در نهایت بر حسب وزن الویت دار تمام معیارهای اصلی بر حسب درصد



شکل ۴: درصد سهم هر کدام از معیارهای اصلی در مدل ارزیابی پیشنهادی

جدول ۶: ماتریس ارزیابی متقابل سازندگان منظومه ماهواره‌ای بر حسب مدل AHP

معیارها	SD	CPT	PC	HM	CT	C	L	GS	TD
SD	1	3	1	5	3	3	3	7	5
CPT	0.333	1	0.333	3	5	1	0.333	3	5
PC	1	3	1	5	3	3	0.333	5	7
HM	0.2	0.333	0.2	1	7	0.143	0.111	1	3
CT	0.333	0.2	0.333	0.143	1	5	0.333	5	3
C	0.333	1	0.333	7	0.2	1	0.143	0.2	5
L	0.333	3	3	9	3	7	1	5	3
GS	0.143	0.333	0.2	1	0.2	5	0.2	1	3
TD	0.2	0.2	0.143	0.333	0.333	0.2	0.333	0.333	1

جدول ۷: ماتریس نرمالیزه ارزیابی متقابل سازندگان منظومه ماهواره‌ای بر حسب مدل AHP

معیارها	SD	CPT	PC	HM	CT	C	L	GS	TD	S
SD	0.25806	0.24863	0.15285	0.15885	0.13196	0.11837	0.51849	0.25424	0.14285	1.9843
CPT	0.08593	0.08287	0.05090	0.09531	0.21994	0.03945	0.05755	0.10896	0.14285	0.8837
PC	0.25806	0.24863	0.15285	0.15885	0.13196	0.11837	0.05755	0.18160	0.20000	1.5079
HM	0.05161	0.02759	0.03057	0.03177	0.30792	0.00564	0.01918	0.03632	0.085714	0.5963
CT	0.08593	0.016575	0.05090	0.00454	0.04398	0.19729	0.057553	0.18160	0.085714	0.7241
C	0.08593	0.08287	0.05090	0.22239	0.00879	0.03945	0.024714	0.00726	0.142857	0.6651
L	0.08593	0.24863	0.45857	0.28593	0.13196	0.27621	0.17283	0.18160	0.085714	1.9273
GS	0.03690	0.02759	0.03057	0.03177	0.00879	0.19729	0.03456	0.03632	0.085714	0.4895
TD	0.05161	0.01657	0.02185	0.01057	0.01464	0.00789	0.05755	0.012094	0.028571	0.2213
وزن کل	0.22048	0.09819	0.16754	0.06625	0.08045	0.07391	0.21415	0.05439	0.02459	

جدول ۸: میزان وزن هر کدام از معیارهای فرعی در مدل AHP بر حسب مراجع جدول (۵)

معیار	SD		CPT		PC		HM		SF		C	
مقادیر هر کدام از زیر معیارها با توجه به مراجع	0.22048		0.09819		0.16754		0.06625		0.08045		0.07391	
	S&M (11.8%)	0.0260	B (20%)	0.0196	Lower band (11.11%)	0.0186	CH (30%)	0.0198	Communication (61%)	0.0490	SP (15%)	0.0110
	G&N (13.5%)	0.0297	R (20%)	0.0196	Ku (44.44%)	0.0744	PH (70%)	0.0463	Earth observation (27%)	0.0217	SM (40%)	0.0295
	AOC (16.2%)	0.0357	H (60%)	0.0589	Ka (33.33%)	0.0558			Navigation/ GPS(5.7%)	0.0045	LC (10%)	0.0073
	Pr (11.8%)	0.0260			Upper band (11.11%)	0.0186			Technical develop- ment (5.7%)	0.0045	SI (30%)	0.0221
	P (14.1%)	0.0310							Other (0.6%)	0.0004	Other costs (5%)	0.0036
	TC (4.1%)	0.0090										
	C&DH (28.5%)	0.0628										

جدول ۹: مقایسه روش‌های ریاضی مقایسه ارزیابی سازندگان منظومه ماهواره‌ای بر حسب الویت‌دهی آنها

روش/معیارها	SD	PC	L	C	CT	CPT	TD	HM	GS
بیشترین بیشینه	-	-	-	-	-	-	-	-	۱
لکزیگرافی	۴	۴	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۱
رضایت‌بخش خاص	عدم انتخاب سازنده ماهواره‌ای که حداقل نمره پیش‌بینی شده را برای هرکدام از معیارها را اخذ نکند.								
رضایت‌بخش عطفی	انتخاب سازنده ماهواره‌ای که بیشترین نمره پیش‌بینی شده را برای هرکدام از معیارها را اخذ کند.								
مرجع [۱۶]	۱	۳	۲	۵	-	-	-	۶	۴
روش پیشنهادی	۱	۳	۲	۶	۵	۴	۹	۷	۸

ارایه خدمات به کاربران نهایی در دراز مدت مورد توجه اپراتورهای ماهواره‌ای قرار گیرد.

واژگان کلمات انگلیسی بکار رفته در مقاله

معادل فارسی	لغات انگلیسی
سرویس‌های برخط	Online
خودروی هوشمند	Smart car
شبکه‌های ترکیبی ماهواره با بستر زمینی	Satellite-Terrestrial Integrated Network (STIN)
انتقال داده	Traffic offloading
مدل غیرجبران‌کننده تصمیم‌گیری	Non-compensatory decision making model
مدل جبرانی تصمیم‌گیری	Compensatory decision making model
بیشترین بیشینه	MAXI MAX
لکزیگرافی	Lexicography
طراحی سیستم	System design (SD)
انواع محموله مخابراتی	Communication payload types (CPT)
شفاف یا لوله خم‌شده	Bent-pipe
بازمولد	Regenerative
ظرفیت محموله	Payload capacity (PC)
سوابق سازنده	Heritage of manufacture (HM)
عملکرد ماهواره	Satellite function (SF)
ناوبری و سیستم موقعیت‌یابی جهانی	Navigation and Global Positioning System (GPS)
توسعه فنی	Technical development
هزینه	Cost (C)
طرح ماهواره	Satellite plan(SP)
بیمه ماهواره	Satellite insurance (SI)
طول عمر	Life time (L)
تجهیزات زمینی	Ground segment (GS)
مدت زمان ساخت ماهواره	Time to deliver (TD)
سازمان بین‌المللی مخابرات	International Telecommunication Union (ITU)
رله	Relay
کمترین و بیشترین فاصله هندسی	Shortest and longest geometric

در شکل (۴) ارایه شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص شده با توجه به الویت‌بندی‌های اولیه معیارهای اصلی، معیار طراحی سیستم ماهواره و طول عمر مأموریت ماهواره به ترتیب به‌طور تقریبی با ۲۲/۰۴ و ۲۱/۴۱ درصد دارای بیشترین اهمیت و معیار زمان تحویل‌دهی با ۲/۴۵ درصد کمترین اهمیت را در مدل ارزیابی پیشنهادی در این مقاله خواهد داشت. در حالی که در مرجع [۱۶]، بیشترین اهمیت به طراحی سیستم، طول عمر ماهواره به ترتیب ۲۸/۸ و ۲۷/۷ درصد و معیار سابقه طراحی و ساخت ماهواره و مدت زمان طراحی و ساخت ماهواره به ترتیب با ۴ و ۳/۳ درصد کمترین اهمیت را خواهند داشت. در جدول (۹) مقایسه‌ای بین تمام روش‌های ریاضی ارزیابی معیارهای موجود بین سازندگان ماهواره ارایه شده است. از نتایج به‌دست آمده برحسب الویت و نمره‌دهی معیارها و زیرمعیارها می‌توان نتیجه گرفت که اهمیت معیار کیفیت در طراحی و ساخت ماهواره نسبت به معیار زمان تحویل‌دهی در انتخاب سازنده ماهواره برای خریداری یا سرمایه‌گذاری در حوزه شبکه ماهواره‌ای اهمیت داشتن کیفیت در فرایند طراحی و ساخت ماهواره نسبت به طول زمان ساخت ماهواره با توجه به افزایش تعداد معیارها (اصلی و فرعی) در این مقاله و نزدیک شدن به مدل واقعی سنجش سازندگان ماهواره، از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین با توجه به بازار رقابتی فشرده به منظور ارایه سرویس با کیفیت و قابلیت اطمینان مناسب در یک قرارداد درازمدت برای کاربران نهایی اهمیت بیشتری خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به ضرورت ارایه مدل ارزیابی و انتخاب بین سازندگان ماهواره‌های مخابراتی که دارای کیفیت بهتر در فرایند طراحی و ساخت باشند، دو روش ارزیابی بررسی گردید. در روش نخست ارزیابی معیارها بر حسب یک معیار مشخص انجام می‌شد که عیب آن نبودن ارزیابی منصفانه یک معیار نسبت به سایر معیارها بود. در روش دوم که روشی بهینه‌تر و کامل‌تر نسبت به روش نخست می‌باشد، مقایسه معیارها در قالب یک ماتریس ریاضی و به شکل دو به دو بر حسب مدل نمره‌دهی AHP انجام گرفت. نتایج به‌دست آمده، در روش ارزیابی متقابل نشان می‌دهد که لزوم برتری یک معیار نسبت به معیارهای دیگر دلیل برتری آن معیار نبوده و در نمره‌دهی پیش‌بینی شده در روش بالا، معیار طراحی سیستم ماهواره و بیشتر بودن زمان طول عمر ماهواره نسبت به زمان تحویل‌دهی چنین نوع محموله‌های مخابراتی اهمیت بیشتری خواهد داشت. این امر می‌تواند برای ارایه سرویس‌های مخابراتی در ارتفاعات مداری بالا و همچنین تضمین

معادل انگلیسی	مخفف
Low earth orbit	LEO
Multiple-criteria decision-making	MCDM
Analytic Hierarchy Process	AHP
Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	TOPSIS

مراجع

- [۱۳] سازمان تنظیم مقررات، معاون نظرات و اعمال مقررات (دفتر نظارت بر سرویس‌های فناوری اطلاعات)، «کتابچه راهنمای الگوی جامع ارزیابی، رتبه‌بندی و انتخاب اپراتورهای برتر سرویس‌های فناوری اطلاعات»، تعداد صفحات ۱۱ الی ۵۳، ۱۳۹۵.
- [14] Ng, C.Y. and Chuah, K.B", Evaluation of Design Alternatives 'Environmental Performance using AHP and ER Approaches", IEEE system journal, vol.8, no.4, pp.1185-1192, 2013.
- [15] "MADM solutions", Available at: <https://sanaye20.ir>.
- [16] A. Kahriman, M. Öztokatlı, G. Sena Daş, "Selection of a Communication Satellite Manufacturer using MCDM methods", 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), pp.347-351, 2015.
- [17] E. Mahr, A.Tu, A.Gupta, "Development of the Small Satellite Cost Model 2019 (SSCM19)", IEEE Aerospace Conference, pp.1-12, March 2020.
- [18] O.Kodheli, E.Lagunas, N.Maturo and et al, "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.21, no.1, October 2020.
- [19] Future trends for the Space market, Available at: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/future-trends-space-market>, September 2018.
- [20] Available at: <https://news.cgtn.com/news/2020-11-12/6G-A-case-for-why-China-will-become-more-innovative-VkZEUtnFgA/index.html>.
- [21] Available at: <https://www.mobileworldlive.com/featured-content/home-banner/china-puts-6g-test-satellite-into-orbit>
- [22] Who owns our orbit: Just how many satellites are there in space?, Available at <https://www.weforum.org/agenda/2020/10/visualizing-earth-satellites-space-spacex>, 2020.
- [23] X.Wang, S.Zhang, "Cost Analysis for Mass Customized Production of Satellites Based on Modularity", IEEE Access, pp.13754-13760, January 2021.
- [24] P.Manikowski and M. A Weiss, "The Satellite Insurance Market and Underwriting Cycles", The Geneva Risk and Insurance Review, vol.38, pp.148-182, 2013.
- [25] T.L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill, New York, 1980.
- [26] M.Witting, "Satellite switchboard in the sky: past, present and future", e & i Elektrotechnik und Informations-technik, vol.131, no.6, pp.130-149, September 2014.
- [27] S.J.Chen, C.L.Hwang, "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications", 1992.
- [28] S.Opricovic, G. H. Tzeng, "Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS", European Journal of Operational Research, vol.156, no.2, pp.445-455, 2004.

- [1] P. Hajipour, A. Shahzadi, S. Ghazi-Maghrebi, "Improved performance for a heterogeneous satellite-cooperative network with best relay node selection", China communications, vol. 16, no. 5, pp.93-105, June 2019.
- [2] Y.Haipeng, W.Xiaodong, L.Zhou and L.Yunjie, "The Space-Terrestrial Integrated Network (STIN): An Overview", IEEE Communications Magazine, (DOI:10.1109/MCOM.2018.1700038), pp.1-9, 2018.
- [3] ESOA 5G White Paper. Satellite communications services: an integral part of the 5G ecosystem. ESOA (Available from: <https://esoa.net/cmsdata/positions/1693/20ESOA/205G/2016pp/20Booklet/20Amends/20SCREEN/20Final/201.pdf>). [Accessed on 2018].
- [4] M.Jia, X.Gu, Q.Guo, W.Xiang, N.Zhang, "Broadband hybrid satellite-terrestrial communication systems based on cognitive radio toward 5G", IEEE Wireless Communications. vol.23, no.6, pp.96-106, 2016.
- [5] J.Zhang, B.Evans, M.Imran, X.Zhang, W.Wang, "Green Hybrid Satellite Terrestrial Networks: Fundamental Trade-Off Analysis", Proceedings of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC), pp.15, May 2016.
- [6] F. Tariq, MR. A. Khandaker, K.Wong, M. Imran, M.Bennis and M. Debbah, "A Speculative Study on 6G", IEEE magazine, arXiv:1902.06700v2 [cs.NI], 2019.
- [7] پدram حاجی پور، رفیه دوست و مریم زیرجد «یکپارچگی و ترکیب شبکه‌های ماهواره با شبکه‌های زمینی موجود و پروتکل‌های ادوات متحرک» مستخرج از پروژه: امکان‌سنجی بهره‌برداری از ماهواره ملی مخابراتی در باند Ka و ارایه سرویس IP بر بستر ماهواره، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تعداد صفحات ۱ الی ۴۵، شهریور ماه ۱۳۹۸.
- [8] "Viasat Annual Report 2019", Available at: <http://investors.viasat.com/static-files/743e5c27-c611-4a1c-ab86-63b66b82451b>.
- [9] "Intelsat Annual Report on Form 10-K for the year ended December 31, 2019", Available at: <https://investors.intelsat.com/static-files/c1c4e846-ea4f-4967-bfa0-f5c8d2860be2>
- [10] "SES Annual Report 2019", Available at: https://www.ses.com/sites/default/files/2020-04/SES_Annual_Report_2019_HighRes_1.pdf.
- [11] "Eutelsat Full Year 2018-19 Results", Available at: <https://www.eutelsat.com/files/PDF/investors/2018-19/ETL-Results-Presentation-FY2018-19.pdf>.

- [۱۲] پدram حاجی پور، «ارایه مدل ارزیابی ارایه دهندگان ارتباطات ماهواره‌ای از دید اپراتورها و سازندگان ماهواره» مستخرج از پروژه: امکان‌سنجی بهره‌برداری از ماهواره ملی مخابراتی در باند Ka و ارایه سرویس IP بر بستر ماهواره، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تعداد صفحات ۱ الی ۳۲، آذر ماه ۱۳۹۸.



مقاله علمی-ترویجی

فناوری‌های مورد نیاز آنتن در نسل پنجم و نسل ششم شبکه‌های مخابراتی بی سیم

رقیه کریمزاده بانی، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران rkbaee@itrc.ac.ir

چکیده

با توجه به تلفات انتشاری زیاد در موج میلی‌متری و باند تراهرتز به کار رفته در سیستم‌های رادیویی 5G و 6G، سلول‌ها بسیار متراکم‌تر و فشرده‌تر خواهند بود. از طرفی، به دلیل تقاضای پهنای باند بالای کاربران، استفاده از تکنیک‌های شکل‌دهی پرتو به همراه Massive MIMO برای افزایش بازدهی طیفی، پوشش مناسب و مقرون به صرفه بودن، بسیار اهمیت دارد. شکل‌دهی هولوگرافی پرتو، یکی از جدیدترین تکنیک‌های مطرح در شکل‌دهی پرتو است که مزایای زیادی نسبت به تکنیک‌های قدیمی شکل‌دهی پرتو از قبیل شکل‌دهی آنالوگی پرتو و شکل‌دهی دیجیتالی پرتو دارد. از این رو، برای بهره‌گیری از مزایای شبکه‌های مخابراتی نسل جدید، ضروری است که از فناوری‌های بخش‌های مختلفی از جمله آنتن‌های مورد نیاز آنها، شناخت پیدا کرد و همگام با این فناوری‌ها، در بازار تجهیزات این فناوری‌های روبه رشد، نیز ورود نمود. در این پژوهش برخی از آخرین تکنیک‌ها و روش‌های طراحی آنتن‌ها و آرایه‌های شکل‌دهنده پرتو بررسی و مقایسه می‌شود. در ادامه، با توجه به نیاز شبکه‌های مخابراتی آینده و همچنین روند توسعه فناوری‌ها، روش مناسب پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: موج میلی‌متری، باند تراهرتز، شکل‌دهی پرتو، فرامواد، هولوگرافی

Required antenna technologies in fifth and sixth generation wireless telecommunication network

Roghieh karimzadeh Baei, Faculty member of ICT Research Institute, Tehran, Iran., rkbaee@itrc.ac.ir

Abstract

Due to the high loss of propagation in millimeter wave (mmwave) and terahertz band (THz) used in fifth generation and Sixth generation telecommunication systems, the cells become much dense and more compact. On the other hand, because of the growing in the user's demand on more bandwidth, employment of the beamforming techniques with Massive Multi-input Multi-output (Massive MIMO) are very important in order to increase spectral efficiency, proper and cost-effective coverage. Holographic beamforming technology is one of the latest techniques in the beamforming that has many advantages over the old these kinds of techniques such as Analog Beamforming and Digital Beamforming. Therefore, for taking the advantage of the next generation of telecommunication networks, it is necessary to be aware of the different sections of technologies like the antennas, and along with these technologies, entered into the equipment market of these growing technologies, also.

In this research, some of the latest techniques and methods of beamforming are investigated and compared with each other. At the end, a suitable method is proposed according to the requirements of next telecommunication networks and technological trends.

Keywords: fifth generation and Sixth generation telecommunication systems, Millimeter Wave, Terahertz Band, Beam Forming, Metamaterials, Holography

۱- مقدمه

قبیل تکنیک‌های پیشرفته کدگذاری کانال، MIMO Massive و موج میلی‌متری صورت گرفته است. دستیابی به موفقیت در طراحی، ساخت و تست سیستم آنتن برای استفاده جهانی از طیف موج میلی‌متری و بالاتر از آن، بسیار مهم است. علاوه بر تامین پوشش رادیویی، سیستم‌های آنتن باید بتوانند امکان پیکربندی الگوی تابشی مورد نیاز ارتباطات بی‌سیم نسل جدید را نیز فراهم کنند [۸].

بررسی‌های زیادی در مورد این‌که آیا طیف موج میلی‌متری و بالاتر از آن، می‌تواند به‌طور موثری تجاری شود، صورت گرفته است. اما پیشرفت‌های اخیر در آنتن‌های شکل‌دهنده پرتو و تخصیص طیف وسیع، این طیف‌های فرکانسی را به دروازه‌ای برای ورود 5G و 6G، تبدیل نموده است. همچنین انتظار می‌رود که موج میلی‌متری به اپراتورهای تلفن همراه در دنیا و به‌خصوص کشورهایی مانند ایالات متحده، کره جنوبی و ژاپن کمک کند زیرا به دلیل افزایش روزافزون استفاده از داده‌های تلفن همراه، ظرفیت باند 5G آن‌ها در سال ۲۰۲۱ یا ۲۰۲۲ رو به اتمام خواهد بود [۹]. اگرچه طیف موج میلی‌متری و تراهرتز، ظرفیت بیشتری را نسبت به باندهای با فرکانس‌های پایین‌تر در 5G و 6G ارائه می‌دهد، اما چالش‌هایی مربوط به محدوده تشعشعی کم، تلفات انتشار زیاد، عدم نفوذ به ساختمان و ... دارد. بنابراین برای استفاده از این طیف در شبکه‌های ارتباطی نسل بعدی، تدابیری باید اندیشیده شود. برای غلبه بر تلفات سیگنال، آرایه‌های شکل‌دهی پرتوی آنتن برای افزایش بیشتر سیگنال به کار می‌روند که برای بیشتر کاربردهای عملی، مساحت آنتن در فرکانس ۲۸ گیگاهرتز به‌طور تقریبی ۲۲ سانتی‌متر مربع می‌باشد. با بزرگ شدن ابعاد آرایه به منظور دستیابی به گین بیشتر، پهنای پرتو نیز باریک می‌شود. این محدودیت برای ارتباطات ثابت متداول، قابل قبول است اما برای پوشش کاربران 5G تلفن همراه، مناسب نخواهد بود. به همین دلیل یک پرتوی 5G باید قابلیت اسکن (یا حرکت) داشته باشد تا چندین کاربر را تحت پوشش قرار دهد و با سرعت الکترونیکی که برای کاربران نهایی، قابل حس نباشد، عمل کند. بنابراین آرایه‌های با گین بالا و قابلیت اسکن به صورت الکترونیکی برای ارتباطات موج میلی‌متری در 5G و 6G لازم است. برای چندین دهه در صنعت دفاعی از روش آرایه فازی اکتیو (APA) با صرف هزینه، اندازه بزرگ، وزن و مصرف توان بسیار زیاد استفاده شده است. این درحالی است که پیشرفت‌های اخیر در نیمه‌هادی‌هایی با قابلیت یکپارچه‌سازی با مدارات، باعث شده است که APAها به محصولات تجاری نزدیک شوند. در مقابل، تکنیک شکل‌دهی هولوگرافی پرتو (HBF) نیز یک پیشرفت شگرف در الکترومغناطیس است که دارای مشخصه‌های هزینه، اندازه، وزن و مصرف توان (C-SWAp) بسیار کمتر از APA می‌باشد.

در این مقاله، ابتدا شبکه‌های مخابراتی نسل آتی، به طور اجمالی معرفی خواهند شد و مشخصات کلی آن‌ها مقایسه می‌گردد. سپس، ویژگی‌های طیف فرکانسی موج میلی‌متری و بالاتر

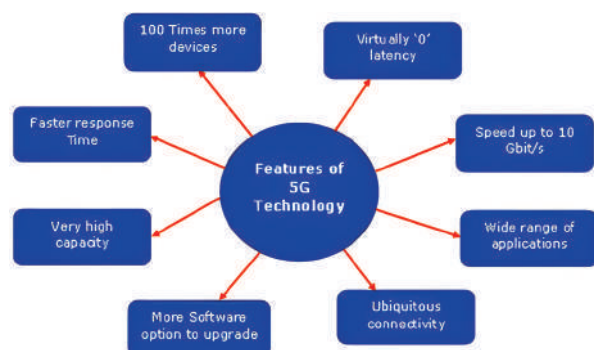
گسترش جهانی شبکه‌های مخابراتی نسل جدید، با سرعت بالایی انجام می‌شود و انتظار می‌رود که ظرفیت شبکه 5G در مقایسه با 4G، ۱۰۰ برابر بیشتر باشد. برای گسترش ظرفیت شبکه 5G، طیف‌های مختلفی در دو باند فرکانسی زیر ۶ گیگاهرتز و موج میلی‌متری در نظر گرفته شده است. طیف در نظر گرفته شده توسط 5G، چالش‌های جدیدی را برای طراحی محصول و استقرار جهانی به‌ویژه در محدوده فرکانس موج میلی‌متری ایجاد می‌کند. موج میلی‌متری، فرکانس بین 30GHz تا 300GHz را شامل می‌شود و در اصطلاح آن را mmwave می‌گویند. در چند سال اخیر، تحقیقات زیادی بر روی امواج میلی‌متری، منتشر شده است [۱]-[۲]. در [۳]-[۴] پتانسیل‌ها و چالش‌های موجود در فناوری موج میلی‌متری بررسی گردیده و آینده شبکه 5G با فناوری موج میلی‌متری نیز در [۵] آرایه شده است. امواج میلی‌متری می‌توانند پهنای باند بیش از ده برابر کل باند تلفن همراه 4G را فراهم کنند. لازم است که فعالان و سازندگان بخش تجهیزاتی که در باند فرکانسی موج میلی‌متری کار می‌کنند، تجهیزات دسترسی بی‌سیم ثابت (FAW) مربوط به 5G را برای مناطق شهری و حومه شهری مهیا کنند. برای دستیابی به نرخ بالای داده و تاخیر کم وعده داده شده توسط 5G، آنتن به یک عنصر مهم در طراحی کلی سیستم تبدیل می‌شود [۶]. آنتن‌های هوشمند 5G، نرخ داده بیشتری برای موبایل پهن‌بند و همچنین انتقال گسترده اطلاعات، ارائه می‌دهند. این دسته از آنتن‌ها، فرصت‌های جدیدی را برای بازارهایی با ظرفیت بالقوه دستیابی به سرعت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه با کمترین تاخیر و اتصال فراگیر ایجاد می‌کنند. تولیدکنندگان به‌طور مداوم در حال توسعه آنتن‌های هوشمند برای تامین نیازهای روزافزون مصرف‌کنندگان با استفاده از شبکه 5G و در آینده نزدیک، 6G هستند که به همان اندازه نیز به رشد بازار آنتن هوشمند در این شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم کمک می‌کنند. بازار جهانی پیش‌بینی شده برای آنتن‌های هوشمند 5G (Single Input Multiple Output) SIMO، به ترتیب ۲.۲ میلیون دلار، ۱.۹ میلیون دلار و ۱.۹ میلیون دلار خواهد بود. همچنین پیش‌بینی می‌شود که بازار جهانی آنتن هوشمند 5G چند پرتوی سوئیچ شده، تا سال ۲۰۲۵ به ۳.۶ میلیارد دلار برسد. با این حال، سیستم‌های آرایه تطبیقی بیش از ۵۵ درصد سریع‌تر از فناوری چند پرتویی رشد می‌کنند و در نهایت سهم بیشتری از بازار را به خود اختصاص می‌دهند. در همه این آنتن‌های هوشمند، تکنیک شکل‌دهی پرتو بکار گرفته می‌شود [۷].

نسل جدید ارتباطات بی‌سیم، به این منظور طراحی شده است که ویژگی‌هایی از قبیل داده‌های با نرخ بیشتر، تاخیر کم و وفاداری بالای سیگنال را به کاربران تلفن همراه ارائه دهد. تلاش‌های زیادی برای دستیابی به پیشرفت‌های عملیاتی در حوزه‌هایی از

عامل دیگری که می‌تواند باعث بهبود نرخ داده در ناحیه تحت پوشش شود، بازدهی طیفی است که در طی این توسعه و رشد سریع شبکه بی‌سیم، بیشتر ثابت و بدون تغییر باقی مانده است. در نتیجه، برای دستیابی به تقاضاهای مداوم کاربران بی‌سیم، فناوری کارآمدی که بتواند نرخ داده را در ناحیه تحت پوشش، بدون افزایش پهنای باند یا تراکم کردن سلول افزایش دهد ضروری است [۱۱].

5G •

شبکه‌های تلفن همراه 5G در حال اجرا هستند و هدف آنها دستیابی به سرعت انتقال داده تا ۱۰۰ برابر بیشتر از شبکه‌های 4G فعلی است. شبکه‌های 5G، نرخ داده تا ۱۰ گیگابیت بر ثانیه، تاخیر کم (در حدود میلی‌ثانیه) و قابلیت اطمینان بیشتر را از این می‌دهند. ظرفیت قابل توجه بیشتر، نرخ‌های داده بالاتر، افزایش انعطاف‌پذیری، پیوستگی و استمرار، بهره‌وری بسیار بالاتر منابع از جمله کاهش قابل توجه در مصرف انرژی و حفاظت از کاربران و داده‌های مهم که از طریق شبکه منتقل می‌شوند به همراه تامین امنیت و حریم خصوصی از ویژگی‌های شبکه نسل بعدی 5G برای تامین نیازهای رو به رشد کاربران می‌باشد [۱۲]–[۱۴]. شکل (۲)، ویژگی‌های فناوری 5G را نشان می‌دهد. این فناوری می‌تواند از بسیاری از دستگاه‌ها و وسایل نقلیه هوشمند مجهز به اینترنت اشیا پشتیبانی کند. برای پاسخگویی به تقاضاهای مداوم کاربران 5G، دستیابی به فناوری کارآمد دسترسی بی‌سیم که بدون افزایش پهنای باند یا تراکم کردن سلول‌ها، نرخ داده را افزایش دهد، بسیار بااهمیت است.



شکل ۲: ویژگی‌های فناوری 5G [۱۴]

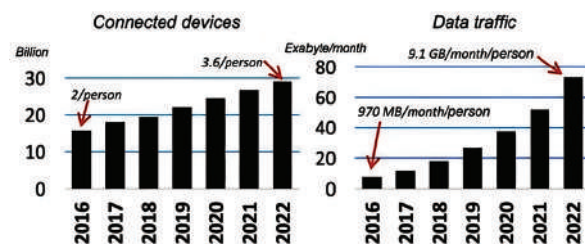
6G •

شبکه‌های تلفن همراه 6G، شبکه بی‌سیم کامل و بدون محدودیتی هستند که در حال حاضر در مرحله توسعه می‌باشند و سرعت انتقال باورنکردنی در محدوده ترابیت فراهم می‌کنند. این فناوری به آنتن هوشمند، حافظه بزرگ در تلفن‌های همراه و شبکه‌های نوری عظیم نیاز دارد. شبکه‌های 6G، بدون سلول خواهند بود و امکان استفاده از هوش مصنوعی را در شبکه‌های بی‌سیم فراهم می‌سازند. به طور دقیق مشخص نیست که شبکه‌های 6G از چه باند فرکانسی استفاده خواهند کرد اما بدیهی است که برای افزایش میزان نرخ داده‌ی مورد نیاز در این شبکه، به باند فرکانسی بسیار بالاتر نیاز است. در حالی که قرار است 5G از فرکانس بیشتر از 30GHz تا 300GHz (امواج میلی‌متری) استفاده کند، 6G با فرکانس بسیار بالاتر (در باندهای 300GHz تا 3THz) سروکار دارد. تخمین زده می‌شود که استفاده از طیف THz در 6G ظرف مدت

مورد استفاده در 5G و 6G، آورده شده است. در ادامه به تکنیک شکل‌دهی پرتو که در شبکه‌های نسل آتی به آن نیاز می‌باشد، اشاره می‌گردد. روش‌های پیاده‌سازی این تکنیک در آرایه بررسی و در نهایت براساس مزایا و معایب هر یک از آنها و همچنین چالش‌های موجود در طیف موج میلی‌متری و بالاتر، روش مناسبی برای استفاده در بخش ارتباطات رادیویی و ماهواره‌ای، پیشنهاد می‌شود. در نهایت فناوری‌های آنتن باند تراهرتز به همراه برخی از حوزه‌های پژوهشی مطرح در 6G نیز بررسی خواهد شد.

۲- معرفی اجمالی شبکه‌های 5G و 6G

امروزه، شبکه‌های مخابراتی با تقاضای بالای ترافیکی روبرو هستند. بنابراین برای تامین این نیازها، سیستم‌های سلولی در فاصله چند صد متری مستقر می‌شوند و شبکه‌های بی‌سیم محلی (LAN) به‌طور تقریبی در همه جا قرار می‌گیرند. علاوه بر افزایش سرویس‌های پهن باند موبایل، معرفی مفاهیم جدیدی مانند اینترنت اشیا (IoT) و ارتباطات ماشین به ماشین (M2M) نیز در افزایش ترافیک بی‌سیم نقش دارند. با این حجم از افزایش دستگاه‌های متصل به هم و ترافیک بالا، دهه آینده متأثر از نسل‌های بعدی شبکه‌های تلفن همراه 5G و 6G با نرخ داده گیگابیت، تأخیر کم و اتصال به میلیاردها دستگاه خواهد بود. به این ترتیب، تقاضای فزاینده دسترسی بی‌سیم، بیشتر از ظرفیت انتقال داده‌ی لینک‌های پهن باند موجود، خواهد بود. انتظار می‌رود که طی چند سال آینده، کل جهان از طریق تلفن همراه به هم متصل شوند که عمدتاً با رشد کاربران، افزایش حجم ترافیک داده و گستره وسیعی از کاربردها همراه خواهد شد. در چند سال آینده، فناوری‌هایی مانند واقعیت افزوده، واقعیت مجازی، ویدیوهای با کیفیت بسیار بالا، فیلم سه بعدی و ویژگی‌هایی مانند ابرموبایل برای کاربران بسیار محبوب می‌شوند. به طور کلی، پیش‌بینی می‌شود که ترافیک موبایل از ۲۰۱۶–۲۰۲۲ حدود ۱۰ برابر افزایش یابد. شکل (۱) رشد ترافیک داده‌های تلفن همراه و تعداد دستگاه‌های متصل را بین سال‌های ۲۰۱۶–۲۰۲۲ نشان می‌دهد [۱۰]. تا پایان سال ۲۰۲۲، بیش از ۹۰ درصد ترافیک از طریق تلفن‌های همراه جابجا می‌شود. لذا، مدیریت این میزان عظیم از ترافیک داده تلفن همراه، با استفاده از سیستم‌های بی‌سیم قبلی بسیار چالش برانگیز است.



شکل ۱: ترافیک جهانی داده‌ها و رشد دستگاه‌های متصل طی

سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ [۱۰]

مسئله اصلی در توسعه مداوم شبکه بی‌سیم این است که این شبکه برای دستیابی به نرخ داده‌ی مورد نیاز، به افزایش پهنای باند یا تراکم کردن سلول‌ها وابسته است. این درحالی است که این منابع نادر هستند و طی چند سال آینده به نقطه اشباع خود می‌رسند. از طرفی، افزایش پهنای باند یا تراکم سلول‌ها باعث بالارفتن هزینه سخت‌افزاری و همچنین افزایش تاخیر می‌شود.

۵-۷ سال تجاری شود. انتظار می‌رود شبکه‌های 6G در سال ۲۰۳۰ معرفی شوند. در جدول (۱)، ویژگی‌های شبکه‌های 4G، 5G و 6G با هم مقایسه شده‌اند. شکل (۳) نیز افزایش الزامات کلیدی از 5G به 6G را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، برخی از این الزامات در 6G بیش از ده برابر 5G است. در سال‌های اخیر، ایده‌های پیشرفته‌ی بسیاری برای تحقق شبکه‌های 5G و فراتر از آن، ارائه و تحلیل شده‌اند. اصلی‌ترین فناوری‌های فعال‌سازی که برای شبکه‌های 5G و 6G در نظر گرفته شده‌اند، شامل موج میلی‌متری، سلول‌های کوچک، شکل‌دهی پرتو، معماری دستگاه محور، فناوری MIMO Massive، full-duplex، موج تراهرتز و طیف نورمرئی است که در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۱: مقایسه ویژگی‌های شبکه‌های 4G، 5G و 6G [۱۱]

Performance Index	4G	5G	6G
Peak Data Rate	100Mbps	10Gbps	Up to 10Tbps
Latency	10ms	1ms	Up to 0.1ms
Connection Density	million 0.1 devices/km ²	million 1 devices/km ²	million 10 devices/km ²
Energy Efficiency	×1	4G×100	5G×100
Spectral Efficiency	×1	4G×100	5G×100
Available Spectrum	Up to 6GHz	Up to 300GHz	Up to 3THz
Mobility	m/h 200	m/h 300	m/h 600
Artificial Intelligence	No	Partial	Fully

۳- تکنیک شکل‌دهی پرتو

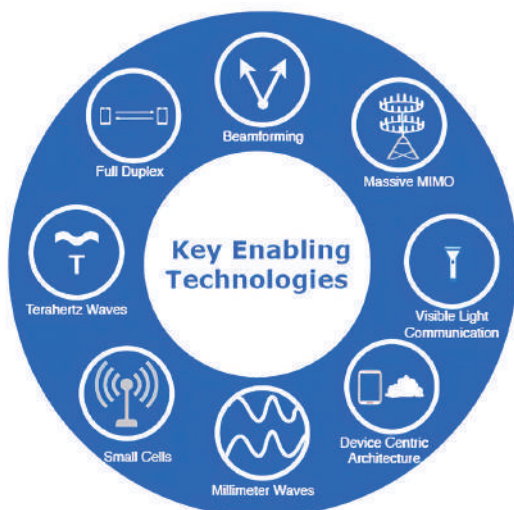
شکل‌دهی پرتو، به استفاده از تعدادی عناصر تشعشعی گفته می‌شود که سیگنالی را در طول موج یکسانی ارسال می‌کنند و به گونه‌ای با هم ترکیب می‌شوند تا آنتن واحدی ایجاد گردد که موج را در یک جهت خاص انتشار می‌دهد. این مفهوم کلی، نخستین بار در سال ۱۹۰۶ برای ارتباطات رادیویی فرا اقیانوسی به کار گرفته شد.

درحقیقت، شکل‌دهی پرتو در مخابرات سلولی، توانایی ایستگاه پایه در انطباق الگوی تابش آنتن است. شکل‌دهی پرتو، یک سیستم سیگنالینگ ترافیکی برای ایستگاه‌های پایه می‌باشد که

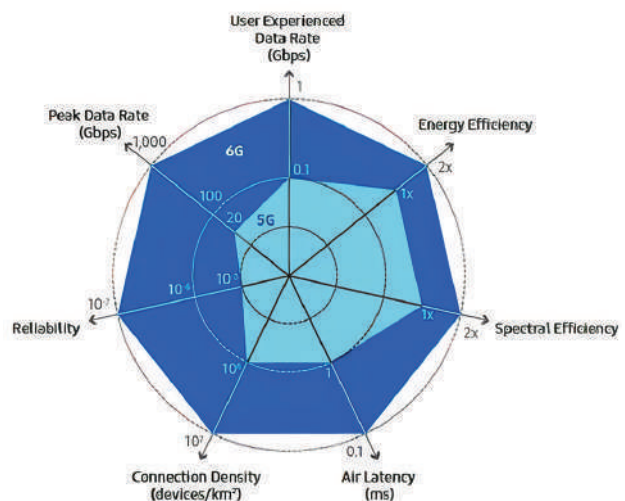
کارآمدترین مسیر تحویل داده به یک کاربر خاص را مشخص می‌کند و باعث کاهش تداخل کاربران در این فرایند می‌شود. بنابراین، تکنیک شکل‌دهی پرتو به ایستگاه پایه کمک می‌کند تا مسیری مناسب برای انتقال داده‌ها به کاربر، پیدا کند و همچنین باعث کاهش تداخل با کاربران نزدیک به آن در طول مسیر، می‌شود [۱۶]–[۱۷]. با افزایش تعداد کاربران تلفن همراه و تقاضای آنها برای داده، شبکه‌های 5G و 6G باید ترافیک خیلی بیشتری را با سرعت بسیار بالاتر از ایستگاه‌های پایه‌ای امروزی، مدیریت کنند. شکل‌دهی پرتو، یکی از فناوری‌های در حال رشد است که بسته به شرایط و فناوری موجود به روش‌های مختلفی از قبیل شکل‌دهی آنالوگی پرتو، شکل‌دهی دیجیتالی پرتو و به‌تازگی شکل‌دهی هولوگرافی پرتو در شبکه‌های مخابراتی نسل آینده پیاده‌سازی می‌شود. برای سیستم‌های MIMO Massive، شکل‌دهی پرتو به افزایش کارایی طیف کمک می‌کند در حالی که برای امواج میلی‌متری، شکل‌دهی پرتو موجب افزایش نرخ داده می‌شود. در نهایت، شکل‌دهی پرتو به کاربر نیز کمک می‌کند تا بدون تداخل با کاربران دیگر، سیگنال قوی دریافت کند.

۳-۱- شکل‌دهی هولوگرافی پرتو

شکل‌دهی هولوگرافی پرتو که به اختصار به آن HBF می‌گویند، تکنیک جدیدی برگرفته از مفاهیم فرامواد است. از نظر عملکردی، HBF یک شکل‌دهنده‌ی پرتوی آنالوگ با عملکرد معادل آرایه‌های فازی آنالوگ است. درحقیقت، HBF تکنیک جدیدی برای شکل‌گیری پویای پرتو با استفاده از آنتن مبتنی بر نرم‌افزار است که کمترین C-SWaP در بین معماری‌های موجود را دارد. این روش، تفاوت قابل توجهی با آرایه‌های فازی معمولی یا سیستم‌های MIMO دارد. HBF، آنتن پسیو با هدایت الکترونیکی است که از هیچ تقویت‌کننده داخلی استفاده نمی‌کند. این امر، منجر به ارسال و دریافت متقارن برای آنتن‌های HBF می‌شود. با این حال، HBFها با آرایه فازی، تفاوت دارند. HBFها از شیفتهنده‌های فازی مجزا برای هدایت پرتو آنتن استفاده نمی‌کنند. در عوض، شکل‌دهی پرتو با استفاده از هولوگرام انجام می‌شود [۱۸]–[۲۱]. تکنیک HBF از یک زنجیره RF استفاده می‌کند که تمام عناصر آرایه را از طریق یک پورت RF تغذیه می‌کند. در HBF به جای شبکه تغذیه موازی که در آرایه‌های فازی یا شبکه دیجیتالی در



شکل ۴: هشت فناوری کلیدی برای شبکه‌های 5G و فراتر از آن [۱۱]

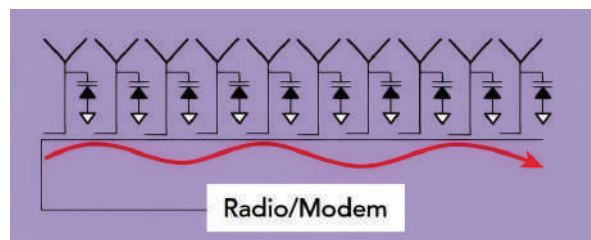


شکل ۳: مقایسه نیازهای عملکردی بین 5G و 6G [۱۵]

دیده شده توسط موج مرجع در هر عنصر می شود. این الگوی امپدانس، هولوگرام است و می تواند به طور مستقیم از اطلاعات ایجاد شده توسط موج مرجع و موج شی مورد نظر، محاسبه شود [۱۸] - [۲۱]. در نتیجه، الگوی کوپلینگ المان که تحریک هدایت شده را به موج فضای آزاد تبدیل می کند، همان هولوگرام است. این سیستم پسیو به طور کامل دوطرفه است زیرا ارسال و دریافت با استفاده از هولوگرام یکسان انجام می گیرد و به هیچ سوئیچی در بخش آنتن، نیاز نمی باشد. اجزاء تقویت کننده و باند پایه در بخش رادیویی باقی می ماند [۱۸] - [۲۱]. تقویت کننده های بیرونی، سطح توان سیگنال ارسالی را افزایش داده و / یا تقویت کننده کم نویز (LNA)، سیگنال دریافتی را تقویت می کنند [۲۰]. در شکل (۶) یک نمونه آنتن HBF نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نیز دیده می شود، آنتن های HBF، قطعاتی پسیو هستند و در آن ها از هیچ گونه قطعات تقویت کننده ای استفاده نمی شود [۲۰].

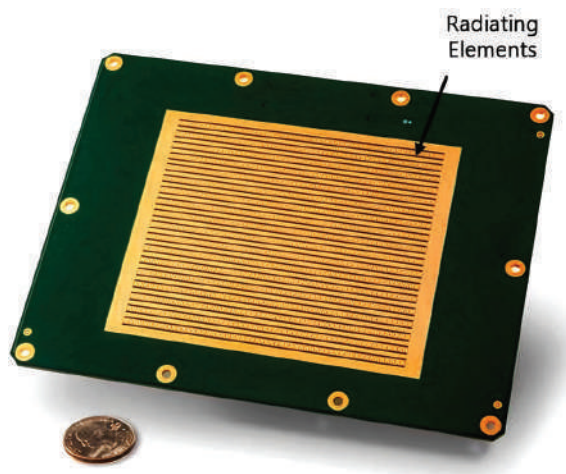
همان طور که در نمای شماتیک شکل (۵) نشان داده شده است بسیاری از عناصر، فاز نادرستی برای شکل پرتو مورد نظر دارند و خاموش می شوند. برای جلوگیری از افت کارایی آنتن با داشتن بخش های قابل توجهی از آرایه در حالت «خاموش»، عناصر به صورت بیشتر از دو برابر چگالی آرایه متداول قرار داده می شوند تا امکان تحریک یکنواخت آنتن و تشکیل پرتو موثرتری نیز فراهم گردد. بنابراین کوچک سازی عناصر در امتداد یک بعد، اهمیت دارد. از طرف دیگر، کوچک سازی عناصر در امتداد یک محور مزیت دیگری نیز دارد زیرا فضای اسکن آنتن را به طور تقریبی به $\pm 80^\circ$ درجه با از دست دادن کمتر از 10° دسی بل از Broadside آنتن، گسترش می دهد [۱۸]. با توجه به تفاوت در شبکه های آرایه ای، در شرایط دایرکتیویته یکسان، تعداد المان های تشعشعی در HBF به طور معمول حدود ۲.۵ برابر تعداد آن در آنتن آرایه ای فازی با شکل دهی دیجیتالی یا آنالوگی می باشد [۲۰]. تمام اجزای مورد استفاده در ساخت آنتن های HBF دارای قطعات تجاری COTS با تیراژ بالا هستند. این اجزای بسیار کم هزینه، کاربرد گسترده ای در گوشی ها نیز دارند و منجر به صرفه اقتصادی می شوند. هزینه، به همان اندازه مهم است که جهت دهی پرتو HBF و تنها با استفاده از آرایه بزرگی از دیودهای و رکتور که

MIMO وجود دارد، از یک شبکه تغذیه سری استفاده می شود که سیگنال RF را در امتداد چندین عنصر جداگانه آنتن، توزیع می کند. در مطالعات، نشان داده شده است که Slot ها، Patch ها، Dipole ها و سایر انواع آنتن های کوچک به عنوان عناصر تابشی با تکنیک HBF قابل استفاده می باشند. یک دیود و رکتور که از طریق یک کوپلر، تغذیه می شود، توان را از شبکه تغذیه به عناصر آرایه منتقل می کند که این طرح، به صورت شماتیکی در شکل (۵) نشان داده شده است [۱۸] - [۲۱].

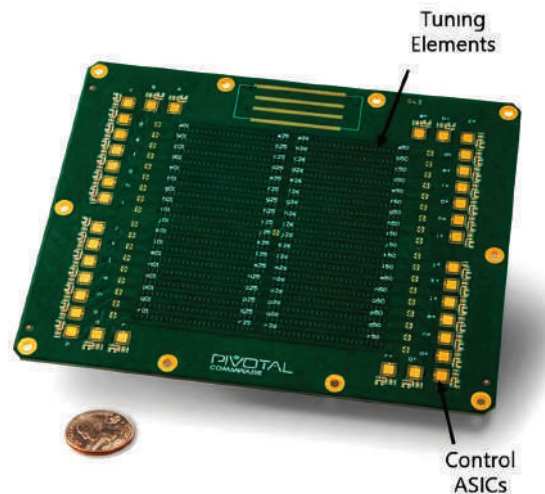


شکل ۵: معماری متداول HBF [۱۸]

HBF به دلیل شباهت آن به هولوگرافی نوری متداول، به این عنوان نامگذاری شده است. در هولوگرافی نوری، یک منبع خارجی «موج مرجع»، سطح هولوگرام را تحریک می کند که این سطح هولوگرام، تحریک را به یک موج خروجی یا «موج شی» تبدیل می کند که چشم ما به عنوان یک تصویر، آن را درک می کند. پس «هولوگرام» ساختاری است که انرژی را از موج مرجع به موج شی، انتقال می دهد. در HBF، موج رادیویی نقش منبع موج مرجع را دارد و پرتو نیز، به عنوان موج شی در هولوگرام نوری عمل می کند. همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، هر عنصر، تغییر فاز پیشروندهی متفاوتی را از خط تغذیه مشاهده می کند. در حقیقت، با تغییر کوپلینگ توان به هر عنصر و تغییر ظرفیت خازنی در دیود و رکتور، فاز مناسب به منظور قرارگیری پرتو در جهت مورد نظر تنظیم می گردد و در نهایت شکل دهی پرتو انجام می شود. بنابراین در HBF، مجموعه ای از عناصر آنتن تابشی در مجاورت شبکه توزیع، باید با دقت طراحی شوند. کوپلینگ بین موج مرجع و این عناصر (و در نتیجه موج شی) با استفاده از یک دیود و رکتور تکی برای هر عنصر آنتن، تنظیم می شود. بایاس دقیق DC در این دیودهای و رکتور، باعث تغییر امپدانس



(ب) دید از پشت برد



(الف) دید از جلوی برد (سمت فضای آزاد)

شکل ۶: یک نمونه از آنتن HBF [۲۰]

پشتیبانی می‌کند، قرار داده می‌شوند. بسیاری از ASIC‌های موجود در بازار با در نظر گرفتن اجزای ارسال و دریافت برای هر المان تشعشعی، از ارتباطات duplex Half پشتیبانی می‌کنند. سوئیچ‌های ارسال/دریافت به‌طور معمول برای اتصال مسیر RF مناسب در ASIC به المان‌های تشعشعی مناسب در آنتن استفاده می‌شوند. یک APA معمولی، چندین ASIC شکل‌دهنده پرتو را روی یک برد مدار چاپی (PCB) قرار می‌دهد تا به اندازه پنجره آنتنی مورد نیاز باشد. به منظور پشتیبانی از زاویه‌های بزرگ اسکن با پرتویی با کیفیت خوب، المان‌های تشعشعی بر روی شبکه‌ای با فاصله به‌طور تقریبی نصف طول موج از هم قرار می‌گیرند.

آنتن HBF دارای یک خط تغذیه است که به هر المان تشعشعی قرار گرفته در یک ردیف، کوپل می‌شود. با هر المان تشعشعی، یک المان تنظیم متناظر وجود دارد. المان‌های تنظیم، خازن‌های قابل‌کنترلی هستند که انتشار سیگنال RF در طول خط و کوپلینگ بین المان‌های تشعشعی را تنظیم می‌کنند. در حقیقت، این المان‌های تنظیم، تنظیم دامنه و فاز سیگنال را در هر المان تشعشعی انجام می‌دهند. بنابراین پرتو را در دو بعد تشکیل داده و هدایت می‌کنند. با توجه به تفاوت در شبکه‌های آرایه‌ای، آنتن HBF به‌طور معمول حدود ۲.۵ برابر المان تشعشعی بیشتری نسبت به آنتن APA برای دایرکتیویته یکسان دارد. با این حال، هر المان تشعشعی در آنتن HBF، یک جز RF ارزان قیمت دارد در حالی که APA دارای قطعات زیاد RF و مرتبط با هر المان تشعشعی است. بنابراین، HBF نسبت به APA بسیار کم هزینه‌تر است و به توان مصرفی کمتری نیاز دارد. در نتیجه HBF مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.

۴-۱- مقایسه عملکرد HBF و APA

برای نخستین مقایسه، هر دو نوع آنتن می‌توانند عملکرد یکسانی را ارائه دهند. هر دو این آنتن‌ها می‌توانند نیازهای عملکردی معمول در حالت فرستندگی از قبیل توان تشعشعی موثر ایزوتروپیک (EIRP) و یا در حالت گیرندگی مانند گین به نویز (T/G) مربوط به کاربردهای مخابراتی 5G را برآورده کنند. هر دو نوع آنتن می‌توانند در باند فرکانسی اصلی مورد علاقه بازار موج میلی‌متری 5G (۲۴، ۲۸ و ۳۹ گیگاهرتز) پیاده‌سازی

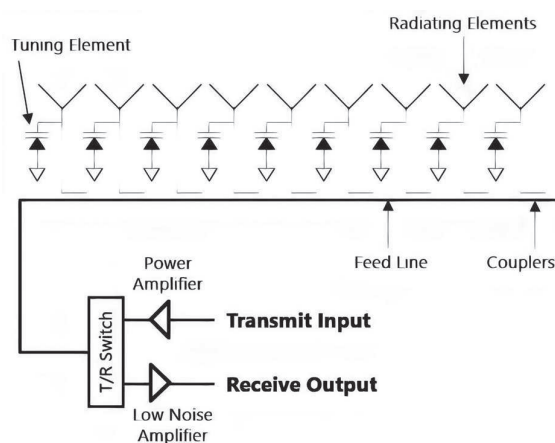
به صورت معکوس بایاس شده‌اند، انجام می‌گیرد. بنابراین جریان به‌طور تقریبی ناچیزی در عملیات جهت‌دهی پرتو آنتن، کشیده می‌شود. بیشتر HBF‌ها فقط با استفاده از USB و یا POE، توان مورد نیاز خود را تأمین می‌کنند. این موضوع موجب می‌گردد که نیاز به خنک‌کننده‌های فعال یا غیرفعال در HBF از بین برود که باعث کاهش قابل توجه اندازه و وزن ساختار HBF می‌شود [۲۰].

۴-۲ مقایسه دو تکنیک شکل‌دهی پرتو مورد استفاده در باند موج میلی‌متری

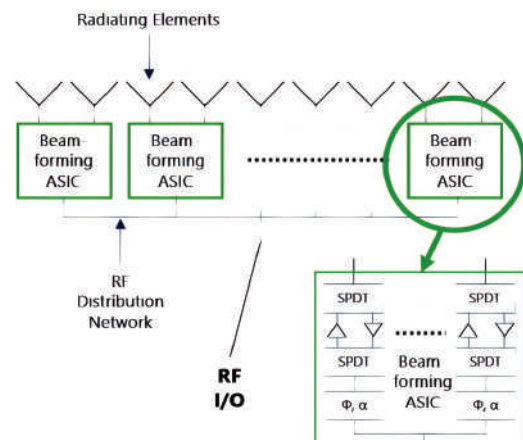
در این بخش، مهمترین عامل محرک موج میلی‌متری یعنی شکل‌دهی آنالوگی پرتو با استفاده از دو فناوری پیشرو یعنی APA و HBF بررسی و مقایسه می‌گردد. در اینجا شکل‌دهی دیجیتال پرتو، مورد بررسی قرار نخواهد گرفت زیرا به دلایل مصرف توان بالا و هزینه‌های قطعات مرتبط با نرخ نمونه‌برداری زیاد در فرکانس‌های موج میلی‌متری، قابلیت استفاده عملی نخواهد داشت. در شکل (۷)، معماری آنتن HBF و APA برای کاربردهای شکل‌دهی پرتو در 5G مقایسه شده است.

در هر دو حالت، پرتو با استفاده از سیگنال RF ارسالی (یا دریافتی) از طریق تعداد زیادی از عناصر تشعشعی، شکل‌دهی و یا هدایت می‌شود، اما دو تفاوت اساسی وجود دارد: (۱) روش استفاده شده برای هدایت سیگنال و (۲) محل تقویت‌کننده استفاده شده.

آنتن APA، دارای شیفتهنده‌های فازی برای هر المان تشعشعی است که به آنها دستور تنظیم فاز مطلوب سیگنال را داده و بدین ترتیب پرتو جهت‌دهی می‌شود. همچنین APA‌ها در هر المان تشعشعی، تقویت‌کننده‌ای دارند تا تلفات سیگنال RF جبران گردد. بیشتر APA‌ها، در هر المان تشعشعی دارای عناصر کنترل گین (تضعیف‌کننده یا تقویت‌کننده با گین متغیر) هستند. این عناصر کنترل گین، برای تصحیح خطاهای دامنه مرتبط با سایر المان‌های مدار و به‌طور معمول برای کنترل دامنه سیگنال RF در هر المان تشعشعی استفاده می‌شوند. بنابراین سطح گلبزرگ کناری (SLL) را کنترل می‌کنند. به منظور کاهش هزینه‌ها و کاهش چالش‌های بسته‌بندی، به‌طور معمول این اجزای RF در یک مدار مجتمع ویژه کاربردی (ASIC) که از چندین المان تشعشعی



(ب) بلوک دیاگرام آنتن HBF
(شامل تقویت‌کننده بیرونی و سوئیچ بین حالت ارسال و دریافت (R/TX))



(الف) بلوک دیاگرام آنتن APA

شکل ۷: بلوک دیاگرام‌های ساده شده HBF و APA [۲۰]

جدول ۲: مقایسه توان مصرفی HBF و APA [۲۳]

واحد	HBF	APA	
#	640	256	تعداد سلول‌های واحد
dB	26	28	گین آنتن
#	1	256	تعداد زنجیره RF مورد استفاده
mW	2512	2/6	توان ارسالی در هر زنجیره
W	51/2	58/1	کل توان RF ارسالی
%	25	4	بازدهی توان افزونه یا PAE (Power Added Efficiency)
W	10	6/39	توان مصرفی بخش RF
W	9/2	0	توان مصرفی بخش کنترلی
W	9/12	6/39	کل توان مصرفی

اشاره نمود. در HBF هیچ شیفت فازی وجود ندارد و تنها از یک تقویت‌کننده توان برای ارسال و یک LNA برای دریافت استفاده می‌گردد. این درحالی است که در APAها تعداد بسیار زیادی شیفت‌دهنده فازی و تقویت‌کننده وجود دارد. بنابراین در HBF به تعداد زیادی المان تنظیم نیاز است که هر یک از آنها قیمت زیر یک دلار دارند. در مجموع، قطعات ساده مورد نیاز برای یک HBF (عناصر تنظیم، PCB، مدار کنترل DC و یک PA / LNA تکی) نه تنها هزینه‌ی کمتری دارند، بلکه باعث کاهش اندازه، وزن و مصرف توان کمتر می‌شوند. در خوشبینانه‌ترین حالت برای APA و بدبینانه‌ترین حالت برای HBF، APAها دو برابر گرانتر از HBFها هستند. این درحالی است که با فرض‌های واقعی، هزینه HBF یک دهم هزینه APA است.

۴-۳- مصرف توان

بعد از هزینه‌های عملیاتی، مصرف توان اهمیت دارد. وجود چندین ASIC، شیفت‌دهنده‌های فازی و تقویت‌کننده‌های توان در APAها، موجب شده است که APAها توان بسیار بیشتری را نسبت به HBFها مصرف کنند. در جدول (۲) توان مصرفی یک HBF با یک APA مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تفاوت مصرف توان چشمگیر است [۲۳].

در استقرار انبوه موج میلی‌متری، حتی اختلافات ناچیز در مصرف توان می‌تواند افزایش چشمگیری در هزینه‌های اجرایی (OPEX) برای اپراتورها ایجاد کند [۲۴]. اگر چه ایستگاه‌های پایه نسل آتی (gNBها)، به تنهایی توان کمتری نسبت به هماتهای خود در 4G مصرف می‌کنند، اما به دلیل محدودتر شدن انتشار موج میلی‌متری، تعداد بیشتری از gNB وجود خواهد داشت. در نتیجه، این یکی از دلایلی است که انتظار می‌رود 5G در سال‌های آینده هزینه‌های مصرف برق را حتی بیشتر کند (شکل (۸) [۲۵]. با توجه به اینکه امروزه، تامین توان سلول‌های دسترسی بی‌سیم تقریباً ۷۰ درصد OPEX را برای اپراتور تشکیل می‌دهد، افزایش مصرف توان بسیار حائز اهمیت است [۲۶].

۴-۴- اندازه و وزن

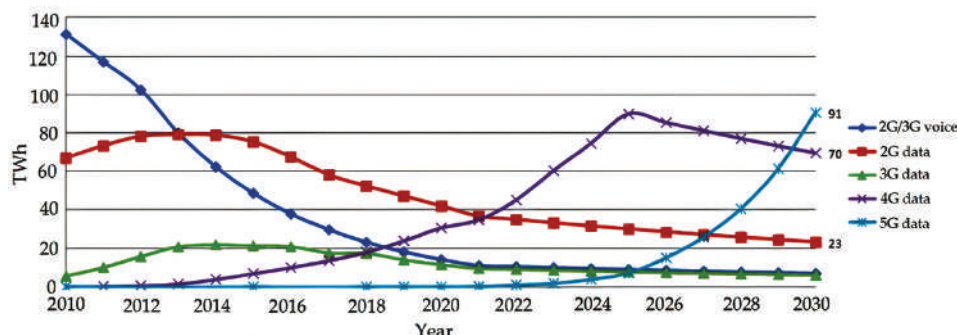
از آنجا که مصرف بیشتر توان، موجب تولید گرمای بیشتر می‌شود، APAها برای دفع حرارت به سطح بیشتری نیاز دارند. این بدان معنی است که با توجه به ملاحظات طراحی حرارتی، محصولات مبتنی بر APA، به طور قابل توجهی بزرگتر از محصولات مبتنی

شوند و هر دو می‌توانند از پهنای باند مورد نیاز و مرتبط با هر یک از این باندهای فرکانسی، پشتیبانی کنند. علاوه بر آن، هر دو نوع آنتن می‌توانند از beam hopping با سرعت بالا و سوئیچینگ سریع بین عملکرد ارسال و دریافت مورد نیاز برای ارتباطات 5G پشتیبانی کنند. این درحالی است که تفاوت‌های معناداری بین دو نوع آنتن وجود دارد. به عنوان مثال، در صفحه سمت، آنتن‌های HBF می‌توانند تا زاویه‌های در حدود $\pm 80^\circ$ درجه اسکن کنند در حالیکه APAها ممکن است به طور معمول محدود به اسکن حدود $\pm 60^\circ$ درجه باشند. زاویه اسکن بالاتر در HBF به اپراتورهای شبکه تلفن همراه اجازه می‌دهد تا تعداد بخش‌های پایه را از سه به دو کاهش دهند. همچنین، آنتن‌های HBF از تقویت‌کننده توان برای تنظیم توان ارسال و حساسیت گیرنده استفاده می‌کنند. به طور معمول، در هر HBF فقط یک تقویت‌کننده توان و یک LNA استفاده می‌شود. در نتیجه، استفاده از خطی‌ساز distortion-pre دیجیتالی در ارسال سیگنال فراهم می‌گردد. distortion-pre دیجیتالی، اعوجاج‌های سیگنالی ایجاد شده توسط تقویت‌کننده‌های توان که نزدیک به بیشینه توان خروجی خود کار می‌کنند را اصلاح کرده و کاهش می‌دهد. اگر تصحیح این اعوجاج‌ها امکان‌پذیر نباشد، لازم است که از تقویت‌کننده‌های توان با توان خروجی بیشتر استفاده شود تا نقطه کارکرد آن به طور قابل توجهی زیر بیشترین توان خروجی ممکن، باشد. این کار باعث افزایش هزینه، مصرف توان و افزایش تلفات و در نتیجه افزایش دما در تقویت‌کننده‌های توان می‌شود. اجرای این روش خطی‌ساز با APA عملی نیست، زیرا APA در هر عنصر تابشی دارای یک تقویت‌کننده توان است.

از طرف دیگر، همان‌طور که در بالا اشاره شد، APAها در هر المان تشعشعی به تضعیف‌کننده قابل تنظیم یا تقویت‌کننده‌های با گین متغییر نیاز دارند. این اجزا در تنظیم SLL در حین عملکرد APA نیز نقش دارند. در HBF نیز SLL تنظیم می‌گردد اما از عناصر کنترلی موجود در HBF برای کاهش SLLها استفاده می‌شود و به سخت‌افزار اضافی دیگری نیاز نیست. در محیط‌های با چالش‌های شدید چند مسیریگی، کاهش SLL برای عملکرد مناسب کانال، مورد توجه می‌باشد حتی اگر این کار باعث کاهش توان ارسالی و یا حساسیت گیرندگی شود.

۴-۲- مقایسه C-SWaP

همان‌طور که گفته شد، C-SWaP نشان‌دهنده هزینه، اندازه، وزن و مصرف توان است. ۶۵٪ تا ۷۰٪ از کل هزینه یک شبکه در بخش RAN آن است [۲۲]. از آنجایی که RAN در 5G متراکم و فشرده‌تر می‌باشد و بیشترین هزینه RAN مربوط به بخش شکل‌دهی پرتو می‌باشد، در نتیجه، کاهش هزینه‌های شکل‌دهی پرتو برای اپراتورها اهمیت بسیار زیادی دارد. هزینه سخت‌افزار به پیش‌فرض‌های زیادی بستگی دارد، اما در منصفانه‌ترین مقایسه، هزینه HBF به‌طور تقریبی نصف APA است که این امر به دلیل هزینه اجزای گران‌قیمت از قبیل ASIC در APA است. همان‌طور که در بخش الف شکل (۷) نشان داده شد، APA شامل ASIC RFهای زیادی است درحالی که در HBF، به‌طور معمول به ازای هر ۲۵ عنصر تنظیم، یک ASIC کنترل دیجیتالی وجود دارد. از طرفی، ASICهای بکارگرفته شده در HBF، بسیار ساده بوده و ولتاژ کنترلی اعمال شده بر روی هر عنصر کنترلی را تنظیم می‌کنند تا پرتو هدایت شود. از دیگر مواردی که موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود، می‌توان به شیفت فاز و تقویت‌کننده



شکل ۸: مصرف توان مورد انتظار از شبکه‌های دسترسی بی‌سیم [۲۰]

داده Tbps را در 6G فراهم کند. با توجه به پیشرفت فناوری‌های مرتبط، انتظار داریم که 6G برای استفاده از باند فرکانسی تا بیشینه ۳۰۰۰ گیگاهرتز طراحی شود [۳۲].

از آنجایی که تحقیقات در مورد تولید و بهبود توان خروجی سیگنال ترانزستور مهم است، محققان باید به بسیاری از جنبه‌ها از جمله موارد زیر توجه کنند:

- (۱) انتقال سیگنال درون سیستم یکپارچه و آنتن با افت کم؛
- (۲) بسته‌بندی سیستم یکپارچه با تلفات کم و حفظ تبادل حرارت مناسب؛
- (۳) کاهش نویز میکسر؛
- (۴) مدل‌های آنالوگ به دیجیتال (ADC) چند گیگا نمونه‌ای در ثانیه و مدل‌های دیجیتال به آنالوگ (DAC) با مصرف کم توان؛

(۵) ورودی / خروجی دیجیتال کم‌توان به ADC/DAC برای انتقال داده با سرعت Tbps با مصرف توان قابل قبول.

حرکت به فرکانس ترانزستور به معنای افزایش شدید افت مسیر است. در نتیجه، آرایه‌های آنتنی گسترده و بی‌سابقه‌ای برای جبران افت مسیر ضروری است. طراحی چنین آرایه‌هایی که با بازده بالا در فرکانس ترانزستور کار کنند، طراحی شبکه تغذیه و عناصر آنتن با پهنای باند چندین گیگاهرتز را با چالش‌های زیادی مواجه می‌کند. علاوه بر این، استفاده از آرایه‌های بسیار بزرگ منجر به پرتوهای بسیار متمرکز، مشابه پرتوهای لیزری می‌گردد. در نتیجه، لینک‌های ارتباطی در این فرکانس‌ها به LoS و مسیرهای منعکس شده متمرکز بستگی دارند نه به مسیرهای پراکنده و پراش. بهینه‌سازی معماری شکل‌دهنده پرتو به گونه‌ای که بدون افزایش هزینه و مصرف زیاد انرژی، دامنه دینامیکی مناسب و انعطاف‌پذیری بالایی را ایجاد کند از اهمیت زیادی برخوردار است. در ادامه، فناوری‌های جدید آنتن در باند ترانزستور بررسی شده است.

۶- فناوری‌های جدید آنتن در باند ترانزستور

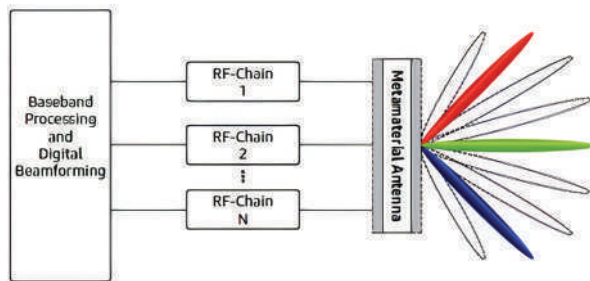
شکل‌دهی پرتو و MIMO Massive توانایی ایستگاه پایه را در انعطاف‌پذیری و ظرفیت شبکه بالا می‌برد. اگر چه MIMO Massive مزایای بسیار زیادی را به همراه دارد، اما هنوز چالش‌های مختلفی مانند عدم تست کامل آن، تخمین کانال، پیش‌رمزگذاری، اختلالات سخت‌افزاری، بهره‌وری انرژی و تشخیص سیگنال وجود دارد. در نتیجه، ضروری است در یک محیط واقعی مورد ارزیابی و آزمایش قرار گیرد تا به مزایای وعده شده آن بتوان دست یافت. از این‌رو، برای مرتفع نمودن چالش‌های استقرار سیستم‌های MIMO Massive در کل دنیا، دانشگاه و صنعت به تمرکز فعالیت بر روی این دسته از سیستم‌ها سوق داده شده‌اند. در همین راستا، فناوری‌های جدید از قبیل

بر HBF خواهند بود و در نتیجه، سنگین‌تر نیز خواهند بود. پس به‌طور خلاصه می‌توان گفت که HBF شامل معماری جدیدتر و ساده‌تری است که از اجزای با پیچیدگی و هزینه کم‌تر استفاده می‌کند. در حالی که APAها به دلیل معماری پیچیده‌تر، از چندین اجزای گران‌قیمت از قبیل ASIC، شیفتردهنده‌ی فازی و تقویت‌کننده استفاده می‌کنند. در نتیجه، APAها به‌طور قابل توجهی گران‌تر از HBFها می‌باشند. از طرفی، APAها به‌طور قابل توجهی انرژی بیشتری مصرف و به نوبه خود، گرمای بیشتری تولید می‌کنند، بنابراین نیاز به تبادل گرما با افزایش سطح دارند. در نتیجه APAها سنگین‌تر و حجیم‌تر از HBFها هستند. C-SWaP مربوط به HBF به نسبت پایین‌تر است و در نهایت هزینه‌های سرمایه‌ای CAPEX و OPEX را کاهش می‌دهد.

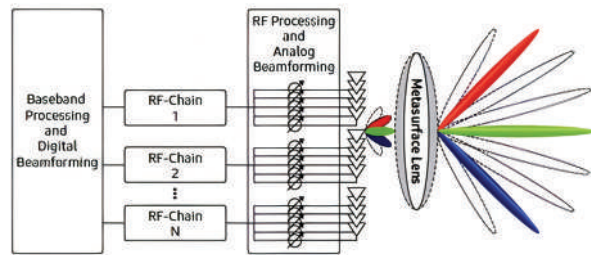
۵- باند ترانزستور (THz)

با افزایش تقاضا و آرایه سرویس‌های جدید، بازار بی‌سیم فعلی به سرعت در حال گسترش است. با صحبت در مورد شبکه‌های 6G، تقاضای طیف بالاتر در آینده نزدیک، نزدیک‌تر خواهد بود. فرکانس بالاتر از باند موج میلی‌متر (۳۰ گیگاهرتز - ۳۰۰ گیگاهرتز) می‌تواند برای ارتباطات بی‌سیم استفاده شود [۱۱]. باند فرکانسی بین ۳۰۰ گیگاهرتز تا ۳ THz به باند ترانزستور معروف است. اگر چه استفاده از باند ترانزستور، ایده به نسبت جدیدی است اما تحقیق در این زمینه می‌تواند برای صنعت ارتباطات بی‌سیم ارزشمند باشد. علاوه بر استفاده از یک طیف آزاد و پهنای باند بالاتر، مزایای بسیاری در باند THz وجود دارد مانند مقیاس‌پذیری بیشتر، امنیت بالاتر، در دسترس بودن طیف greenfield، مصرف کمتر انرژی، آنتن‌های کوچک‌تر و پرتوهای متمرکزتر و امکان موقعیت‌یابی با دقت بالاتر [۲۷] - [۲۹] چالش‌های زیاد و در نتیجه زمینه‌های جدیدی برای تحقیق در استفاده از باند THz وجود دارد که می‌توان به مواردی از قبیل طراحی پیچیده آنتن به منظور دستیابی به آنتن با گین بالاتر، مشخصات و استقرار نقطه دسترسی، طراحی پیچیده مداری، افت انتشاری زیاد و مدیریت پیچیده تحرک اشاره کرد [۲۷].

در مارس ۲۰۱۹، کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC) طیفی بین ۹۵ گیگاهرتز و ۳۰۰ گیگاهرتز را برای استفاده آزمایشی و کاربردهایی که مجوز ندارند، با هدف توسعه فناوری‌های جدید ارتباطات بی‌سیم آزاد نمود [۳۰]. علاوه بر این، بحث استفاده و سناریوهای استقرار سیستم‌های رادیویی جدید در 5G که در باندهای بالاتر از ۵۲.۶ گیگاهرتز کار می‌کنند، آغاز شده است [۳۱]. به دنبال این روند، استفاده ارتباطات تلفن همراه از باند ترانزستور در سیستم‌های بی‌سیم آینده اجتناب‌ناپذیر است. باند ترانزستور شامل پهنای باند عظیمی است که کانال‌های با پهنای باند ده‌ها گیگاهرتز را فراهم می‌سازد. این ویژگی، به‌طور بالقوه می‌تواند امکان تامین نیاز نرخ



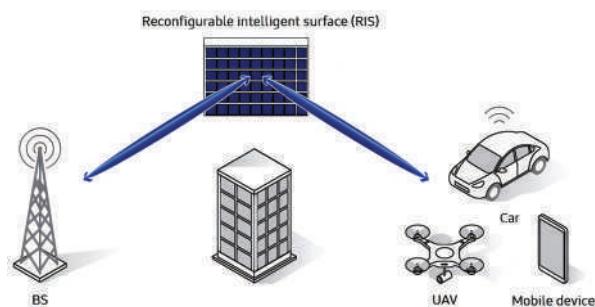
شکل ۱۰: Metamaterial antenna [۱۵]



شکل ۹: Metasurface lens [۱۵]

در جایی که هیچ لینک LoS وجود ندارد، استفاده کرد [۳۶]. نمونه‌ای از بازتاب سیگنال از طریق RIS در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در مقایسه با 5G، انتظار می‌رود که در سیستم‌های بی‌سیم 6G، بیشتر از IRS به جای Massive MIMO استفاده گردد [۳۷].

۴- شکل‌دهی پرتو هولوگرافی: تبدیل پرتو هولوگرافی یا HBF، روشی جدید برای شکل‌دهی پرتو است که تفاوت قابل ملاحظه‌ای با سیستم‌های MIMO دارد زیرا مبتنی بر آنتن‌های نرم‌افزاری می‌باشد. HBF روشی مناسب در 6G برای انتقال و دریافت کارآمد و انعطاف‌پذیر سیگنال‌ها در دستگاه‌های ارتباطی چند آنتن است. HBF می‌تواند در زمینه امنیت لایه فیزیکی (PHY)، افزایش پوشش شبکه و موقعیت‌یابی، نقش‌های مهمی را ایفا کند [۳۷].



شکل ۱۱: برقراری ارتباط بین BS و کاربر تلفن همراه از طریق RIS وقتی مسیر LoS مسدود شده است [۱۵]

۷- نتیجه‌گیری

انتظار می‌رود شبکه 5G، جنبه‌های بسیار زیادی را در ارتباطات بی‌سیم بهبود بخشد که از آن جمله می‌توان به خدمات تلفن همراه پیشرفته، مقیاس‌پذیری بیشتر برای سیستم‌های اینترنت اشیا و ارتباطات قابل اعتماد برای کاربردهای مهم اشاره نمود. از این‌رو، 5G تجربه بهتری را در اختیار کاربران قرار می‌دهد و امکان اتصال گسترده بین افراد، بین ماشین‌ها و افراد و همچنین بین ماشین‌ها را فراهم می‌کند. برای این دسته اتصال سریع، آنتن‌هایی سریع برای ارتباط آسان داده‌ها و اطلاعات، مورد نیاز است. از طرفی، آنتن‌های 5G به نرخ داده بیشتری نیاز دارند. اتحادیه بین‌المللی ارتباطات از راه دور (ITU)، 1 Gbit/s را به‌عنوان نرخ انتقال داده استاندارد تعیین کرده است. آنتن‌های هوشمند 5G، انتقال نرخ داده بیشتر را فراهم می‌کند. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود به‌کارگیری فراگیر آنتن‌های هوشمند در شبکه 5G، به رشد بازار آنتن‌های هوشمند 5G کمک کند. در نتیجه بازار آنتن‌های هوشمند 5G بازاری رو به رشد است که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق‌تری در بومی‌سازی این فناوری و خودکفایی در این حوزه می‌باشد.

Massive Ultra MIMO (MIMO-UM)، MIMO Massive میلی‌متری، امواج تراهرتز و ارتباطات نور مرئی، نیاز به تحقیقات زیادی دارند تا بر روی سیستم‌های بی‌سیم کنونی، پیاده‌سازی شوند. یکی از زمینه‌های جالب برای تحقیق در موضوع Massive MIMO، ترکیب آن با ارتباطات کوانتومی در فرکانس‌های بالاتر از 300 گیگاهرتز خواهد بود. از طرفی، برای تحقق THz MIMO-UM در شبکه‌های 5G و فراتر از آن، تحقیقات بیشتری لازم است. برخی از موضوعات مربوط به این حوزه تحقیقاتی مهم، بررسی ساخت آنتن‌های آرایه نانو پلاسمونیک، روش‌های بهینه برآورد کانال، پیش‌رمزگذاری پیچیده و کارآمد و الگوریتم‌های تشخیص سیگنال، شکل‌دهی دقیق پرتو و جهت‌دهی پرتو می‌باشند [۲۸]–[۲۹].

برای غلبه بر چالش‌های دشوار انتشار باند تراهرتز، ممکن است فناوری Massive MIMO که برای پشتیبانی از باند موج میلی‌متری در 5G معرفی شده است، بیشتر مورد توجه قرار گیرد. از آنجا که باند تراهرتز به آنتن‌های بیشتری نسبت به باند موج میلی‌متری نیاز دارد، ممکن است مشکلات عملی بسیار بیشتری نیز در آن وجود داشته باشد. یکی از گزینه‌های احتمالی فناوری‌های جدید و مطرح آنتنی، مبتنی بر فرامواد است. ساختارهای فرامواد به‌طور معمول با تنظیم چندین عنصر قابل تنظیم (دیویدهای PIN، دیویدهای وریکتور و غیره) در الگوهای تکراری و در فواصلی که کوچکتر از طول موج‌ها هستند، ساخته می‌شوند [۳۳]. شکل، هندسه، اندازه، جهت و ترتیب دقیق فرامواد، ویژگی‌های خاصی را فراهم می‌سازد که امواج الکترومغناطیسی را به‌طور مثال، مسدود، جذب، منعکس و ... می‌نماید. علاوه بر این، هر عنصر تشکیل‌دهنده را می‌توان به‌طور مستقل کنترل کرد تا به ویژگی‌های مطلوب امواج الکترومغناطیسی مانند جهت انتشار و بازتاب دست یابد. روش‌های برجسته استفاده از فرامواد در باند تراهرتز به شرح زیر می‌باشد:

۱- **Metasurface lens** ها به‌عنوان ساختار تغییر فاز به سیگنال تابش شده از آرایه آنتن اعمال می‌شوند [۳۴]. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، این ساختار می‌تواند جهت پرتو را با اعمال بایاس مناسب DC به عناصر تشعشعی تشکیل‌دهنده آن، تنظیم کند. Metasurface lens ها قابلیت باریک کردن شکل پرتو را نیز دارند.

۲- **آنتن Metamaterial**: همان‌طور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود این آنتن مانند یک آنتن تشدیدکننده برای ایجاد پرتوهای جهت‌دار عمل می‌کند [۳۵]. در مقایسه با Metasurface lens، این دسته آنتن‌ها به آرایه آنتنی جداگانه با شیف فاز نیاز ندارند.

۳- **سطح هوشمند قابل تنظیم (RIS) و یا سطح انعکاسی هوشمند (IRS)**: از RIS می‌توان برای ایجاد مسیر انتشار

از طرفی، با افزایش روزافزون تقاضای ترافیک داده‌های بی‌سیم، کمبود طیف در باند فرکانس مایکروویو بارزتر شده است. این امر مستلزم به‌کارگیری فرکانس موج میلی‌متری (۳۰ تا ۳۰۰ گیگاهرتز) برای ارتباطات 5G و فرکانس موج تراهرتز (۳۰۰ گیگاهرتز تا ۳ تراهرتز) برای ارتباطات 6G با مخابرات بی‌سیم با سرعت بالای انتقال داده است. تفاوت‌های اساسی بین ارتباطات موج میلی‌متری و تراهرتز و سایر سیستم‌های ارتباطی موجود که در محدوده فرکانس مایکروویو کار می‌کنند (به عنوان مثال باند ۲,۴ گیگاهرتز و ۵ گیگاهرتز) در طراحی شبکه‌های آینده (5G و 6G)، باید مدنظر قرار گیرد. ارتباطات موج میلی‌متری و تراهرتز دارای معایب عدم نفوذ در ساختمان‌ها، حساسیت به انسداد ناشی از موانع با پراش ضعیف، تلفات انتشاری زیاد به دلیل فرکانس حامل بالا و در نتیجه محدوده تشعشعی پایین می‌باشند که این ویژگی‌ها ممکن است برای استفاده دوباره از طیف، افزایش کارایی و افزایش امنیت در ارتباطات، مزیت به حساب آید. با این حال، افت شدید مسیر در فرکانس‌های بالا، فاصله ارتباط را محدود می‌کند که مساله اصلی در ارتباطات موج میلی‌متری و تراهرتز است. این موضوع، چالش‌های جدیدی را در همه لایه‌های شبکه – لایه فیزیکی، کنترل دسترسی به رسانه (MAC) و لایه‌های مسیریابی – ایجاد می‌کند که نیاز به انتخاب پردازش سیگنال، مدار، آنتن و فناوری‌های ارتباطی جدید دارند. در بخش آنتن، از آرایه بزرگ آنتنی با گین زیاد برای مقابله با افت شدید انتشاری استفاده می‌شود. افزایش دایرکتیویته آرایه، باعث کاهش عرض پرتو لوب اصلی می‌شود. در نتیجه به تکنیک شکل‌دهی پرتو در آنتن آرایه نیاز می‌باشد که باعث بهبود پوشش می‌گردد و سیگنال مداوم یا ردیابی کاربر را فراهم می‌کند. برای متمرکز کردن و هدایت انرژی الکترومغناطیسی در یک جهت خاص در شبکه‌های ارتباطی 5G و 6G، از تکنیک‌هایی از قبیل آرایه‌فازی، Massive MIMO و به‌تازگی روش HBF استفاده می‌شود. در این مقاله، مزایا و معایب هر یک بررسی شد. نشان داده شد که MIMO بیشترین هزینه کلی را به دلیل اجزای به نسبت گران در پشت هر عنصر آنتنی و همچنین واحد باند پایه پیچیده و پرهزینه دارد. آرایه‌های فازی در هزینه کلی، رتبه دوم را دارند. این درحالی است که HBF، کمترین هزینه کلی را دارد زیرا اگر چه بیشترین عنصر را دارد اما هر یک از آنها با کمترین و کم‌هزینه‌ترین قطعات و اجزاء پشتیبانی می‌شوند. بنابراین تکنیک HBF دارای مشخصه C-SWaP بهتری نسبت به تکنیک‌های دیگر است. بنابراین، این تکنیک شانس بسیار بالایی برای به‌کارگیری در شبکه‌های 5G و 6G خواهد داشت. از طرفی، استفاده از مواد نانو و فرامواد برای آرایه‌های آنتن پلاسمونیک به عنوان مثال آنتن‌های مبتنی بر گرافن نیز در باند تراهرتز، یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم در شبکه‌های آتی مخابرات بی‌سیم می‌باشد. از طرفی ساختارهای مربوط به ارتباطات ماهواره‌ای در حال حرکت (SOTM) که برای ایستگاه‌های زمینی متحرک از قبیل قطار، هواپیما، اتومبیل و غیره استفاده می‌شود، در سال‌های اخیر توسط کمپانی‌های متفاوتی عرضه شده است. بخش کلیدی در ساختارهای SOTM، آنتنی است که ویژگی‌هایی از قبیل بیم باریک جهت ارسال یا دریافت سیگنال‌های پهن‌بند ماهواره، توانایی ردگیری ماهواره، سطح گلبیگ کناری پایین مطابق با ملاحظات ITU و توان مصرفی کم را دارد. با توجه به این الزامات و همچنین تکنیک شکل‌دهی پرتویی HBF، می‌توان با پژوهش در این تکنیک، در ساختارهای SOTM نیز از آن استفاده کرد.

واژگان کلمات اختصاری بکار رفته در مقاله

معادل فارسی	لغات انگلیسی
چندورودی-چندخروجی عظیم	Massive Multi-input Multi-output (Massive MIMO)
چند ورودی- چند خروجی	Multi-input Multi-output (MIMO)
شکل‌دهی هولوگرافی پرتو	Holographic Beamforming (HBF)
موج میلی‌متری	Millimeter wave (MM wave)
تجهیزات دسترسی بی‌سیم ثابت	Fixed wireless access (FAW)
شکل‌دهی پرتو	Beamforming
وفاداری بالای سیگنال	High signal fidelity
پیکربندی	Reconfigure
آرایه فازی اکتیو	Active Phase Array (APA)
آنتن با شکل‌دهی هولوگرافی پرتو	Holographic Beamforming (HBF) Antenna
هزینه، اندازه، وزن و مصرف توان	Cost size weight and power consumption (C-SWaP)
شبکه‌های بی‌سیم محلی	Local Area Networks (LAN)
اینترنت اشیا	Internet of things (IoT)
ارتباطات ماشین به ماشین	Machin to Machin (M2M)
واقعیت افزوده	Augmented reality
واقعیت مجازی	Virtual reality
ویدیوهایی با کیفیت بسیار بالا	Ultra high definition video
ابرموبایل	Mobile cloud
بازدهی طیفی	Spectral efficiency
معماری دستگاه محور	Device-centric architecture
شکل‌دهی آنالوگی پرتو	Analog Beamforming
شکل‌دهی دیجیتالی پرتو	Digital Beamforming
فرامواد	Metamaterial
آنتن مبتنی بر نرم‌افزار	Software Defined Antenna (SDA)
آنتن پسیو با هدایت الکترونیکی	Passive Electronically Steered Antenna (PESA)
تغییر فاز پیشرونده	Progressive phase shift
تقویت‌کننده کم نویز	Low Noise Amplifier (LNA)
توان روی اترنت	Power Over Ethernet (POE)
سطح گلبیگ کناری	Side Lobe Level (SLL)
مدار مجتمع ویژه کاربردی	Application-Specific Integrated Circuit (ASIC)
برد مدار چاپی	Printed Circuit Board (PCB)
توان تشعشعی موثر ایزوتروپیک	Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)
سمت	Azimuth
هزینه‌های اجرایی	Operating expenses (OPEX)

- [51] 6" G :The Next Hyper Connected Experience for All ", Issued by Samsung Research, 2020 ,
- [16] A.F Molisch et al" , „Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey “, IEEE Communications Magazine, 141–134 , 55 , September, 2017
- [17] B .Yang et al" „Digital Beamforming-Based Massive MIMO Transceiver for 5 G Millimeter-Wave Communications “, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques–3403 , 66 , , 3418 May, 2018
- [18] Eric Black ,Alex Katko and Andjela Ilic-Savoia" „Breaking Down mmWave Barriers with Holographic Beam Forming“, Microwave Journal ebook , March, 2020
- [19] Eric J .Black" „Holographic Beam Forming and MIMO“, 2019 available : <https://pivotalcommware.com/technology/>
- [20] Eric J .Black" „Holographic Beam Forming and Phased Array, 2019 “, available : <https://pivotalcommware.com/technology/>
- [21] Eric Black5" „G :Antenna Technology for Smart Products“, ANSYS ADVANTAGE ,ISSUE, 2018 | 2
- [22] "O-RAN :Towards an Open and Smart RAN “, O-RAN Alliance White Paper , October, 2018
- [32] "5G Millimeter Wave Frequencies and Mobile Networks“, A Technology Whitepaper on Key Features and Challenges, International Wireless Industry Consortium , June, 2019 available : https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Articles/IWPC.062019_.pdf
- [42] "What is new at Anokiwave 20 – Years Celebration and mmWave5 G is now a Commercial Reality “, Anokiwave website, by Alastair Upton , May 2019 , 23
- [25] Mohammed H .Alsharif ,A .H .Kelechi ,J .Kim ,J .H .Kim "Energy Efficiency and Coverage Trade-Off in 5 G for Eco-Friendly and Sustainable Cellular Networks “, Symmetry, 11 March, 2019
- [26] Amy Myers Jaffe" What 5 G Means for Energy “, Council on Foreign Relations ,Energy Realpolitik , May, 2019
- [27] R .Singh ,W .Lehr ,D .Sicker ,S .M .Huq" „Beyond 5 G :The Role of THz Spectrum “, SSRN Electronic Journal , January , 2019
- [28] Eirini Karapistoli et al" „An Overview of the IEEE802.15.4 a Standard “, IEEE Communications Magazine, 48, pp. 47-53, January 2010.
- [29] Hadi Sarieddeen et al., "Next Generation Terahertz Communications: A Rendezvous of Sensing, Imaging, and Localization," IEEE Communications Magazine, 58, 69-75, May 2020.
- [30] FCC Docket 18-21, "FCC Opens Spectrum Horizons for New Services and Technologies," March 2019.
- [31] 3GPP TR 38.807, "Study on Requirements for NR beyond 52.6 GHz," March 2019.
- [32] Roger D. Pollard, "Guest Editorial," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 48, no. 4, pp. 625-625, April 2000.
- [33] Ricardo Marqués et al., "Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications," John Wiley & Sons, 2007.
- [34] John Brian Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens," Physical review letters, vol. 85, no. 18, pp. 3966-3969, October 2000.
- [35] Richard W. Ziolkowski et al., "Metamaterial-Based Efficient Electrically Small Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 54, 2113- 2130, July 2006.
- [36] Chongwen Huang et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication," IEEE Transactions on Wireless Communications, 18, 4157-4170, August 2019.
- [37] Mostafa Zaman Chowdhury, Md. Shahjalal, Shakil Ahmed, and Yeong Min Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," IEEE Open Journal of the Communications Society, 1, 957– 975, July 2020.

Capital expenses or expenditure (CAPEX)	هزینه‌های سرمایه‌ای
Next generation NodeB (gNB)	ایستگاه‌های پایه نسل آتی
Mobility management	مدیریت تحرک
License	مجوز
Reconfigurable intelligent surface (RIS)	سطح هوشمند قابل تنظیم
Intelligent Reflective Surface (IRS)	سطح انعکاسی هوشمند
Software-defined antenna	آنتن‌های نرم‌افزاری
International Telecommunication union (ITU)	اتحادیه بین‌المللی مخابرات
Physical layer (PHY)	لایه فیزیکی
Media Access Control layer (MAC)	کنترل دسترسی به رسانه
Satellite communication On the Move (SOTM)	ارتباطات ماهواره‌ای در حال حرکت

مراجع

- [1] S. Rangan; T. S. Rappaport; Elza Erkip "Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges," Proceeding of the IEEE ,385–366 ,102 ,March, 2014
- [2] M .Xiao et al" „Millimeter-wave communications for future mobile networks “, IEEE Journal on Selected Areas in Communications ,1935–1909 ,35 ,September 2017
- [3] Dan Wu et al" „Millimeter-wave multimedia communications: Challenges ,methodology ,and applications “, IEEE Communication Magazing ,238–232 ,53 ,January, 2015
- [4] X .Wang ,et al" „Millimeter Wave Communication :A Comprehensive Survey “, IEEE Communications Surveys& Tutorials, 2018 ,1653–1616 ,20 .
- [5] Chakraborty ,R ;Kumari ,N ;Mousam ,M ;Mukherjee ,A. The Future of 5 G and Millimeter Waves “, In Proceedings of the 2018 Second International Conference on Electronics, Communication ,and Aerospace Technology ICECA,(Coimbatore ,India 31–29 ,1683–1679 ,March, 2018
- [6] Diego Caratelli et al" „Dielectric Resonator Antenna Arrays for 5 G Wireless Communications “, Microwave Journal ebook, March, 2020
- [7] 5G Smart Antenna Market by Type) Switched Multi-Beam Antenna and Adaptive Array Antenna ,(Technology) SIMO, MISO ,and MIMO ,(Use Case ,Application ,and Region– 2020 ,2025 Research and Markets ,September, 2020
- [8] IEEE5 G" „IEEE5 G and Beyond Technology Roadmap White Paper ,2017 “, available : <https://futurenetworks.ieee.org/images/files/pdf/ieee5-g-roadmap-white-paper.pdf>
- [9] Joe Madden5" G Millimeter Wave :2019 Radio Architecture and Outlook “, Mobile Experts ,March, 2019
- [10] Cisco Visual Networking Index :Forecast and Trends, ,2022–2017 White Paper c11-741490-00 .Available : <https://cyrexdigital.com/public/uploads/content/files-201/white-paper-c11-741490.pdf>.
- [11] Robin Chataut and Robert Akl" „Massive MIMO Systems for 5 G and beyond Networks—Overview ,Recent Trends, Challenges ,and Future Research Direction “, Sensors, 20 , , 2020 ,2753
- [21] " Use cases and scenarios of 5 G integrated satellite-terrestrial networks for enhanced mobile broadband: The SaT5G approach," May 2108. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1245>.
- [13] Florian Völk et al., "Satellite Integration into 5G: Accent on First Over-The-Air Tests of an Edge Node Concept with Integrated Satellite Backhaul " ,Future Internet ,11 ,September , 2019
- [14] Ericsson White Paper5" „G systems – Enabling the Transformation of Industry and Society “, UEN 23-3251 284 rev B , January, 2017



مقاله علمی-ترویجی

بررسی راه کارهای فنی کاهش سطح پرتوگیری در شبکه های تلفن همراه

لادن اسمعیلی، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، l.esmaeeli@itrc.ac.ir

مهسا رضایی، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، ma.rezaei@itrc.ac.ir

نرگس نوری^{*}، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، nnoori@itrc.ac.ir

(^{*} نویسنده مسئول)

چکیده

امروزه به دلیل توسعه استفاده از تلفن همراه و رویکردهای جهانی در پیاده سازی شبکه های 5G، سطح قرارگیری عموم افراد در معرض تابش امواج الکترومغناطیسی افزایش زیادی پیدا کرده است. این مساله نگرانی هایی را در مورد عوارض سلامتی ناشی از قرار گرفتن در معرض این امواج ایجاد می کند. روش های مختلفی مانند کنترل توان، شکل دهی پرتو و MIMO انبوه برای کاهش سطح تشعشعات الکترومغناطیسی در سیستم های تلفن همراه پیشنهاد می شوند. همچنین مواردی مانند توپولوژی شبکه و مدت زمان قرارگیری در معرض تابش میدان الکترومغناطیسی نیز می تواند در کاهش سطح پرتوگیری مؤثر باشد. در این مقاله، ابتدا تعریف پرتوگیری الکترومغناطیسی، معیارها، اثرات و قوانین آن مورد اشاره قرار می گیرد. سپس، معماری شبکه های ارتباطات سیار و اثر آن بر پرتوگیری الکترومغناطیسی بررسی می شود. در بخش بعد، راه کارهای فنی کاهش سطح تشعشعات الکترومغناطیسی در بخش اپراتوری شبکه های تلفن همراه مورد بررسی قرار می گیرد. در انتها نیز راه کارهای فنی مورد استفاده در تجهیزات کاربران تلفن همراه برای کاهش سطح تشعشعات الکترومغناطیسی ارایه می شوند.

کلمات کلیدی: پرتوگیری الکترومغناطیسی، راه کارهای فنی، کاهش پرتوگیری، شبکه های تلفن همراه.

Technical solutions to reduce exposure in mobile communication networks

■ Ladan Esmaeeli, Iran Telecommunication Research Center, l.esmaeeli@itrc.ac.ir

■ Mahsa Rezaei, Iran Telecommunication Research Center, ma.rezaei@itrc.ac.ir

■ Narges Noori*, Iran Telecommunication Research Center, nnoori@itrc.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

Nowadays, due to different applications of cell phones and global approaches in the implementation of 5G networks, the level of public exposure to electromagnetic radiation has increased significantly. This increases concerns about the health effects of these exposures. Various methods such as power control, beamforming and massive MIMO are proposed to reduce the level of electromagnetic radiation in mobile networks. Furthermore, network topology and duration of exposure can be effective in reducing the level of exposure. In this paper, first,

the definition of electromagnetic radiation, its criteria, effects and rules are mentioned. Then, the architecture of mobile communication networks and its effect on electromagnetic radiation are investigated. Afterwards, some technical solutions that can be used by network operator to reduce the level of electromagnetic radiation in the network are examined. Finally, some technical solutions are presented that can be used in cell phones to reduce the level of electromagnetic radiation of these devices.

Keywords: Electromagnetic Exposure, Mobile communication Networks, Technical Solutions.

۱- مقدمه

با فرکانس و خصوصیات فیزیکی بافت‌های بدن متفاوت می‌باشند. به‌طور کلی، تابش‌های الکترومغناطیسی به تابش‌های یون‌ساز و غیر یون‌ساز طبقه‌بندی می‌شوند [۳]. تابش‌های یون‌ساز به تابش آن دسته از امواج الکترومغناطیسی گفته می‌شود که انرژی کافی را برای گسستن پیوندهای الکترون‌ها از مدار یک اتم داشته باشند. این اتفاق در بالاتر از فرکانس‌های نوری و در حدود امواج ماورای بنفش رخ می‌دهد. در حالی که، تابش غیر یون‌ساز انرژی کافی برای یونیزه کردن اتم‌ها را ندارد، اما آنها را به یک حالت انرژی بالاتر سوق می‌دهد. بازه فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز در محدوده تشعشعات غیر یون‌ساز قرار دارند [۴]. بنابراین، امواج RF مورد استفاده در شبکه‌های تلفن همراه در این گروه قرار می‌گیرند.

بر اساس فاصله از منبع تشعشع دو ناحیه با عنوان ناحیه میدان نزدیک و ناحیه میدان دور تعریف می‌شوند. مشخصه‌های میدان‌های الکترومغناطیسی در نواحی میدان نزدیک و میدان دور متفاوت می‌باشند [۱]. نرخ جذب ویژه^۱ (SAR)، که نرخ جذب انرژی در واحد زمان در واحد جرم بافت را نشان می‌دهد برای سنجش میزان پرتوگیری در میدان نزدیک در نظر گرفته می‌شود. از این پارامتر برای تعیین میزان پرتوگیری در میدان دور نیز استفاده می‌شود، اما به‌طور معمول پارامتر مورد استفاده برای تعیین میزان پرتوگیری در میدان دور چگالی توان است [۱].

۳- حدود مجاز پرتوگیری الکترومغناطیسی

کمیسسیون بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه‌های غیر یون‌ساز^۲ (ICNIRP) راهنمایی را برای محافظت مردم در مقابل آسیب‌های این اشعه‌ها ارائه داده است. در این راهنما، برای تعیین حدود مجاز تشعشع دو دسته‌بندی تعریف شده است. دسته نخست، حدود مجاز تشعشع برای کارکنان مشاغل است که در نزدیکی منابع تشعشعی فعالیت می‌کنند ولی از نحوه مراقبت از خود در مقابل این تشعشعات آگاهی دارند و همچنین در محیط شغلی آنها پروتکل‌های حفاظتی رعایت می‌گردد. دسته دوم، حدود مجاز تشعشع برای عموم مردم است که از نحوه حفاظت از خود در مقابل تشعشعات آگاهی ندارند و در واقع محیط برای آنها به نوعی کنترل نشده است. آگاهی نداشتن عموم مردم از نحوه مراقبت در برابر تشعشعات میدان‌های الکترومغناطیسی این نیاز را ایجاد می‌نماید تا حدود سختگیرانه‌تری برای این دسته (حدودی برابر یک پنجم حدود دسته مشاغل) وضع شود. در جدول (۱) محدودیت‌های اصلی تعریف شده برای SAR آمده است. در شکل‌های (۱) و (۲) سطوح مرجع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای متوسط زمان پرتوگیری مساوی یا بیشتر از ۶ دقیقه از میدان‌های الکترومغناطیسی از ۱۰۰ kHz تا ۳۰۰ GHz به

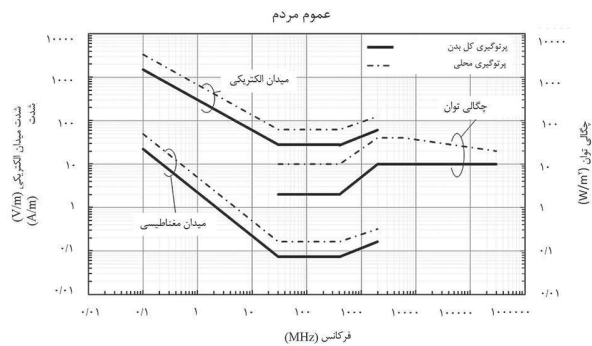
طی چند دهه گذشته سیستم‌های ارتباطات سیار پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند به‌طوری‌که نرخ داده از ۵۰ kbps در سیستم‌های نسل دوم (2G) تلفن همراه به ۱۰۰ Mbps در سیستم‌های فعلی 4G افزایش یافته است. با توجه به اینکه انتظار می‌رود سیستم‌های 5G نرخ داده را تا 10 Gbps افزایش دهند [۱] و [۲]، برای پشتیبانی از افزایش تقاضای کاربران موبایل، نیاز به استقرار و توسعه ایستگاه‌های پایه بیشتری می‌باشد. محبوبیت و همه‌گیر بودن وسایل ارتباطی موبایل و همچنین معرفی فناوری‌های جدیدی مانند اینترنت اشیا^۳ (IoT) و توسعه ناهمگون^۴ ایستگاه‌های پایه، میزان و سطح پرتوگیری افراد واقع در معرض تشعشعات الکترومغناطیسی را افزایش داده است. این مسأله نگرانی‌های زیادی را در زمینه اثرات احتمالی پرتوگیری الکترومغناطیسی از شبکه‌های موبایل بر سلامتی افراد ایجاد کرده است. بیشتر نگرانی‌ها درباره پرتوگیری الکترومغناطیسی ناشی از تشعشعات در لینک‌های فرسود^۵ (تشعشع از سمت ایستگاه پایه) است، در حالی که ممکن است انتشار تشعشعات الکترومغناطیسی در لینک‌های فراسو^۶ (تشعشع از سمت گوشی) به دلیل نزدیک‌تر بودن آنتن‌های دستگاه‌های کاربران به بدن انسان، مضرتر باشد. علاوه بر این، با تکامل فناوری تلفن‌های همراه به سمت دستگاه‌های هوشمند داده محور و رشد استفاده از چنین دستگاه‌هایی برای انجام امور روزمره زندگی، نگرانی‌ها افزایش می‌یابند.

در این مقاله، ابتدا، خلاصه‌ای بر پرتوگیری از میدان‌های الکترومغناطیسی در شبکه‌های تلفن همراه ارائه می‌شود. سپس، راه کارهای فنی قابل استفاده توسط اپراتورهای شبکه‌های تلفن همراه جهت کاهش پرتوگیری از شبکه معرفی می‌شوند. در انتها، راه کارهای فنی قابل پیاده‌سازی در تجهیزات کاربران به منظور کاهش سطح تشعشعات^۷ EMF مورد بررسی قرار می‌گیرند.

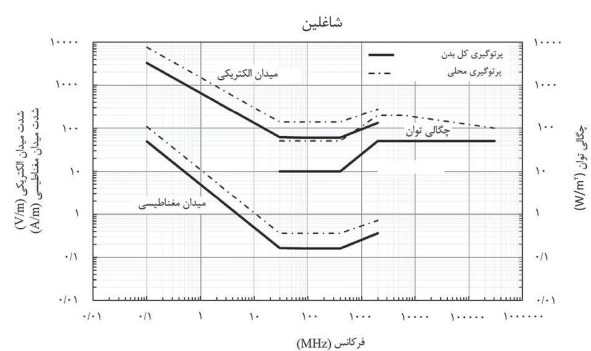
۲- محدوده طیف تشعشعات الکترومغناطیسی و معیارهای سنجش پرتوگیری

طیف الکترومغناطیسی میدان‌های فرکانس‌های پایین تا امواج نوری را در بر می‌گیرد. طیف^۸ RF از چند مگاهرتز تا چندین گیگاهرتز گسترش یافته است و برای همه‌پخشی^۹ و ارتباطات از راه دور استفاده می‌شود. سیستم‌های تلفن همراه 2G، 3G و 4G در فرکانس زیر ۶ گیگاهرتز و به طور خاص در محدوده فرکانسی از ۹۰۰ تا ۲۶۰۰ مگاهرتز کار می‌کنند. 5G علاوه بر باندهای فرکانسی ۶ گیگاهرتز، از باندهای فرکانسی موج میلی‌متری (۲۸ گیگاهرتز و بالاتر) نیز استفاده خواهد کرد.

انرژی جذب شده از تشعشعات الکترومغناطیسی در بدن انسان برهم کنش‌های پیچیده‌ای با بافت‌های مختلف دارد که متناسب



شکل ۲: سطوح مرجع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای متوسط زمان پرتوگیری مساوی یا بیشتر از ۶ دقیقه عموم مردم از میدان‌های الکترومغناطیسی از ۱۰۰ kHz تا ۳۰۰ GHz [۴].



شکل ۳: سطوح مرجع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای متوسط زمان پرتوگیری مساوی یا بیشتر از ۶ دقیقه شاغلین از میدان‌های الکترومغناطیسی از ۱۰۰ kHz تا ۳۰۰ GHz [۴].

ترتیب برای شاغلین و عموم مردم آمده است.

جدول ۱: محدودیت‌های اصلی SAR در راهنمای ICNIRP [۴].

مشاغل	عموم مردم	SAR
4/0	08/0	کل بدن (W/kg)
10	2	سر/پا (W/kg)
20	4	دست و پا (W/kg)

۴- عوامل موثر بر پرتوگیری الکترومغناطیسی در ارتباطات سیار

شبکه‌های تلفن همراه به طور معمول از تعدادی ایستگاه پایه^۱ (BS) تشکیل شده‌اند. منطقه‌ای که توسط هر BS سرویس داده می‌شود به عنوان یک سلول شناخته می‌شود که برد پوششی آن از چند متر تا چند کیلومتر متغیر است. سطح پوشش یک BS به آنتن مورد استفاده، توان ارسالی و تراکم ترافیک منطقه بستگی دارد. BS با دستگاه‌های تلفن همراه سلول خود به صورت بی سیم از طریق کانال RF ارتباط برقرار می‌کند. با افزایش تقاضای کاربران، به طور معمول شبکه توسعه یافته و BS‌های بیشتری اضافه می‌شوند. توپولوژی چنین شبکه‌ای، مانند نحوه قرارگیری BS‌ها، تعداد آنها و موقعیت مکانی کاربر می‌تواند بر میزان توان تشعشعی و در نتیجه، بر شدت پرتوگیری از EMF تاثیر بگذارد.

با توجه به اینکه تلفن‌های همراه به طور معمول بسیار نزدیک به بدن انسان کار می‌کنند (بدن در ناحیه میدان نزدیک آنها قرار می‌گیرد)، اما آنتن‌های BS در فاصله دورتر از بدن قرار دارند (بدن در ناحیه میدان دور آنها قرار می‌گیرد)، معیارهای SAR و چگالی توان به ترتیب برای مشخص نمودن میزان پرتوگیری الکترومغناطیسی در لینک‌های فراسو و فروسو در نظر گرفته می‌شوند [۵].

۵- راهکارهای فنی قابل انجام توسط اپراتورهای شبکه تلفن همراه برای کاهش سطح پرتوگیری EMF

از وظایف اپراتورها اندازه‌گیری مستمر میزان سطوح تشعشعات در شبکه تلفن همراه است تا مقدار آن از حدود مجاز تعریف شده توسط ICNIRP تجاوز نکند. در کنار آن، اپراتورها می‌توانند از

روش‌های فنی مختلفی جهت کاهش میزان پرتوگیری در شبکه کمک بگیرند که در این بخش به ارایه این راهکارهای فنی می‌پردازیم.

۵-۱- روش‌های کاهش میزان قرارگیری انسان در معرض تشعشع EMF در مجاورت ایستگاه‌های ارتباطات رادیویی از دیدگاه ITU
توصیه‌نامه ITU-TK.70 [۶] روش‌های کاهش میزان تشعشع را به منظور تطابق با سطوح استاندارد پرتوگیری بیان کرده است. راهکارهای اشاره شده در این توصیه‌نامه عبارتند از:

• کاهش توان فرستنده

ساده‌ترین روش برای کاهش سطوح تشعشع، کاهش توان فرستنده است. این روش منجر به کاهش ناحیه تحت پوشش شده و بهتر است تنها در شرایطی به کار گرفته شود که روش دیگری قابل اجرا نباشد.

• افزایش ارتفاع آنتن

با افزایش ارتفاع آنتن فاصله از تمامی نقاط تحت پوشش افزایش یافته و بنابراین سطح تشعشع در این نقاط کاهش می‌یابد. همچنین تغییر ارتفاع آنتن منجر به تغییر زوایای ارتفاعی آنتن و جابه‌جایی جهت تابش آن به مناطق دیگر می‌شود. بنابراین، پترن تشعشعی عمودی^{۱۱} (VRP) آن تغییر می‌یابد. این مساله باعث کاهش میزان تشعشع در منطقه تحت پوشش آن سلول می‌شود و تنها در صورتی قابل اعمال است که امکان افزایش ارتفاع آنتن وجود داشته باشد.

• تغییر زاویه شیب آنتن^{۱۲}

تغییر زاویه شیب پرتو اصلی در پترن تشعشعی عمودی آنتن‌های فرستنده به طور معمول برای محدود نمودن منطقه پوشش به کار می‌رود. این کار باعث افزایش انرژی در پرتو اصلی و همچنین تغییر سطح تشعشع در دیگر جهات (لوب‌های فرعی و نول‌ها در VRP آنتن فرستنده) می‌گردد.

• افزایش بهره آنتن

میزان بهره آنتن رابطه مستقیمی با میزان سمت‌گرایی^{۱۳} آنتن یعنی میزان توانایی تشعشع آن در یک جهت مطلوب و محدود ساختن تشعشع در باقی جهات دارد. بهره آنتن (به طور دقیق‌تر جهت‌دهی آنتن) با VRP و پترن تشعشعی افقی^{۱۴} (HRP) متناسب است. HRP آنتن فرستنده بر اساس نیازمندی‌های سرویس تعیین می‌شود. تغییرات در HRP آنتن فرستنده (به منظور حفاظت

انسان‌ها در برابر تشعشع) بر روی ناحیه تحت پوشش تاثیرگذار است. برای VRP آنتن فرستنده، بهره بالاتر منجر به باریک‌تر شدن عرض پرتو اصلی می‌شود.

• تغییرات در پترن تشعشعی عمودی

VRP تابعی از زاویه ارتفاع^{۱۵} است و میزان شدت میدان را با احتساب فاصله و زاویه تشعشع از محور اصلی تشعشع آنتن تعیین می‌کند. توجه خاصی می‌بایست به زوایای ارتفاعی بالای VRP صورت گیرد، چرا که این بخش تاثیر زیادی بر انتشار در جهت تابش به افراد دارد.

• تغییرات در پترن تشعشعی افقی

امکان کاهش سطح تشعشع از طریق اعمال تغییرات در HRP بسیار کم و محدود است. برای ایستگاه‌های پایه سلولی، کاهش سطح انتشار از طریق جایگزین نمودن پل‌هایی با پرتوی افقی پهن با نمونه‌هایی با پرتو افقی باریک‌تر، امکان‌پذیر است (این به معنای افزایش بهره می‌باشد). پنلی با بیم افقی باریک‌تر به توان ارسالی پایین‌تری نیاز دارد. به این ترتیب کاهش توان فرستنده منجر به کاهش سطح تشعشع در مناطق تحت پوشش می‌شود.

• به کارگیری هم‌زمان چند روش

برخی مواقع نیاز است که بیش از یک روش برای کاهش سطح تشعشع تا حد مطلوب اعمال گردد. تمامی روش‌های ذکر شده در بالا، مستقل بوده و در بسیاری مواقع به‌صورت هم‌زمان نیز قابل به‌کارگیری می‌باشند.

۵-۲- راه کارهای ارایه شده توسط اپراتورهای مطرح دنیا برای کاهش سطح پرتوگیری از شبکه تلفن همراه

• پروژه LEXNET

در سال ۲۰۱۲، تعدادی از اپراتور تلفن همراه اروپایی، فروشندگان تجهیزات شبکه، مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌ها با هدف کاهش سطح پرتوگیری از میدان‌های EMF در شبکه‌های بی‌سیم، پروژه‌ای تحت عنوان LEXNET را راه‌اندازی کردند. هدف این پروژه توسعه مکانیزم‌های مؤثر بر کاهش ۵۰٪ پرتوگیری EMF برای عموم مردم بدون ایجاد مشکل در کیفیت خدمات (QoS)^{۱۶} در شبکه بود [۷]. در این پروژه شاخص‌های تأثیرگذار بر انتخاب روش‌هایی به منظور کاهش سطح تشعشع BS و استراتژی‌های کلی در خصوص آن‌ها ارایه شده است. بهینه‌سازی EMF در شبکه شامل جمع‌آوری داده‌ها، ارزیابی پرتوگیری و انجام اقدامات لازم برای کاهش پرتوگیری است. ابزارهای موجود برای کاهش پرتوگیری شامل تغییرات توپولوژی، تکنیک‌های مدیریت شبکه و به‌کار بردن مؤلفه‌های رادیویی^{۱۷} با EMF کم می‌باشد. خلاصه‌ای از راه کارهای ارایه شده در این پروژه به شرح زیر است:

- اصلی‌ترین استراتژی اپراتور برای کاهش EMF مربوط به انتخاب فناوری دسترسی مورد استفاده می‌باشد. در این روش، فن‌آوری‌های دسترسی موجود در مجاورت UE^{۱۸} مورد شناسایی قرار می‌گیرند و بهترین دسترسی بین دسترسی‌های مبتنی بر 3GPP و غیر 3GPP (WiFi) از نقطه نظر کاهش EMF و بر اساس محتوای کاربر انتخاب می‌شوند.

- تخلیه بار^{۱۹} به سلول‌های کوچک‌تر مانند شبکه‌های فمتو (و یا میکرو یا پیکو)^{۲۰} یا شبکه‌های غیر 3GPP مانند WiFi می‌تواند به کاهش سطح پرتوگیری کمک کند.

- اپراتور می‌تواند از ابزار برنامه‌ریزی پیکربندی خودکار^{۲۱} شبکه برای شناسایی بهترین پیکربندی به منظور کاهش پرتوگیری

در یک منطقه خاص استفاده کند و با توجه به ساعت‌های مختلف روز، بار و استراتژی‌ها، اولویت‌ها و سیاست‌های مختلفی را در شبکه اعمال کند.

- استقرار شبکه ناهمگون یعنی استقرار سلول‌های کوچک در کنار سلول‌های ماکرو، به‌عنوان یک عامل اصلی برای کاهش میزان پرتوگیری عمل می‌کند.

- استفاده از آنتن‌هایی با طراحی و الگوی تابشی مناسب در شبکه اپراتور می‌تواند نقشی اساسی در کاهش پرتوگیری داشته باشد. - استفاده از مکانیسم‌های خواب و بیداری برای BS که با استفاده از آن‌ها ضمن حفظ QoS کاربر، از پرتوگیری EMF بی‌مورد جلوگیری می‌شود.

- استفاده از تکنیک‌های تخصیص منابع رادیویی در شبکه (با تمرکز ویژه بر کنترل توان و زمان‌بندی کاربر)، تاثیر قابل توجهی در کاهش پرتوگیری EMF کاربر دارند.

- حذف سرویس صوتی 2G و تخصیص منابع آن به سرویس صوتی 3G می‌تواند سطح پرتوگیری EMF را تا میزان ۳ برابر کاهش دهد. فناوری VoLTE نیز به‌عنوان سناریو ارزشمند دیگری برای این منظور مطرح است.

• پروژه MONICEM

پروژه تحقیقاتی MONICEM [۸] در سال ۲۰۱۱ در خصوص فعالیت‌های پایش و کنترل میدان‌های الکترومغناطیسی در محدوده فرکانس رادیویی در ایتالیا انجام شده و در آن روش‌هایی برای کمینه‌سازی سطوح انتشار EMF، با حفظ QoS، ارایه شده است. در این پروژه نیز همانند پروژه LEXNET بر تاثیر مشخصه‌های آنتن، استفاده از سلول‌های میکرو و پیکو، به کارگیری الگوریتم‌های تعدیل شدت سیگنال، کنترل توان فرستنده و به اشتراک‌گذاری منابع رادیویی برای کاهش سطح پرتوگیری از شبکه تلفن همراه تأکید شده است. خلاصه سایر راه کارهای ارایه شده در پروژه MONICEM به شرح زیر است:

- تصویب محدودیت برای استقرار سایت‌های جدید: تعیین کمترین فاصله از مکان‌های حساس و بررسی میزان افزایش شدت میدان تشعشعی^{۲۲} (شکل ۳).

- جایگزینی تجهیزات منسوخ شده: جایگزینی تجهیزات منسوخ شده با سیستم‌های فناوری جدید که تشعشعات الکترومغناطیسی کمتری را برای همان سرویس تضمین شده فراهم می‌کند.

- فعالیت‌های نظارتی: نظارت سیستمی بر روی توان در محدوده تحت تشعشع باید به‌طور دقیق انجام شود و در صورت تشخیص سطوح تشعشعی بیش از حد مجاز، توان محدود یا ایستگاه پایه جمع‌آوری شود.



شکل ۳: رعایت محدودیت کمترین فاصله از مکان‌های حساس برای استقرار سایت‌های جدید.

۵-۳- بررسی سایر راه کارهای فنی به منظور طراحی و مدیریت شبکه تلفن همراه تحت قیود EMF

• ابزار محاسبه پرتوگیری و بهینه سازی توان در شبکه در [۹] یک ابزار طراحی شبکه ارائه شده است که محاسبه پرتوگیری و بهینه سازی را در شبکه های بی سیم داخل ساختمان را که پوشش آنها توسط نقاط دسترسی Wi-Fi و فمتوسلول های LTE/WiFi تامین می شود، انجام می دهد. استفاده از این روش منجر به کاهش ۳ تا ۶ برابری سطوح EMF نسبت به پیاده سازی های سنتی سلول ها در ساختمان مورد نظر می شود.

• آنتن های توزیع شده^{۲۴} (DAS)

سیستم های DAS شامل چندین آنتن می باشند که به منظور بهبود پوشش شبکه به صورت جدا از یکدیگر (از نظر مکانی) پیاده سازی شده اند، ولی همگی به یک BS یکسان در سلول متصل هستند. توزیع جداگانه فضایی آنتن ها در یک منطقه می تواند باعث کاهش محوشدگی مقیاس بزرگ^{۲۵}، بهبود ظرفیت و کاهش فاصله دسترسی گردد. با توجه به این که توان ارسالی آنتن DAS کمتر از BS ماکرو معمولی است، سطح تشعشع EMF کاهش می یابد [۱].

• شبکه های ناهمگون^{۲۶} (HetNets)

HetNet متشکل از گره های کم توان یا ایستگاه های رله ای است که برای بهبود پوشش و افزایش ظرفیت در مناطق بسیار متراکم شبکه با میزان تقاضای داده بالاتر، بر روی ماکروسلول قرار داده شده اند. گره های کم توان مورد استفاده در HetNet بیشتر پیکوسلول ها، فمتوسلول ها و ایستگاه های رله هستند. با توجه به فاصله کم بین سلول های کوچک کم توان و کاربران تلفن همراه، پتانسیل قابل توجهی برای کاهش توان انتقال در هر دو جهت فراسو و فروسو وجود دارد [۱].

• شکل دهی پرتو^{۲۷}

روش آنتن هوشمند/تطبیقی و استفاده از آرایه های آنتنی برای شکل دهی پرتو برای ارسال/دریافت به سمت کاربر تلفن همراه، با تمرکز پرتوهای آنتن در جهت مورد نظر، تداخل در شبکه و تشعشعات EM را در جهات نامطلوب کاهش می دهد (شکل ۴). همچنین این روش منجر به بهبود SINR و کاهش توان ارسالی می شود زیرا بیشتر انرژی سیگنال در یک جهت خاص متمرکز شده است و در نتیجه از میزان تشعشعات EM در سایر جهات کاسته می شود [۱] و [۱۰].

• MIMO انبوه^{۲۸}

در MIMO انبوه تعداد زیادی (صدها) آنتن کوچک در BS قرار می گیرند که نسبت به BS های کنونی، تعداد آنتن های آن بسیار بیشتر است. اما، با توجه به توان کمتر هر یک از این آنتن های کوچک، در هر منبع فرکانس-زمانی، به تعداد کاربران کمتری سرویس دهی می شود. این امر علاوه بر بهبود کارایی طیفی، بازده انرژی و کاهش توان انتقالی، منجر به کاهش میزان تشعشع EM در شبکه می شود [۱] و [۱۰].

• مجازی سازی

مجازی سازی استفاده از الگوهای نرم افزاری متناسب با طیف وسیع توابع مختلف شبکه است. تعریف بلوک های مجازی در معماری سلولی شبکه های 5G امکان استفاده از بخش های سخت افزاری مشترک را در بین اپراتورها فراهم می سازد. این ویژگی برای مناطق شهری بسیار قابل توجه است چرا که ممکن است در

داخل هر سایت امکان نصب BS های جدیدی نباشد. این راه کار، منجر به کاهش زیادی در سطح EMF می شود، چرا که به دلیل استفاده از سخت افزار مشترک، تعداد آنتن های فرستنده کاهش می یابد [۱] و [۱۰].

• محاسبات لبه ای^{۲۹} (MEC)

ایده MEC که در شبکه های 5G پیاده سازی می شود در واقع نزدیک کردن منابع محاسبات ابری^{۳۰} به کاربر نهایی با استفاده از قابلیت های محاسباتی موجود در سایت BS است. اپراتور با مدیریت درست محتوای ذخیره شده در پلتفرم های MEC کیفیت تجربه^{۳۱} (QoE) کاربران را بهینه می کند که همین امر منجر به کاهش انتقال داده در محیط و در نتیجه کاهش سطوح EMF می شود. با این وجود، این وضعیت بستگی به نوع سرویسی دارد که توسط MEC ارائه می شود که برای مثال می تواند سرویسی با نرخ داده بالا مانند سرویس های واقعیت افزوده^{۳۲} و ویدئوهای با کیفیت بسیار بالا^{۳۳} باشد. یکی دیگر از امکانات MEC، ارتباط دستگاه به دستگاه^{۳۴} (D2D) است که می تواند توسط کاربران انجام شود. این ویژگی کاهش تبادل داده بین BS و UE را به همراه دارد و احتمالاً باعث کاهش میزان سطوح EMF تولید شده توسط BS می شود [۱] و [۱۰].

• تخلیه شبکه های 2G/3G

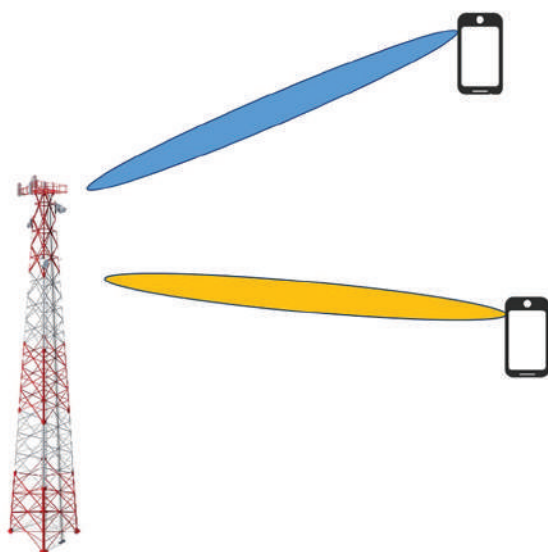
با استقرار شبکه های 5G می توان شبکه را از فناوری های 3G/2G موجود تخلیه نمود. این امر منجر به کاهش تعداد منابع تشعشع کننده و در نتیجه کاهش سطوح EMF در شبکه می شود [۱].

• استفاده از سطوح بازتابنده هوشمند^{۳۵} (IRS)

IRS به عنوان پراکنده ساز هوشمند پسیو و قابل کنترل عمل می کنند و می توانند کانال بی سیم را با بازتاب امواج به جهت های مطلوب بهبود بخشند (شکل ۵). این سطوح پسیو هستند و بنابراین تعداد منابع RF را افزایش نمی دهند [۱].

• روش تخلیه بار به Li-Fi^{۳۶}

یک تکنیک جدید برای تخلیه بار، انتقال ترافیک کاربر از سلول های ماکرو یا سلول های کوچک به سلول های Li-Fi است.



شکل ۴: شکل دهی پرتو ایستگاه پایه به سمت کاربران تلفن همراه.

Li-Fi یک سیستم شبکه‌ای کامل است که از لحاظ مفهومی شبیه Wi-Fi است، اما در باند فرکانس نور مرئی کار می‌کند، برخلاف Wi-Fi از باندهای RF استفاده می‌کند. در حالی که تخلیه بار از طریق Wi-Fi و سلول‌های کوچک، هیچ‌گونه امواج RF اضافی برای تخلیه بار داده در Li-Fi لازم نیست، در نتیجه این روش باعث کاهش EMF می‌شود.

۶- راه‌کارهای فنی قابل پیاده‌سازی در تجهیزات کاربران تلفن همراه به منظور کاهش سطح تشعشعات EMF

با رشد فناوری و استفاده چند کاربردی از گوشی تلفن همراه (از دوربین جیبی گرفته تا پخش کننده موسیقی، رادیو و تلویزیون قابل حمل و یک لپ‌تاپ کوچک با نرم‌افزارهای کاربردی فراوان) و بنابراین انتقال داده‌های ترافیکی با کیفیت بالا، نیاز به ایجاد آنتن‌های پیشرفته‌تری برای پشتیبانی از فرکانس‌های مختلف در کنار نیاز به تغییر شکل و اندازه گوشی‌های تلفن همراه احساس شد. از این رو، روش‌های جدید انتقال از جمله MIMO به کار گرفته شدند. این روش‌ها با کاهش میزان سیگنال به نویز لازم در گیرنده و انتقال داده با گذردهی مناسب، باعث کاهش توان مورد نیاز در مسیر فراسو شده و در نتیجه توان تشعشعی از گوشی تلفن همراه را کاهش می‌دهند (در سطح بیشینه ۲۵۰ میلی وات و در شرایط عادی بیرون ساختمان در حدود ۱۰۰ میلی وات و کمتر). در محیط داخل ساختمان، به دلیل تلفات بیشتر در مسیر بین گوشی تلفن همراه و ایستگاه پایه، توان ارسالی فراسوی بیشتری مورد نیاز است. به این ترتیب میزان پرتوگیری به‌طور مستقیم از محیطی که کاربر در آن واقع شده است، تاثیر می‌پذیرد. نکات بالا این مفهوم را می‌رساند که آنتن‌ها می‌بایست هوشمندانه‌تر طراحی شوند و همچنین روش‌های انتقال داده می‌بایست نسبت به کانال و شرایط آن آگاه‌تر بوده تا بتوانند میزان پرتوگیری را کاهش دهند. عواملی که بر سطح و توزیع SAR ناشی از یک دستگاه کاربر تاثیر می‌گذارند، زیاد و متنوع هستند که از آن جمله می‌توان به طراحی دستگاه، پروفایل زمانی توان دستگاه، موقعیت و جهت‌گیری دستگاه نسبت به کاربر و مشخصات بدن کاربر اشاره کرد [۱۲].

طراحی UE آگاه از SAR از روش‌هایی است که می‌تواند سطح پرتوگیری کاربر را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. این نوع از طراحی از زمان ظهور ارتباطات سلولی مورد توجه بوده است. تکنیک‌های کاهش پرتوگیری اولیه به دلیل وجود منحصر به فرد ارتباطات صوتی، تنها بر قسمت سر بدن متمرکز بوده‌اند. اما،

با توجه به این که گوشی‌های کنونی برای کاربردهای مختلفی (مانند تماس صوتی، تماس تصویری و ارسال پیام کوتاه) استفاده می‌شوند، لازم است که متناسب با کاربرد گوشی سطح SAR ناشی از آن کاهش یابد.

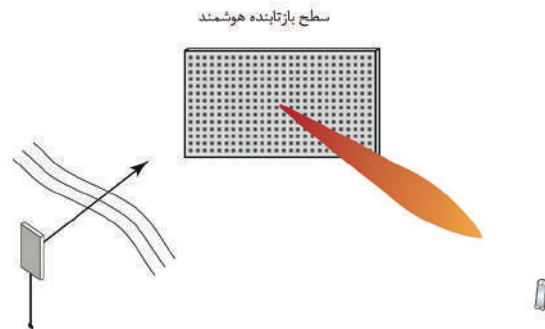
استفاده از شیلدهای فیزیکی، استفاده از مواد متامترال^{۳۷} و استفاده از تشعشع‌کننده‌های پارازیتی^{۳۸} از جمله روش‌های اصلی قابل پیاده‌سازی در تجهیزات کاربر به منظور کاهش سطح پرتوگیری می‌باشند. تکنیک‌های طراحی دیگری که به منظور کاهش SAR در تجهیزات کاربران 5G قابل پیاده‌سازی می‌باشند عبارتند از [۱۱]:

- **تنظیم الگو تشعشعی UE برای کاهش میزان پرتوگیری**
طراحی آرایه آنتن برای تجهیزات کاربران 5G با توجه به نوع استفاده کاربران (مانند تماس صوتی، تماس تصویری و ارسال پیام کوتاه) انجام می‌شود. در این روش، مجموعه‌ای از حسگرها بر روی گوشی‌های هوشمند به منظور درک موقعیت UE و جهت آن مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. سپس، اختلاف فاز بین المان‌های آنتن برای هدایت و کاهش پرتوگیری بخشی از بدن که با توجه به نوع کاربرد UE در معرض تشعشعات قرار گرفته است، طراحی می‌شود. این تکنیک در 5G بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا همان‌طور که پیشتر اشاره شد، با توجه به کاربرد UE برای مجموعه‌ای از سرویس‌های متنوع، پرتوگیری در بخش‌های مختلف بدن و همچنین سطوح EMF متفاوتی ایجاد می‌شود.

- **یکپارچه‌سازی آرایه‌های آنتنی با عملکرد دوگانه**
در طراحی آگاه از SAR برای آنتن موج میلی‌متری آرایه‌ای با عملکرد دو گانه، بهبود بیشتری در کاهش پرتوگیری صورت می‌پذیرد. منظور از عملکرد دوگانه استفاده از دو زیر آرایه متمایز است که در بخش‌های مختلف UE قرار می‌گیرند و در نتیجه الگوهای مختلف پرتوگیری را ایجاد می‌کنند. زیر آرایه نخست در پوشش عقب قرار می‌گیرد و فقط در صورت استفاده کاربر از خدمات صوتی فعال می‌شود. از طرف دیگر، زیر آرایه دوم در فریم بالایی قرار می‌گیرد و فقط در صورتی که کاربر از سرویس‌های ویدیویی یا متنی استفاده کند، فعال می‌شود. با فعال‌سازی متناوب دو آرایه (بر اساس نوع سرویس‌های استفاده شده توسط کاربر)، بیشینه SAR برابر با 0.88 W/kg به دست می‌آید [۱۳] که در مقایسه با سایر راه‌کارهای بررسی شده (که هیچ زیر آرایه جداگانه‌ای به کار نمی‌گیرند)، مقدار بسیار کمتری می‌باشد. توجه به این نکته لازم است که به کارگیری گسترده رویکرد پیشنهادی در دستگاه‌های تجاری، به دلیل کمبود جا در گوشی و وجود اینترفیس‌های بی‌سیم متعدد مستقر در آن همچنان یک مسأله باز و چالشی می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی روش‌های قابل به کارگیری توسط اپراتورها و سازندگان تجهیزات بخش کاربر به منظور کاهش سطح پرتوگیری از تشعشعات شبکه تلفن همراه پرداختیم. در بخش شبکه روش‌های مختلفی از جمله سیستم DAS، شکل‌دهی پرتو، موج میلی‌متری، الگوریتم‌های مدیریت منابع و ابزار طراحی شبکه معرفی شده‌اند. همچنین در بخش تجهیزات کاربر نیز روش‌های مختلفی ارایه شدند که از آن جمله می‌توان به ساخت آنتن‌ها با میزان SAR پایین با تغییر دادن شکل آن‌ها، استفاده از آنتن‌های آگاه از محتوا، موج میلی‌متری و غیره اشاره کرد. پیاده‌سازی این روش‌ها از سوی اپراتورها و سازندگان تجهیزات می‌تواند نقش مؤثری در کاهش



شکل ۵: عملکرد سطوح بازتابنده هوشمند.

مراجع

پی‌نوشت‌ها

- [1] M. A. Imran, F. Hélot and Y. A. Sambo, Low, Electromagnetic Emission Wireless Network Technologies 5 G and beyond, IET, 2019.
- [2] Mobile Phone Use and Brain Tumour Risk: Early Warnings Early Actions. European Environmental Agency; 2013. Available at: <http://www.eea.europa.eu/publications/latelessons-2>
- [3] Ervin B. Podgorsak, Radiation Physics for Medical Physicists, Springer, 2010.
- [4] ICNIRP Guidelines on Limiting Exposure to Electromagnetic Fields are for the protection of humans exposed to radiofrequency electromagnetic fields (RF) in the range 100 kHz to 300 GHz, 2020.
- [5] H. Abdulla and R. E. Badra, "Head Exposure to Cellular Telephones: A System-Level Study", in Proc. IEEE Latin-American Conference on Commun. (LATINCOM), Bogota, Colombia, Sept. 2010.
- [6] ITU-T K.70: Mitigation techniques to limit human exposure to EMFs in the vicinity of radiocommunication stations, 2018, available at: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=K>.
- [7] <http://www.lexnet.fr/> "Monitoring and control of radio frequency electromagnetic fields", Higher Institute for Environmental Protection and Research Physical Agents Service, 2011. Available at: <https://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00010200/10204-r134-monicecmweb.pdf>.
- [8] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, and L. Martens, "Exposure optimization in indoor wireless networks by heuristic network planning," Progress In Electromagnetics Research, vol. 139, pp. 445–478, 2013.
- [9] Luca Chiaraviglio et al. "Planning 5G Networks under EMF Constraints: State of the Art and Vision," IEEE Access, vol. 6, pp. 51021–51037, Sep. 2018.
- [10] L. Chiaraviglio, A. Elzanaty, and M.-S. Alouini, "Health Risks Associated with 5G Exposure: A View from the Communications Engineering Perspective, Chiaraviglio, Available at: <https://arxiv.org/abs/2006.00944>.
- [11] K Suppl. 13: Radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels from mobile and portable devices during different conditions of use, 2018, available at: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=K>.
- [12] J. Bang and J. Choi, "A SAR Reduced MM-Wave Beam-Steerable Array Antenna with Dual-Mode Operation for Fully Metal-Covered 5G Cellular Handsets," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 6, pp. 1118-1122, 2018.

- 1 Internet of Things
- 2 heterogeneous
- 3 Downlinks
- 4 Uplinks
- 5 Electromagnetic fields
- 6 Radio Frequency
- 7 Broadcasting
- 8 Specific Absorption Rate
- 9 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
- 10 Base Station
- 11 Vertical Radiation Pattern
- 12 tilt
- 13 directivity
- 14 Horizontal Radiation Pattern
- 15 Elevation angle
- 16 Quality of Service
- 17 radio components
- 18 User Equipment
- 19 offloading

۲۰ اندازه سلول بر اساس توان ارسالی BS، ارتفاع و مشخصات آنتن، ساختار و ویژگی‌های منطقه تحت پوشش، نوع سرویس و شرایط ترافیکی تعیین می‌شود. هرچه بار ترافیکی بر روی سلول بیشتر باشد، سلول کوچک‌تر می‌شود. شعاع پوشش میکروسلول‌ها در حدود ۲ کیلومتر، پیکوسلول‌ها چند صد متر و فمتوسلول‌ها چند ده متر می‌باشد. میکروسلول‌ها اغلب برای افزایش میزان ظرفیت شبکه در مناطقی با چگالی جمعیت بالا نصب می‌شوند. پیکوسلول‌ها معمولاً برای پوشش‌دهی پاساژها، ادارات، قطارها یا هواپیماها استفاده می‌شوند. فمتوسلول‌ها در داخل خانه‌ها نصب می‌شوند و سیگنال‌دهی خوبی را برای محیط داخل ساختمان فراهم می‌کنند. سطوح توان میکروسلول‌ها چند وات، پیکوسلول‌ها تا ۲ وات، و فمتوسلول‌ها تا ۲۰۰ میلی‌وات می‌باشد.

- 21 Auto Configuration Planning
- 22 حداقل فاصله نصب سایت برای مکان‌های حساس (به عنوان مثال مدارس، مهدهای کودک و بیمارستان‌ها) باید در نظر گرفته شود تا سایت مستقر شده در فواصلی کمتر از حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر قرار نگیرد و از سوی دیگر ایستگاه پایه جدید افزایش میدانی بیش از ۰.۵ تا ۰.۶ ولت بر متر را ایجاد نکند.
- 23 Distributed Antenna System
- 24 Distributed Antenna System
- 25 large scale shadowing
- 26 Heterogeneous networks
- 27 Beamforming
- 28 Massive MIMO
- 29 Mobile Edge Computing
- 30 Cloud Computing
- 31 Quality of Experience
- 32 Augmented reality
- 33 very high definition videos
- 34 Device-to-Device
- 35 Intelligent Reflecting Surface (IRS)
- 36 light-fidelity



مقاله علمی-مروری

یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال توان در دسترس بخش دوم: روش‌های پویا

مصطفی عیدانی، دانشیار، دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران، eidiani@khorasan.ac.ir

چکیده

پس از مطالعه مفاهیم ATC و روش‌های تعیین ATC ایستا، در این مقاله، روش‌های تعیین ATC پویا جمع‌آوری شده است. در این مقاله، تلاش محققان برای ارائه روش‌های نوین در تعیین DATC سیستم‌های قدرت گردآوری شده و شایستگی‌ها و ضعف‌های این روش‌ها برجسته شده‌اند. عدم اطمینان در محاسبات ATC مورد بحث قرار گرفته است و روش‌های مهم پایداری گذرا و پایداری ولتاژ در تعیین DATC بررسی شده‌اند. در انتهای مقاله، نقاط قوت و ضعف تمام روش‌های تعیین DATC مشخص شده است تا بتوان در آینده، روش‌های سریع‌تر و دقیق‌تری ارائه داد.

کلمات کلیدی: قابلیت انتقال توان در دسترس، توانایی انتقال توان، پایداری ولتاژ، پایداری گذرا، روش‌های پویا

Past findings and future directions of available transfer capability, part two: dynamic methods

■ Mostafa Eidiani, Associate Professor, Faculty of Engineering, Khorasan Institute of Higher Education, eidiani@khorasan.ac.ir

Abstract

After reading the ATC concepts and static ATC procedures, In this paper, the methods for determining Dynamic ATC (DATC) are collected. In this paper, researchers, efforts to provide new methods for determining DATC power systems have been compiled and the merits and weaknesses of these methods are highlighted. Uncertainty in ATC calculations is discussed and important methods of transient stability and voltage stability have been investigated in DATC determination. At the end of the paper, the strengths and weaknesses of all methods for determining DATC are specified. In order to be able to provide faster and more precise methods in the future.

Keywords: ATC, DATC, Transient stability, Voltage stability, Dynamic methods

۱- مقدمه

از دیرباز یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین مسائل در بهره‌برداری از سیستم قدرت، محاسبه توانایی انتقال توان در دسترس (ATC) بوده است. در سیستم‌های جدید نیز اجبار به محاسبه و ارسال ATC در هر ساعت، اهمیت محاسبه آن را دو چندان کرده است. روش‌های محاسبه ATC به دو دسته کلی استاتیک (ایستا) و دینامیک (پویا) تقسیم می‌شوند. برای درک بهتر این مقاله بهتر است ابتدا مفاهیم اولیه ATC و روش‌های تعیین ATC ایستا مطالعه شود. در روش‌های پویا، از مدل‌های دینامیکی و استاتیکی اجزاء سیستم قدرت به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود. پایداری گذرا و پایداری ولتاژ از مهم‌ترین محدودیت‌های غیرخطی و دینامیک در محاسبه DATC می‌باشند [۱].

در بخش دوم مقاله، ابتدا روش‌های تعیین DATC کلاسیک بررسی می‌شوند. در بخش سوم، اثرات اضافه شدن منابع تجدیدپذیر در تعیین DATC بررسی شده است. در بخش چهارم، مزایا و معایب روش‌های دینامیک نسبت به استاتیک مشخص شده است و در انتها، آینده روش‌های تعیین DATC آورده شده است و بالاخره در پیوست، روش‌های پایداری گذرا و پایداری ولتاژ مورد استفاده در DATC مرور شده‌اند.

۲- روش‌های پویای کلاسیک

محاسبه ATC با مدل‌های دینامیکی و محدودیت‌های دینامیکی، DATC (ATC دینامیک یا پویا) گفته می‌شود. مراجع قدیمی به‌طور مستقیم به دنبال محاسبه DATC نبودند. بعضی از آن‌ها، اثر در نظر گرفتن دینامیک‌ها را بر روی بیشینه بارگذاری سیستم (MAT) بررسی کرده‌اند و یا با در نظر گرفتن دینامیک‌ها، سعی در افزایش انتقال توان کرده‌اند [۲-۵] که در این مقاله بررسی نمی‌شوند. در این مقاله، فقط مراجعی که به‌طور مستقیم به مفهوم DATC پرداختند؛ بررسی شده است.

به‌طور کلی، معادلات DATC به‌صورت یک بهینه‌سازی غیرخطی با ترکیبی از محدودیت‌های معادلات جبری و دیفرانسیل (DAE^۲)، مانند معادله (۱) تا (۴) تشکیل شده‌اند:

(۱) حداقل کردن تابع هدف
به شرط اینکه:

- (۲) معادله جبری مساوی $h(x,y)=0$
(۳) معادله جبری نامساوی $g(x,y) < 0$
(۴) معادله دیفرانسیل $\dot{x} = F(x,y)$

که معادله (۲) معادلات پخش بار، معادله (۳)، محدودیت‌های ولتاژ باس‌ها، بارگذاری و ... و معادله (۴)، معادله دینامیکی شبکه و بارها تعریف می‌شوند. همان‌طور که می‌دانید حل مسائلی که ترکیبی از معادلات جبری و معادلات دیفرانسیل هستند؛ بسیار سخت است. راه‌حل پیشنهادی در [۶]، تبدیل معادلات استاتیکی به دینامیکی است. نشان داده شده است معادلات ODE^۴ سریع‌تر از معادلات DAE حل می‌شوند و پاسخ یکسانی نیز دارند و تبدیل ODE به DAE نیز مانند معادله (۵) انجام می‌شود و مقدار (ε) بسیار کوچک فرض می‌شود:

$$\varepsilon \dot{x} = h(x,y) \quad (5)$$

شلوتر در سال ۱۹۹۲ [۷]، روشی ارائه داد که در آن با در نظر گرفتن

حد پایداری گذرا، تعداد زیادی از پیشامدها، دسته‌بندی و غربال شده‌اند. انتگرال‌گیری دقیق و مدل دقیق ژنراتورها از مزایای این روش به‌شمار می‌آید ولی در نظر نگرفتن اثر غیرخطی بارها در تعیین پایداری گذرا، ضعف این روش می‌باشد. این روش برای سیستم‌های متوسط و بزرگ نیز امتحان شده است.

پاولا و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۸]، مقاله‌ای تحت عنوان «ماکزیمم مقدار توان قابل انتقال با در نظر گرفتن حد پایداری گذرا» ارائه داد. در این مرجع بر اساس تجربه، تعداد زیادی از پیشامدها، مشخص و طبقه‌بندی شده و بعضی از آن‌ها، به دلیل کم اهمیت بودن حذف می‌شوند. خطرناک‌ترین پیشامدها در نقطه کار محاسبه شده و برای حالت ATC استفاده می‌شوند. در این مرجع بر اساس پاسخ نهایی، برای پایدار شدن سیستم، یک الگوی تولید جدید ارائه می‌دهد. روش ارائه شده، از ایده روش یک ژنراتور-باس بی‌نهایت استفاده کرده است و بر روی شبکه سیستم قدرت جنوب به جنوب غربی برزیل، امتحان شده است. طبقه‌بندی پیشامدها بر اساس زمان قطع بحرانی انجام می‌شود و حذف پیشامدهای کم خطر، با استفاده از دو فیلتر انجام می‌شود. فیلتر نخست با استفاده از مدل ساده برای ژنراتورها در سیستم قدرت، خطاهایی با زمان قطع بحرانی بیشتر از ۳۰۰ میلی‌ثانیه را حذف می‌کند. فیلتر دوم با در نظر گرفتن جزئیات بیشتر در مدل سیستم قدرت، خطاهایی با زمان قطع بحرانی بیشتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه را حذف می‌کند. خطاهای باقیمانده به عنوان خطرناک‌ترین خطاها در نظر گرفته می‌شوند و برای تعیین ATC مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت این روش، سرعت بالا و در نظر گرفتن حد دینامیکی پایداری گذرا و حدود استاتیک است و عیب آن استفاده از رتبه‌بندی پیشامدها در حالت پایه برای تعیین ATC، در نظر نگرفتن اثر ولتاژ باس‌ها، حذف اثر بار و استفاده از تقریب یک ژنراتور-باس بی‌نهایت می‌باشد.

در بعضی از مراجع به دنبال تعیین بیش‌ترین توانایی بارگذاری [۹] و یا تعیین رفتار سیستم با در نظر گرفتن حد دینامیکی پایداری ولتاژ بوده‌اند [۱۰]. در این نوع مراجع، معادلات دینامیکی سیستم در حوزه زمان و با استفاده از روش‌های انتگرال‌گیری عددی و روش‌های تحلیل پخش بار حل می‌شود. به‌طور معمول مدت مطالعه چندین دقیقه است. سختی معادلات دیفرانسیل سیستم در این حالت، به مراتب بیشتر از مدل‌های پایداری گذرا است. در نظر گرفتن امکاناتی برای تغییر خودکار گام زمانی در انتگرال‌گیری عددی با جلوگیری از رفتن پاسخ و از بین رفتن گذراهای سریع، به‌طور چشمگیری کارایی محاسباتی چنین روش‌هایی را افزایش داده است.

در سال ۱۳۸۱، عیدانی و همکاران [۱۱]، FCTTC را به‌صورت دینامیک محاسبه کرده‌اند. هم در تعیین پایداری ولتاژ و هم در تعیین پایداری گذرا از روش‌های جدید استفاده شده است. اختلاف انرژی بین نقطه تعادل پایدار و ناپایدار به‌عنوان شاخصی برای هر دو پایداری استفاده شده است. اشکال این روش، زمان زیاد محاسبات برای تعیین نقاط تعادل ناپایدار می‌باشد.

در سال ۲۰۰۲، عیدانی و همکاران [۱۲]، DATC را با دو روش جدید در تعیین پایداری گذرا تحت عنوان POMP^۵ و CTSA^۶ محاسبه کردند. نشان داده شده است که روش ارائه شده بسیار

سریع است و دقت کافی نیز دارد.

عیدیانی و همکاران در سال ۱۳۸۲ [۱۳]، DATC را با محدودیت‌های حد پایداری ولتاژ و حد پایداری گذرا محاسبه کردند. پایداری ولتاژ را از روش جدید تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین [۱۴] و پایداری گذرا را با کمک روش POMP محاسبه کرده‌اند. سرعت و دقت روش برای یک شبکه ۱۴۵ باس نیز قابل قبول بوده است.

در سال ۲۰۰۴ زینگبو، ATC دینامیک را با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ، حد حرارتی، پایداری گذرا و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم محاسبه کرده است [۱۵]. در سال ۲۰۰۷ نیز جونجی، یک مقاله جالب و مهم ارائه داد. در این مقاله ATC دینامیک با در نظر گرفتن حدود استاتیک و دینامیک با پخش بار بهینه برای یک سیستم ۱۰ ژنراتور محاسبه شده است. مشکل این روش در این است که سرعت آن کم است. در این مقاله اتصال کوتاه‌های نامتقارن نیز در نظر گرفته شده است همچنین از ژنراتور زدایی برای افزایش TTC و بهبود پایداری گذرا استفاده شده است. همچنین از روش نقطه داخلی برای حل برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شده است [۱۶].

در سال ۲۰۰۶، عیدیانی و همکاران [۶]، یک روش جدید در تعیین DATC به نام FADTC ارائه دادند که در این روش از پایداری گذرا و پایداری ولتاژ به‌طور همزمان استفاده شده است. روش پایداری ولتاژ از تقریب دترمینان ماتریس ژاکوبین و برای پایداری ولتاژ و از روش POMP برای تعیین پایداری گذرا به روش انرژی استفاده شده است. توانایی این روش بر روی شبکه‌های ۳۰ تا ۱۴۵ باس امتحان شده است.

ونکیاه ابتدا در سال ۲۰۰۸ [۱۷]، DATC را با کمک روش سطح مرزی انرژی پتانسیل (PEBS^۷) محاسبه کرد و با دو روش شبکه عصبی مقایسه نمود و نشان داد که روش ارائه شده، سرعت و دقت مناسبی دارد سپس در سال ۲۰۱۰ [۱۸]، روش PEBS را با سه روش، نحوه یادگیری پس انتشار خطا (BPA^۸)، روش تابع پایه شعاعی (RBF^۹) و روش استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS^{۱۰}) مقایسه کرده است در این مقاله نشان داده شده است روش ANFIS بیشترین سرعت و کمترین خطا را دارد ولی زمان آموزش آن زیاد است.

در سال ۲۰۰۸ یانگ، TTC بین چند ناحیه در چین با خطوط ۱۰۰۰kV را محاسبه کرد. استفاده از پایداری ولتاژ و پایداری گذرا در تعیین TTC و مقایسه روش دقیق با مدل سازی مرکز اینرسی COI، از نکات مهم این مقاله است روش تقریبی، جواب TTC کمتری را نشان می‌دهد از این‌رو جواب محافظه کارانه است. ابتدا از پایداری ولتاژ (با استفاده از CPF) و سپس از پایداری گذرا استفاده کرده است. گام‌های افزایش توان ثابت است [۱۹]. همچنین در [۲۰]، محاسبه TTC دینامیک با در نظر گرفتن پایداری گذرا با استفاده از الگوریتم‌های حل موازی بررسی شده و نشان داده شده است که این روش از روش‌های قبلی پاسخ دقیق‌تری ارائه می‌کند.

شیرینواسان، روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR^{۱۱}) را در سال ۲۰۱۳ [۲۱] و ۲۰۱۵ [۲۲] برای تعیین DATC ارائه داده است. از روش متداول PEBS برای تعیین پایداری گذرا استفاده کرده

است و از این اطلاعات برای تعیین الگوهای مختلف بار در SVR استفاده کرده است. این روش برای قراردادهای یک‌جانبه و چندجانبه استفاده شده و با روش شبکه عصبی چند لایه (MLPNN^{۱۲}) مقایسه شده است و در انتها نشان داده شده است روش SVR از روش MLPNN سریع‌تر و دقیق‌تر است.

در سال ۱۳۹۲، عیدیانی و همکاران پس از انجام پروژه تعیین ATC در شبکه خراسان با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های استاتیکی و دینامیکی، نتایج این پروژه را در یک مقاله ارائه دادند [۲۳] که در آن DTAC شبکه خراسان در سال مطالعه ۹۵ را با مدل دقیق دکل‌ها، رله‌ها، پخش بار بهینه، پایداری گذرا، پایداری ولتاژ، بررسی پیشامدهای یک حادثه‌ای، اتصال کوتاه و حالت‌های مختلف ورود واحدهای جدید به شبکه، محاسبه کرده‌اند. در نظر گرفتن تمامی ملاحظات دینامیکی و استاتیکی در یک شبکه واقعی، نقطه قوت این مقاله بوده است.

در سال ۲۰۱۷، اگنس و همکاران [۲۴] از روش SVR برای تعیین DATC استفاده کردند. فقط برای تنظیم پارامترهای SVR از الگوریتم تکاملی تفاضلی (DEA^{۱۳}) استفاده کردند. در این مقاله هم نشان داده شده است که روش SVR نتایج بهتری نسبت به روش‌های شبکه عصبی ارائه می‌دهد.

بالاخره در سال ۲۰۱۸، شبان [۲۵]، دوباره به تحلیل غیرخطی معادلات ریاضی برگشته است و با یک تقریب درجه دو، نقطه تعادل ناپایدار کنترل کننده (CUEP^{۱۴}) را تعیین کرده و با کمک آن، حد پایداری گذرا را محاسبه کرده است و سپس با در نظر گرفتن محدودیت‌های ولتاژ و تولید، روش خود را بر روی یک شبکه کوچک امتحان کرده است.

همان‌طور که از روند مقاله‌های تعیین DATC پیدا است روش‌های هوشمند، پایه‌های روش‌های کلاسیک در تعیین ATC پیش می‌روند ولی زمان آموزش و نحوه کار با روش‌های هوشمند، هنوز جزء نقاط ضعف این روش‌ها به‌شمار می‌آید.

۳- روش‌های پویا با وجود عدم قطعیت

نفوذ منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت در تمام دنیا در حال گسترش است و منابع تجدیدپذیر به دلیل استفاده از انرژی باد و خورشید به دلیل شرایط آب و هوایی، با عدم اطمینان همراه هستند. همچنین بارهای سیستم نیز به دلیل تغییرات آب و هوایی، عدم اطمینان بیشتری دارند. از این‌رو محاسبات سیستم به جای روش‌های قطعی و معمولی، به سمت روش‌های احتمالی پیش می‌رود و به عنوان مثال به جای پخش بار معمولی، باید از پخش بار احتمالی [۲۶] استفاده کرد. بعضی از روش‌های تعیین ATC از روش مونت کارلو [۲۷] و بعضی از مراجع از روش هرمن-بتا [۲۶] استفاده کردند. البته از روش‌های قطعی برای کاربردهای آنلاین استفاده می‌شود که در مقایسه با روش‌های احتمالی، سریع‌تر و ساده‌تر اجرا می‌شوند ولی از آنجا که شبکه واقعی دارای عدم قطعیت می‌باشد پاسخ روش قطعی با واقعیت اختلاف دارد. محدودیت روش‌های احتمالی، زمان محاسبات و مقدار زیاد اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی دقیق ATC است که باید در آینده این مشکلات برطرف شوند.

یکی دیگر از اثرات اضافه شدن نیروگاه‌های بادی به شبکه در

هنگام تعیین ATC، پیچیده‌تر شدن قابلیت اطمینان سیستم با وجود عدم قطعیت در تولید بادی است. برای نخستین بار، DATC با وجود تمام محدودیت‌های استاتیکی، اضافه بار، اضافه و کاهش ولتاژ، پایداری گذرا و قابلیت اطمینان برای یک شبکه واقعی در [۲۸] انجام شده است. مدل دقیق شبکه، توربین بادی و مدل دقیق باد و اضافه شدن ۵ مزرعه بادی ۵۰۰ مگاواتی، از نقاط قوت این مراجع هستند.

در مقاله [۲۹] ATC دینامیک با وجود نیروگاه بادی و عدم قطعیت در سرعت باد محاسبه شده است. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مشکل عدم قطعیت سرعت باد حل شده است. پایداری ولتاژ دینامیکی یعنی نقطه انشعاب Hopf به عنوان محدودیتی برای محاسبه DATC در نظر گرفته شده و برای به دست آوردن نقطه پایداری دقیق ولتاژ دینامیکی برای ارزیابی DATC، از الگوریتم (DFA^{۱۶}) استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه نیوانگلند ۳۹ باسه و هند جنوبی ۱۸۱ باسه، آزمایش و اعتبارسنجی شده است.

۴- مزایا و معایب روش‌های تعیین DATC

۴-۱- مزایا

مزایای روش‌های پویا نسبت به روش‌های ایستا را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- امکان مطالعه جزئیات پاسخ سیستم،
- امکان آزمودن اقدامات چاره‌ساز برای بهبود کارایی سیستم،
- امکان در نظر گرفتن وابستگی بار به ولتاژ و فرکانس،
- در نظر گرفتن تغییرات بزرگ، جواب دقیق‌تر.

۴-۲- معایب

در بعضی از روش‌های تعیین DATC، اتفاقات خطرناک^{۱۶} (مضر)، در نقطه کار محاسبه می‌شوند [۸]. برای محاسبه ATC احتیاج به تغییر نقطه کار داریم یعنی در یک نقطه، تولید و در نقطه دیگر مصرف افزایش می‌یابد تا به حد ایستا و یا پویا برسیم. در روش‌هایی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ از همان دسته‌بندی و غربالی که در نقطه کار به دست آمده است؛ برای بررسی ATC استفاده می‌شود و بدیهی است که چون نقطه کار تغییر کرده است؛ دسته‌بندی و غربال پیشامدها نیز تغییر می‌کند و از آنجاکه امکان بررسی و حفظ تمام پیشامدها در سیستم واقعی وجود ندارد؛ به‌طور معمول خطرناک‌ترین پیشامدها حفظ شده و بقیه حذف می‌شوند. از این‌رو امکان از دست دادن خطرناک‌ترین خطا در ازای تغییر نقطه کار وجود دارد.

همچنین در بعضی از روش‌های ارایه شده، پایداری گذرا و پایداری ولتاژ جداگانه بررسی می‌شوند. به عبارت دیگر فرض شده است که در زمان بررسی پایداری گذرا، ولتاژ تغییر نمی‌کند که باعث ایجاد خطا می‌شود و بالاخره، به دلیل پیچیده شدن مساله و در نظر گرفتن حدود پویا، زمان رسیدن به جواب - نسبت به روش ایستا - زیادتر شده است.

۵- آینده روش‌های تعیین DATC

علاوه بر افزایش دقت و سرعت در تعیین پاسخ DATC در روش‌های آینده، موارد زیر نیز باید مدنظر قرار بگیرد:

- DATC باید به صورت آنلاین و در لحظه انجام شود.
- در تعیین DATC باید تجزیه و تحلیل اقتصادی ناشی از قراردادهای بین نواحی نیز گنجانده شود.
- در آینده، سیستم قدرت بدون منابع پراکنده وجود ندارد بنابراین استفاده از روش‌های احتمالاتی برای تعیین DTAC باید گسترش یابد.
- مدیریت داده برای افزایش کارایی روش‌های هوشمند لازم دارد.
- در آینده تمام سیستم‌های متمرکز جای خود را به سیستم‌های غیرمتمرکز می‌دهند و کنترل و مدیریت کنونی انرژی برای سیستم‌های غیرمتمرکز مناسب نیست و از این‌رو روش‌های تعیین ATC باید خود را برای این سیستم تغییر دهند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نشان داده شد که تعداد کمی از روش‌های تعیین ATC از روش‌های احتمالی استفاده کرده‌اند. بعضی از روش‌های دینامیکی از روش‌های استاتیکی به عنوان شروع محاسبات استفاده کردند. روش‌های استاتیکی به دلیل سرعت بالا برای شرایط آنلاین مناسب هستند ولی این روش‌ها عموماً دقت بالایی ندارند. همچنین نشان داده شد که اضافه شدن منابع انرژی تجدیدپذیر در آینده تمام شبکه وجود داشته و به الگوریتم‌های قوی برای تعیین ATC در این شبکه‌ها، نیاز جدی وجود دارد.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Dynamic ATC
- 2 Maximum Allowable Transfer
- 3 Differential-Algebraic Equation
- 4 Ordinary Differential Equations
- 5 Point Of Maximum Potential
- 6 Complex Transient Stability Analysis
- 7 Potential Energy Boundary Surface
- 8 Back Propagation Algorithm
- 9 Radial Basis Function
- 10 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
- 11 Support vector regression
- 12 Multilayer Perceptron Neural Network
- 13 Differential Evolution Algorithm
- 14 Controlling Unstable Equilibrium Point
- 15 Dragon Fly Algorithm
- 16 Dangerous Contingencies
- 17 Controlling UEP
- 18 Davidon-Flechel-Povell
- 19 Boundary Controlling UEP
- 20 Second Kick

مراجع

- [1] Olatunji Obalolu, Mohammed, Mohd Wazir Mustafa, Daw Saleh Sasi Mohammed, Abdulrahman Okino Otuoze, "Available transfer capability calculation methods: A comprehensive review", International Transactions on Electrical Energy Systems, pp: 1-24, Feb. 2019.
- [2] Choi, S.H.; Larkin, R., "Steady State Stability of a Remote Gas-Turbine Generating Station: Field Tests and Validation of Computer Simulation Results", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, ISSUE: 4, pp. 1518-1524, Nov. 1993.
- [3] Kramer, R.A., "Analytic and Operational Consideration of

- [17] Kumar, DV, Venkaiah, C., "Dynamic Available Transfer Capability (DATC) computation using intelligent techniques", *Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on*, 2008: 1- 6: IEEE.
- [18] Venkaiah, C, Kumar, D, Murali, K., "Dynamic ATC computation for real-time power markets", *J Electr Eng Technol*. 2010; 5(2): 209- 219. <https://doi.org/10.5370/JEET.2010.5.2.209>
- [19] Yang, H., Wen, J., Jiang, L., Cheng, S., "The influence of the UHV transmission line to the TTCs between provincial power grids in CCG", DRPT2008 6-9 April 2008 Nanjing China, pp.1412-1415, 2008.
- [20] Guo, Z.J., Shi, L.B., Yao, Z. X., "Distributed parallel computing architecture design philosophy for TTC evaluation with transient stability constraints", DRPT2008 6-9 April 2008 Nanjing China, pp.1412-1415, 2008.
- [21] Srinivasan, A, Ramkumar, N, Dineshkumar, B, Venkatesh, P. "Support vector regression based dynamic available transfer capability in deregulated power market", *Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, pp.68- 73, 2013.
- [22] Srinivasan, A, Venkatesh, P, Dineshkumar, B, Ramkumar, N., "Dynamic available transfer capability determination in power system restructuring environment using support vector regression", *Int J Electr Power Energy Syst*. 2015; 69: 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.01.001>
- [۲۳] عیدانی، مصطفی، یزدان پناه، داریوش، علمی، مهدی، "تعیین ATC شبکه خراسان با در نظر گرفتن محدودیت‌های استاتیکی و دینامیکی"، بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق، 1503-PSS-PSC، آبان ۱۳۹۲.
- [24] Velusamy, AIS, Ramu, NB, Durairaj, D, Murugesan, K., "Differential evolutionary algorithm-based optimal support vector machine for online dynamic available transfer capability estimation incorporating transmission capacity margins". *Int Trans Electr Energy Sys.*, 27(7), 2017.
- [25] Shaaban, M., "Behavior of Power System Equilibrium Points in Dynamic Available Transfer Capability Calculation," *Journal of Applied Science & Process Engineering*, Vol,5 . No.2018 ,1 .
- [۲۶] عیدانی، مصطفی، باغی‌شنی، وحید، عاملی، کاظم، "پخش بار احتمالی شبکه توزیع و انتقال با وجود عدم قطعیت به روش هرمن-بتا"، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق، 98-F-PSS-0312، آذر ۱۳۸۷.
- [27] Rodrigues, AB, Da Silva, MG., "Probabilistic assessment of available transfer capability based on Monte Carlo method with sequential simulation". *IEEE Trans Power Syst*. 2007; 22(1): 484- 492. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.887958>
- [۲۸] عیدانی، مصطفی، یزدان پناه، داریوش، صدر، محسن، "تعیین ATC شبکه خراسان پس از به مدار آمدن ۵۷۵ مگاوات مزرعه بادی جدید خواف در شبکه خراسان"، سی‌امین کنفرانس بین‌المللی برق، 15-2041-F-PSS، 1394.
- [29] Karuppasampandian M, Jeyanthi PA, Devaraj D, Selvi VAI, "Day ahead dynamic available transfer capability evaluation incorporating probabilistic transmission capacity margins in presence of wind generators", *Int Trans Electr Energy Syst.*, pp:1-21, doi.org/10.1002/2050-7038.12693, 2020
- Electric System Reliability", Reliability and Maintainability Symposium 1991 Proceeding IEEE, pp.57-63, 1991.
- [4] Povh, D.; Mihalic, R., "Enhancement of Transient Stability on AC Transmission by Means of Controlled Series and Parallel Compensation", *IEE AC and DC Power Transmission*, pp.8-12, 1991.
- [5] Sauer, P.W.; Evans, R.J.; Pai, M.A., "Maximum Unconstrained Loadability of Power Systems", *Proceedings 1990 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 90 CH 2868-8, New Orleans, LA, pp. 1818-1821, May 1-3, 1990.
- [6] Eidiani, M, Shانهچی، MHM., "FAD-ATC: a new method for computing dynamic ATC", *Int J Electr Power Energy Syst*. 2006; 28(2): 109- 118. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2005.11.004>
- [7] Schluter, R.A.; Costi, A., "Multiple Contingency Selection for Transmission Reliable and Transfer Capability Studies", *Electrical Machines and Power System*, Vol. 20, N0. 3, pp. 223-237, May/Jun 1992.
- [8] Bettiol, A.L.; Wehenkel, L.; Pavella, M., "Transient Stability Constrained Maximum Allowable Transfer", *IEEE Transactions On Power System*, Vol. 14, No. 2, May 1999.
- [9] Sauer, P.W.; Lesieutre, B.C.; Pai, M.A., "Maximum Loadability and Voltage Stability in Power Systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 145-154, 1993.
- [10] Stubbe, M.; Bihin, A.; Deuse, J.; Baader, J.C., "STAG- A New Unified Software Program for the Study of Dynamic Behavior of Electric Power Systems", *IEEE Transactions Vol. PWRS-4*, No. 1, pp. 129-138, 1989.
- [۱۱] عیدانی، مصطفی؛ مدیر شانه‌چی، محمدحسن؛ واحدی، ابراهیم، "تعیین FCTTC با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ و پایداری گذرا به روش انرژی"، دهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، تبریز، مجموعه مقالات قدرت، صص ۸۶-۹۴، اردیبهشت ۱۳۸۱.
- [12] Eidiani, M., "ATC Evaluation by CTSA and POMP, Two New Methods for Direct Analysis of Transient Stability", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference 2002*, Paper No. 5104, Vol. 3, pp. 1524-1529, Asia Pacific, Oct. 6-10, Yokohama ,Japan.
- [۱۳] عیدانی، مصطفی؛ مدیر شانه‌چی، محمدحسن؛ واحدی، ابراهیم، "یک روش سریع برای محاسبه ATC با در نظر گرفتن پایداری گذرا و پایداری ولتاژ"، هجدهمین کنفرانس بین‌المللی برق ایران، مجموعه مقالات ۱، صص ۲۵۵-۲۶۸، ۱۳۸۲.
- [۱۴] عیدانی، مصطفی؛ مدیر شانه‌چی، محمدحسن؛ واحدی، ابراهیم، "روش سریع و دقیق برای تعیین ATC با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ"، مجله علمی برق، دوره ۳۵، ۱۳۸۱.
- [15] Xingbin, Yu, Singh, C., "Probabilistic analysis of total transfer capability considering security constraints", 8th international conference on probabilistic methods applied to power systems, pp. 242-247, Sep. 2004.
- [16] Kubokawa, J, Yuan, Y., Yorino, N., Zoka, Y., Sasaki, Y., Hakim, L., "A solution of total transfer capability using transient stability constrained optimal power flow", *IEEE Lausanne Power Tech*, pp.2018-2022, July 2007.

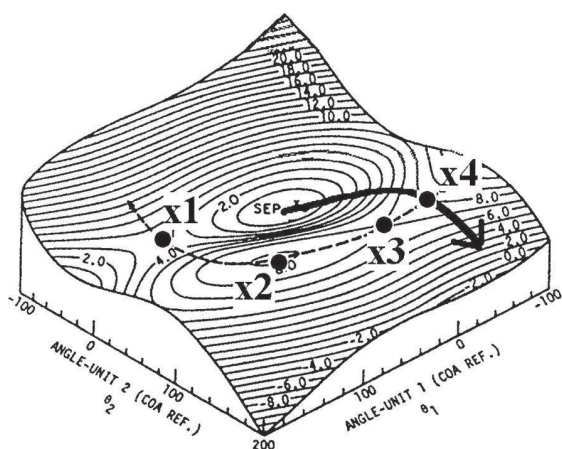
- Ranking for Voltage Stability Analysis of Power Systems", IEEE Transactions on PWRs, pp. 350-356, Feb. 1995.
- [46] Chiang, H.D.; Jean-Jumeau, R., "Toward a Practical Performance Index for Predicting Voltage Collapse in Electric Power Systems", IEEE Transactions On Power System, Vol. 10, No. 2, pp. 584-590, May 1995.
- [47] Canizares; C. A. and Alvarado; F. L., "Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems", IEEE Transactions Power System, Vol. 8, No. 1, pp. 1-8, Feb. 1993.

پیوست ۱: روش‌های پایداری گذرای استفاده شده در محاسبات DATC

در این بخش به‌طور خلاصه، روش‌های پایداری گذرا که در تعیین DATC مورد استفاده قرار گرفته است مرور می‌شوند. هدف اصلی در تمام این روش‌ها، پیدا کردن جواب معادله دیفرانسیل غیرخطی می‌باشد. در بررسی پایداری گذرا احتیاج به سرعت و دقت کافی داریم که فقط بعضی از این روش‌ها از این نظر مطلوب می‌باشند که در این قسمت به‌طور خلاصه گردآوری شده‌اند [۳۰].

پ ۱-۱- نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده^{۱۸}

اگر از مسیر سیستم خطادار انتگرال‌گیری شود بالاخره این مسیر از مرز پایداری سیستم بعد از خطا خواهد گذشت. شکل (پ-۱) را در نظر بگیرید. در هنگام عبور از مرز، مسیر سیستم خطادار از نزدیکی نقطه تعادل ناپایدار عبور می‌کند. به این نقطه تعادل، نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده می‌گوییم (X_۳ در شکل پ-۱). انرژی پتانسیل در این نقطه تعادل به‌عنوان انرژی بحرانی در نظر گرفته می‌شود و به‌طور معمول از انرژی بحرانی نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار (X_۱ در شکل پ-۱) بیشتر است. این موضوع بدان معنی است که ناحیه پایداری سیستم بزرگ‌تر شده و جواب دارای تقریب بهتری می‌باشد. اگر بتوان این نقطه تعادل را مشخص کرد؛ با استفاده از آن می‌توان انرژی بحرانی و در نتیجه زمان قطع بحرانی را به‌دست آورد. این روش توسط اتای و همکاران در سال ۱۹۷۹ پیشنهاد شده است [۳۱]. برای حل این روش به روش‌های تکراری مانند DFP^{۱۸} و گوس تصحیح شده نیاز است که



شکل (پ-۱): سطوح هم انرژی (خط پر) و PEBS (خط چین) برای یک سیستم سه ماشینی [۳۴]

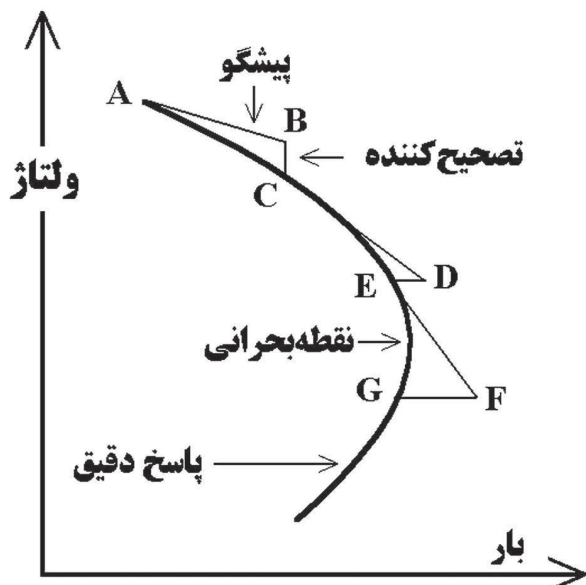
- [۳۰] عیدانی، مصطفی، «مروری بر روش‌های تشخیص ایمنی سیستم قدرت»، فصل‌نامه علمی-ترویجی عصر برق، انجمن برق و الکترونیک ایران، شاخه خراسان، سال پنجم، شماره ۱۰، صفحه: ۴۸-۵۲، پاییز ۱۳۹۷.
- [31] Athay, T.; Sherkey, V.R.; Podmore, R.; Virmani, S., "Transient Energy Stability Analysis", Conference on System Eng. for Power Emergency Operating State Control Section IV, Davos, Switzerland, 1979.
- [32] Chiang, H.D.; Wu, F. F.; and Varaiya, P. P., "A BCU Method for Direct Analyze of Power System TSA", IEEE Transactions on Power System, Vol. 9, No. 3, pp. 1194-1208, Aug. 1994.
- [33] Kundur, P.Sh., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1996.
- [34] Athay, T.; Podmore, R. and Virmani, S., "A Practical Method for Direct Analysis of Transient Stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No. 2, pp. 584-588, March/April, 1979.
- [35] Kakimoto, N.; Ohsawa, Y. and Hayashi, M., "Transient Stability Analysis of Electric Power System Via Lure Type Lyapunov Function", Part I and II, Transactions IEE of Japan, Vol. 98, No. 5, May/June, 1978.
- [36] Mansour, Y. and Vaahedi, E., Chang, A.Y., Corns, B.R., Garrett, B.W., Bemaree, K., Atahy, T., Cheung, K., "B.C. Hydro's On-line Transient Stability Assessment Model Development Analysis and Post-processing", IEEE Transactions on Power Sys, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995.
- [37] Taylor, C.W., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1996.
- [38] Ajarapu, V.; Lee, B., "Bibliography on Voltage Stability", IEEE Transactions on Power System, Vol. 13, No. 1, pp.115-125, Feb. 1998.
- [39] Flatabo, N., Ognedal, R., Carlsen, T., "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by sensitivity Methods", *IEEE Transactions, Vol. PWRs-5*, No. 4, pp. 1286-1293, Nov. 1990.
- [40] Gao, B., Morison, G.K., Kundur, P., "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", *IEEE Transactions, Vol. PWRs-7*, No. 4, pp. 1529-1542, Nov. 1992.
- [41] DeMarco, C.L.; Overbye, T.J., "An Energy Based Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power System, Vol. 5, No. 2, pp. 419-426, May 1990.
- [42] Overbye, T.J.; DeMarco, C.L., "Improved Techniques for Power System Voltage Stability Assessment Using Energy Methods", IEEE Transactions on Power System, Vol. 6, No. 4, pp. 1446-1452, Nov. 1991.
- [43] Overbye, T.J.; DeMarco, C.L., "Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivity", IEEE Transactions on Power System, Vol. 6, No. 3, pp. 1196-1202, Aug. 1991.
- [44] Overbye, T.J.; Dobson, I.; DeMarco, C.L., "Q-V Curve Interpretations of Energy Measures for Voltage Security", IEEE Transactions on Power System, Vol. 9, No. 4, pp. 331-340, Feb. 1994.
- [45] Ejebe, G.C., "Methods for Contingency Screening and

پیوست ۲: روش‌های پایداری ولتاژ استفاده‌شده در محاسبات DATC

از آنجا که حد پایداری ولتاژ از معمول‌ترین حدود در تعیین ATC می‌باشد؛ در این بخش به‌طور خلاصه روش‌های تعیین پایداری ولتاژ دسته‌بندی شده‌اند [۳۳ و ۳۷].

پایداری ولتاژ به توانایی سیستم قدرت در حفظ ولتاژهای سیستم در وضعیت عادی و بعد از وارد شدن خطا گفته می‌شود. سیستم هنگامی وارد حالت ناپایداری ولتاژ می‌شود که بروز اغتشاش، افزایش در بار مورد نیاز و یا تغییر در موقعیت سیستم، موجب کاهش غیر قابل کنترل ولتاژ گردد. عامل اصلی ناپایداری، ناتوانی سیستم قدرت در مواجهه با تقاضا برای توان موهومی می‌باشد. پایداری ولتاژ را می‌توان به دو دسته پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ و اغتشاش کوچک تقسیم کرد. پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ، توانایی سیستم را در کنترل ولتاژ، به‌دنبال بروز یک خطای بزرگ، از قبیل خطاهای سیستم، از دست دادن بار و یا از دست دادن تولید، در نظر می‌گیرد. این نوع پایداری را می‌توان به کمک شبیه‌سازی‌های غیرخطی در حوزه زمان مطالعه کرد. فقط باید در این معادلات، مدل‌های عناصری که نقش بسزایی بر پایداری ولتاژ دارند در نظر گرفت؛ از جمله تغییردهنده تپ ترانسفورماتور، تنظیم‌کننده‌های تغییر دهنده فاز، مدل‌های دقیق بار (وابستگی بار به ولتاژ و فرکانس)، کنترل‌کننده‌های توان موهومی و ... [۳۷ و ۳۳]. از آنجا که ساختار کلی مدل سیستم برای تحلیل پایداری ولتاژ دینامیکی و تحلیل پایداری گذرا یکسان است؛ از این‌رو در اینجا بیشتر بر روی روش‌های پایداری سیگنال کوچک بحث می‌شود.

پایداری ولتاژ اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک، توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به‌دنبال بروز خطاهای کوچک از قبیل تغییرات تدریجی بار می‌باشد. این شکل از پایداری را می‌توان با روش‌های حالت ماندگار که از خطی‌سازی معادلات دینامیکی سیستم در



شکل (پ-۲): یک توالی از روند محاسبات در تحلیل پخش بار تداومی [۳۳]

به‌دلیل استفاده از روش‌های همگرایی همیشه مشکل به جواب نرسیدن وجود دارد. برخی از این مشکلات را می‌توان با روش^{۱۹} BCU برطرف نمود که نقطه شروع بسیار بهتری را برای حل محاسبه می‌کند [۳۲]. روش BCU به ظاهر امیدوارکننده است اما آزمون‌های بیشتری برای تایید مشخصه دقت و همگرایی آن لازم است. مهم‌تر این که، باید مرز پایداری سیستم‌های قدرت، با مدل تفصیلی مورد بررسی قرار گیرد [۳۳].

پ-۱-۲- روش سطح مرزی انرژی پتانسیل PEBS

شکل (پ-۱) را در نظر بگیرید. در این شکل سطوح هم انرژی (خط پر) و PEBS، سطح مرزی انرژی پتانسیل (خط چین) برای یک سیستم سه ماشینه نشان داده شده است. PEBS صفحه‌ای است که بر سطوح هم انرژی عمود بوده و از نقاط تعادل ناپایدار می‌گذرد. به‌علاوه در طول جهتی که بر PEBS عمود می‌باشد انرژی پتانسیل به یک مقدار بیشینه محلی می‌رسد [۳۴]. روش PEBS توسط کاکي‌موتو و اتای گسترش یافته است که برای جزئیات بیشتر می‌توان به مراجع [۳۴-۳۵] مراجعه کرد. روش ارایه شده دارای سرعت زیاد و دقت کم می‌باشد.

پ-۱-۳- روش ترکیبی پایداری گذرا CTSA

با آن که روش PEBS اتای یکی از بهترین روش‌های محاسبه زمان قطع بحرانی است ولی این روش دارای دو اشکال عمده زیر می‌باشد: ابتدا سیستم بعد از خطا به‌طور مستقیم در محاسبه Vcr نقشی ندارد؛ دوم این که مسیر سیستم خطادار دو بار انتگرال‌گیری می‌شود. در روش CTSA سعی شده است که این نقایص برطرف شود [۱۲].

در روش CTSA، از این حقیقت که معیار PEBS در طول مسیر انتگرال‌گیری از سیستم خطادار، دارای یک مقدار کمینه کلی است استفاده شده است. به‌صورت تجربی و با شبیه‌سازی‌های فراوان، این نتیجه حاصل شده است که این نقطه به نقطه قطع خطای بحرانی نزدیک است. این حقیقت پایه این روش به‌شمار می‌رود. سرعت این روش از روش‌های ماریا و ضربه دوم بیشتر است چرا که از روش‌های تقریبی برای تعیین انرژی بحرانی استفاده شده است.

پ-۱-۴- روش POMP

این روش به دنبال نقطه بیشینه انرژی پتانسیل بر روی مسیر سیستم بعد از خطا می‌باشد که این نقطه با تقریب بسط تیلور مرتبه دوم محاسبه شده است. این روش بر روی سیستم‌های کوچک و متوسط امتحان شده است و سرعت و دقت آن بسیار بالا است [۱۲].

پ-۱-۵- روش ضربه دوم^{۲۰}

روش ضربه دوم مانند دو روش قبلی از چند گام مهم تشکیل شده است. در این روش در ازای یک خطا و زمان قطع مشخص، اگر مسیر سیستم بعد از خطا از مرز پایداری عبور کرد؛ نقطه عبور به‌عنوان انرژی بحرانی در نظر گرفته می‌شود و اگر مسیر سیستم بعد از خطا به مرز نرسد؛ از نقطه ماکزیمم انرژی پتانسیل، یک بار دیگر همان خطا تکرار می‌شود تا مسیر سیستم خطادار از مرز PEBS عبور کند. انرژی نقطه تماس به‌عنوان انرژی بحرانی در نظر گرفته می‌شود [۳۶]. استفاده از سیستم قبل و بعد از خطا و دقت کافی این روش، از مزایای آن به‌شمار می‌آید.

یک نقطه کار معلوم به دست آمده‌اند مطالعه کرد. در این بخش به طور خلاصه روش‌های تحلیل پایداری ولتاژ استفاده شده در ATC آورده شده است [۳۸].

پ ۲-۱- تحلیل حساسیت V-Q

اساس کار این روش بر تعیین رابطه بین تغییرات ولتاژ و تغییرات توان موهومی باس‌ها با استفاده از ماتریس ژاکوبین کاهش یافته است [۳۹]. شیب منحنی V-Q در نقطه کار، حساسیت V-Q را در یک باس نمایش می‌دهد. مقدار مثبت حساسیت، نشان‌دهنده عملکرد پایدار است و هر چه حساسیت کوچک‌تر باشد؛ سیستم پایدارتر خواهد بود. با کاهش حساسیت، دامنه حساسیت افزایش یافته و مقدار آن در حد پایداری نامحدود می‌شود. بر عکس، مقدار منفی حساسیت، نشان‌دهنده عملکرد ناپایدار سیستم است. مزیت این روش این است که اطلاعات مربوط به پایداری ولتاژ را مشخص می‌کند و ناحیه‌هایی که بالقوه مشکل دارند؛ به وضوح شناسایی می‌کند و عیب آن این است که به دلیل ماهیت غیرخطی روابط V-Q، دامنه حساسیت‌ها، معیار مستقیمی برای بیان درجه ناپایداری سیستم ارائه نمی‌دهد [۳۹]. ولی روش تحلیل مدال این مزیت اضافی را دارد که اطلاعاتی را نیز در خصوص مکانیزم ناپایداری به دست می‌دهد.

پ ۲-۲- تحلیل مدال V-Q

مشخصه‌های پایداری ولتاژ سیستم را می‌توان با محاسبه مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس ژاکوبین کاهش یافته شناسایی کرد. دامنه تغییرات مقادیر ویژه می‌تواند معیاری نسبی از نزدیکی به ناپایداری سیستم را ارائه دهد. گرچه مقادیر ویژه به علت غیرخطی بودن مساله، معیار مطلقی را ارائه نمی‌دهد ولی به کارگیری تحلیل مدال، به تعیین میزان پایداری سیستم و نیز تعیین مقدار بار اضافه یا سطح انتقال توانی که باید اضافه شود؛ کمک می‌کند. هنگامی که سیستم به نقطه بحرانی پایداری ولتاژ می‌رسد؛ تحلیل مدال در شناسایی نواحی بحرانی پایداری ولتاژ و عناصری که در هر مد مشارکت دارند مفید است [۴۰].

پ ۲-۳- پخش بار تداومی

همان‌طور که در شکل (پ-۲) نشان داده شده است؛ تحلیل پخش بار تداومی از یک فرآیند تکراری، شامل گام‌های پیشگو و تصحیح‌کننده استفاده می‌کند [۳۳]. با شروع از یک پاسخ اولیه معلوم (A)، پیشگوی مماسی برای تخمین پاسخ (B)، برای یک الگوی مشخص از افزایش بار، استفاده می‌شود. سپس با فرض ثابت بودن بار سیستم، گام تصحیح‌کننده، پاسخ دقیق (C) را با استفاده از تحلیل مرسوم پخش بار تعیین می‌کند. آنگاه بر اساس یک پیشگوی مماسی جدید، ولتاژها برای افزایش در بار، پیش‌بینی می‌شوند. اگر بار تخمینی جدید (D)، فراتر از بیشینه بار روی پاسخ دقیق باشد؛ دیگر گام تصحیح‌کننده با بارهای ثابت همگرا نخواهد شد؛ بنابراین، گام تصحیح‌کننده‌ای با ولتاژ ثابت در شین مورد نظر اعمال می‌گردد تا پاسخ دقیق (E) پیدا شود. با فرا رسیدن حد پایداری ولتاژ، برای تعیین دقیق بار بیشینه، باید به تدریج از اندازه افزایش بار در حین گام‌های پیشگویی متوالی کاست [۳۷ و ۳۱].

روش تداومی تحلیل پخش بار، مقاوم و انعطاف‌پذیر است. این روش برای حل مسائل پخش بار درگیر با مشکلات همگرایی بسیار

مناسب است ولی روشی بسیار کند و زمان‌بر است.

پ ۲-۴- روش‌های انرژی

اختلاف انرژی بین نقطه تعادل پایدار و ناپایدار به عنوان شاخص پایداری ولتاژ در مراجع [۴۱-۴۴] استفاده شده است. رابطه اختلاف انرژی را می‌توان با یک تابع انتگرالی مدل زد. در مقاله [۴۴]، تابع داخل انتگرال با یک معادله درجه ۲ تقریب زده شده است که اگر سیستم کم بار شود؛ دقت آن کاهش می‌یابد. از این رو باید تقریب بهتری برای آن پیدا کرد. با آن که روش تابع انرژی با تغییراتی که در آن داده شده، دارای دقت بیشتری شده است ولی مشکل یافتن نقطه تعادل ناپایدار همچنان باقی است و در سیستم‌های واقعی و بزرگ، این مساله به یک مشکل زمان‌بر تبدیل می‌شود و این روش، ارزش خود را از دست می‌دهد.

پ ۲-۵- شاخص فاصله اقلیدسی بین نقطه تعادل پایدار و نقطه

تعادل ناپایدار

فاصله نزدیک‌ترین نقطه تعادل ناپایدار از پایدار سیستم، معیاری از پایداری ولتاژ سیستم به شمار می‌آید. مهم‌ترین قسمت در این روش، چگونگی تعیین نقطه تعادل ناپایدار می‌باشد [۴۵]. دقت این روش کم است.

پ ۲-۶- شاخص تابع آزمایش

مهم‌ترین سوالی که این شاخص پاسخ می‌دهد این است: [۴۶] آیا سیستم می‌تواند با افزایش همزمان 70MW در باس ۲ و 50MVA در باس ۶ پایدار باقی بماند یا نه؟ شاخص بالا به دلیل ساختاری، قادر است به طور مستقیم در تعیین ATC ایست به کار رود. مقدار تابع آزمایش $t(X, \lambda)$ تعریف شده در [۴۶]، در نقطه بحرانی (حد پایداری ولتاژ) صفر است. پس از شبیه‌سازی‌های فراوان نتایج زیر حاصل شده است:

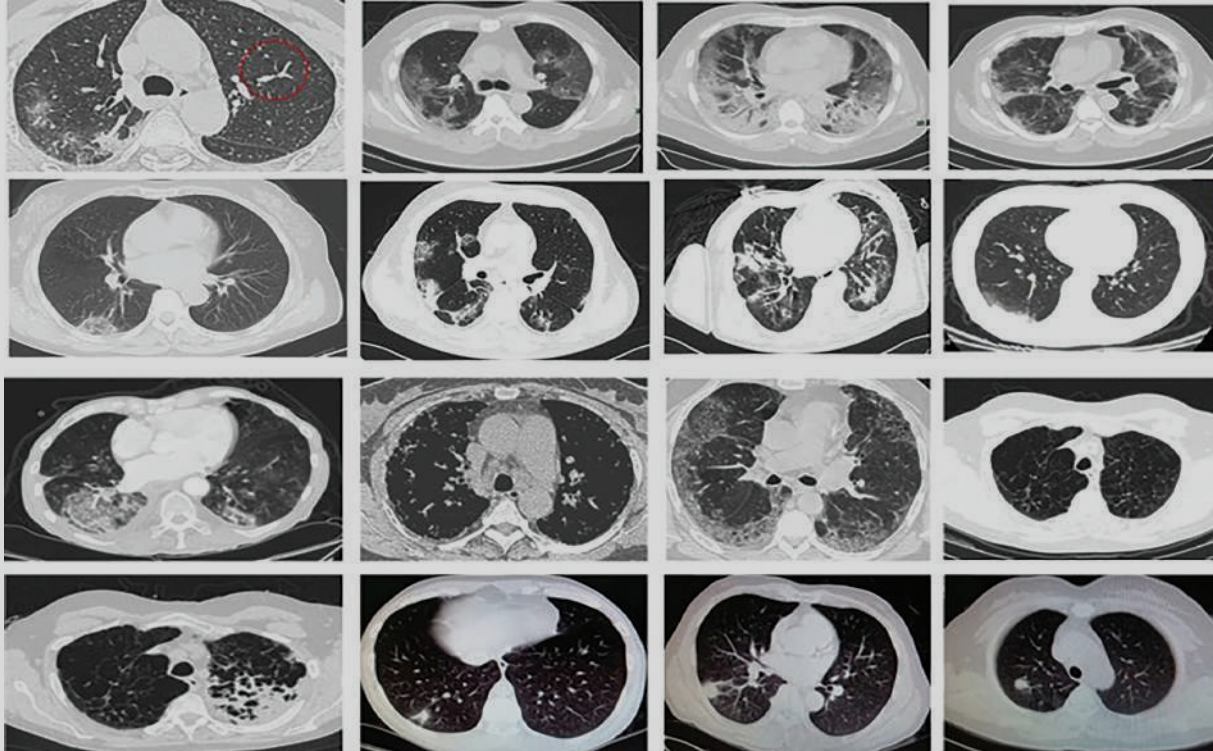
۱- رفتار تابع آزمایش شبیه یک معادله درجه ۲ است اگر توان حقیقی یا موهومی در یک باس تغییر کند.

۲- رفتار تابع آزمایش شبیه یک معادله درجه ۴ است اگر توان حقیقی و موهومی در چند باس تغییر کنند.

مزیت روش بالا سادگی و کمی محاسبات است. فقط احتیاج به جواب دو معادله پخش بار می‌باشد. روش بالا از تمام روش‌های دیگر مانند مقادیر ویژه، بردار ویژه، تابع انرژی و شرایط عددی قوی‌تر است [۴۶]. این روش احتیاج به محاسبه نقطه تعادل ناپایدار ندارد که مهم‌ترین مشکل روش‌های انرژی می‌باشد.

پ ۲-۷- شاخص دترمینان

یکی از ساده‌ترین شاخص‌ها برای تعیین حد پایداری ولتاژ، شاخص دترمینان ماتریس ژاکوبین است که به طور معمول از روش دترمینان کاهش یافته استفاده می‌شود. این روش علاوه بر زمان زیاد محاسبات، در بیشتر مواقع با مشکل عددی مواجه می‌شود به طوری که مقدار دترمینان می‌تواند از $+\infty$ تا $-\infty$ تغییر کند. بنابراین پیدا کردن مقدار صفر آن بسیار مشکل می‌باشد [۴۷].



مقاله علمی-ترویجی

یادگیری عمیق در پردازش تصاویر سی تی اسکن ریه بیماران مبتلا به کرونا

■ دکتر علی کارساز، دانشیار موسسه آموزش عالی خراسان، a.karsaz@khorasan.ac.ir

■ رقیه اکبریانی^{*}، کارشناسی ارشد موسسه آموزش عالی خراسان، fl.kbarian@gmail.com

■ علی خرمی، استادیار موسسه آموزش عالی خراسان، Khorami@khorasan.ac.ir

^{*}نویسنده مسئول

چکیده

بیماری کرونا، از ژانویه ۲۰۲۰ در بازار عمده فروشان ماهی در شهر وهان چین شروع و سازمان بهداشت جهانی آن را به عنوان یک بیماری عمومی و یک مخاطره بین المللی معرفی و در فوریه ۲۰۲۰ آن را کرونا یا کووید-۱۹ نامگذاری نمود. با گسترش روزافزون بیماری کرونا در سراسر دنیا، استفاده از تکنیک ها و الگوریتم های هوش مصنوعی به خصوص شبکه های عصبی کانولوشن مبتنی بر یادگیری عمیق جهت غربالگری تصاویر سی تی اسکن قفسه سینه بیماران مبتلا به کووید-۱۹ ضرورت بیش از پیش یافته و سهم عمده ای از مقالات چاپ شده در این حوزه را به خود اختصاص داده اند. در حال حاضر دقت های تشخیص و غربالگری گزارش شده در مقالات علمی مبتنی بر روش های هوش مصنوعی و یادگیری عمیق از روی تصاویر سی تی اسکن قفسه سینه بیماران، به بیش از ۹۵ درصد رسیده است. یکی از معضلات موجود در زمینه روش های مبتنی بر هوش مصنوعی، به مساله آموزش شبکه های عصبی کانولوشن و نیازمندی آنها به تعداد بالایی از داده های آموزش باز می گردد. تلفیق چندین معماری مختلف از شبکه های عصبی کانولوشن، منجر به افزایش دقت در این نوع از شبکه ها به بیش از ۹۹ درصد گردیده است.

کلمات کلیدی: کووید-۱۹، شبکه های عصبی کانولوشن، یادگیری عمیق، تصاویر سی تی اسکن قفسه سینه (CXR).

Deep learning in chest CT-scan images processing of covid-19 patients

■ Ali Karsaz, Associate Professor, Khorasan Institute of Higher Education, a.karsaz@khorasan.ac.ir

■ Roghayeh Akbarian^{*}, Master of Science, Khorasan Institute of Higher Education, fl.kbarian@gmail.com

■ Ali Khorami, Associate Professor, Khorasan Institute of Higher Education, Khorami@khorasan.ac.ir

^{*}Corresponding Author

Abstract

Corona disease started in January 2020 in the wholesale fish market in Wuhan, China, and the World Health Organization declared it as a public disease and an international hazard, and in February 2020 named it Corona or Covid-19. Under this global pandemic, using artificial intelligence techniques especially convolutional neural networks based on deep learning for screening chest CT images are becoming more vital as before. The most studies in this field belong to the articles based on the deep learning methodologies using convolution neural

networks. Already, obtained accuracies of detection and screening have been reported in the article based on artificial intelligence and deep learning are more than 95 percent. The lack of comprehensive datasets of CT images with a large amount of samples is one of the most important problems in this field. Using hybrid architectures of convolutional neural networks have been increased the accuracy of these networks up to 99 percent.

Keywords: Covid-19, convolutional neural networks, deep learning, chest CT images.

۱- مقدمه

ویروس کرونا یا کووید-۱۹ متعلق به خانواده‌ای از ویروس‌ها از قبیل سندروم تنفسی حاد^۱ (SARS)، سندروم تنفسی خاورمیانه^۲ (MERS) و نیز سندرم دیسترس تنفسی^۴ (ARDS) است که نخستین بار در سال ۱۹۶۰ مورد مطالعه قرار گرفته و تاکنون هفت نمونه مختلف از این ویروس‌ها کشف شده است. این بیماری از ۱۰ ژانویه ۲۰۲۰ در وهان چین شروع و در تاریخ ۳۰ ژانویه ۲۰۲۰ سازمان بهداشت جهانی آن را به‌عنوان بیماری عمومی و یک مخاطره بین‌المللی معرفی و در فوریه ۲۰۲۰ آن را کرونا یا کووید-۱۹ نامگذاری کرد. اگرچه منشأ اصلی این ویروس جانوران هستند ولی در حال حاضر این ویروس از انسان به انسان منتقل می‌شود. از نظر ساختمانی این ویروس از یک رشته RNA، پروتئین پوششی و پروتئین شاخکی مطابق شکل (۱) تشکیل یافته است پروتئین شاخکی به گیرنده آنزیم نوع ۲ مبدل آنژیوتانسین^۵ در سطح سلول‌های ریه، کلیه و یا قلب متصل شده و از طریق رشته RNA وارد سلول می‌شود [۱].

در داخل سلول میزبان رشته RNA توسط آنزیم Reverse Tran-scriptase به DNA دو رشته‌ای تبدیل شده و در هسته سلول میزبان شروع به همانندسازی می‌کند. پس از همانندسازی مواد وراثتی ویروس از امکانات سلول میزبان استفاده کرده و پروتئین‌های ویروس سنتز می‌شوند. پس از این مرحله اجزاء سنتز شده ویروس به هم پیوسته و به این ترتیب ویروس‌های جدید در داخل سلول میزبان به‌وجود آمده و آماده آلوده کردن بقیه سلول‌ها می‌شوند [۲].

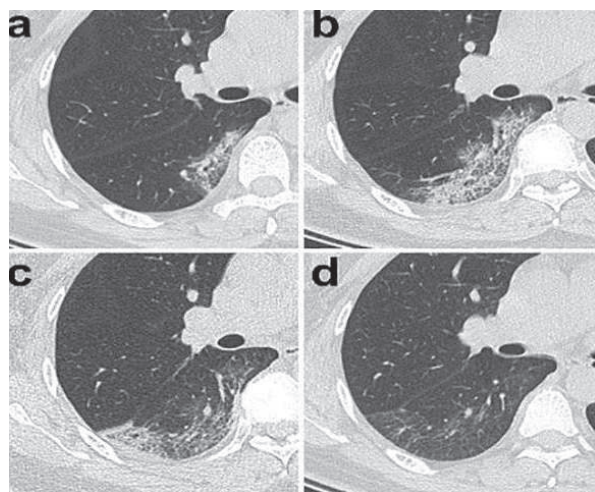
یکی از رایج‌ترین راه‌های تشخیص بیماری کرونا، از طریق نمونه‌های گرفته شده از سوآب‌های بینی و حلق، تحت آزمایشی با عنوان واکنش زنجیره‌ای پلیمرز ترانس کریپتاز معکوس^۶ (RT-PCR) است.

این فرایند آزمایشی دارای نتایج منفی کاذب بوده و گاهی عفونت را تشخیص نمی‌دهد. نتایج منفی کاذب به معنی عدم تشخیص بیماری در افراد مبتلا گفته می‌شود. با استفاده از این آزمایش، واکنش زنجیره پلیمرز توسط مولکول‌های گزارشگر فلورسنت انجام و از این طریق، تولید فرآورده‌های تکثیری طی هر چرخه واکنش PCR گزارش می‌شود [۳، ۴]. تحقیقات نشان می‌دهد که دقت آزمایش RT-PCR در تشخیص بیماری کرونا، در بازه ۵۹٪ تا ۷۱٪ متغیر است [۵، ۶].

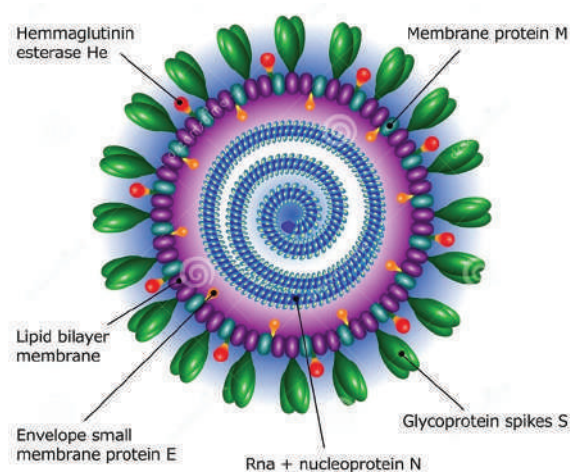
۲- تشخیص کووید-۱۹ مبتنی بر تصاویر سی‌تی اسکن قفسه سینه (CXR)

در حال حاضر در دنیا برای تشخیص بیماری کرونا و ویروس کووید-۱۹ روش‌های بسیار زیادی وجود دارد، اما بر اساس تایید انجمن رادیولوژی آمریکا، اسکن قفسه سینه بهترین راه برای تشخیص ابتلا به این ویروس است و یک روش کم‌هزینه‌تر و ایمن‌تر نسبت به روش RT-PCR محسوب می‌شود [۵].

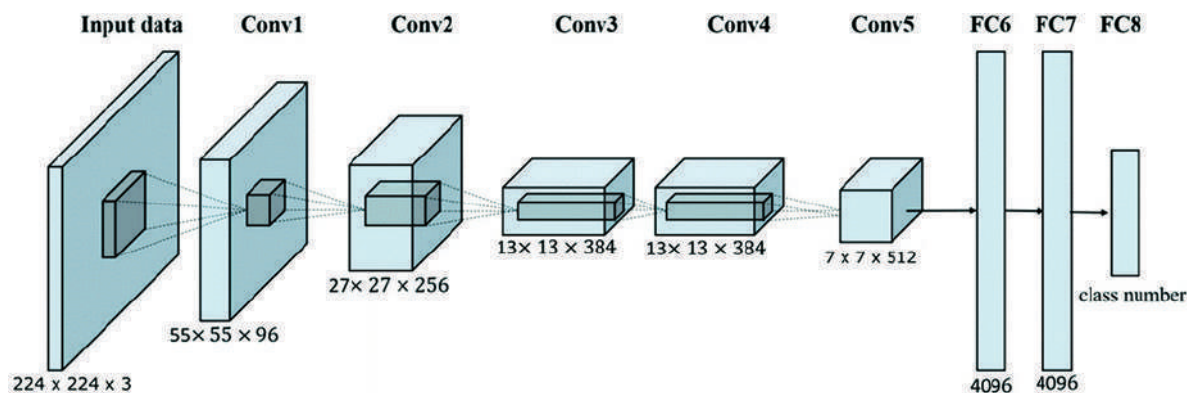
در شکل (۲) تصاویر CT^۷ اسکن مربوط به یک خانم ۴۷ ساله که به مدت سه روز تب بالای ۳۸ درجه سانتی‌گراد داشته، نشان داده شده است. این تصاویر به صورت رایج در بیماران کرونایی دیده می‌شوند. در تصویر a که سه روز پس از بروز علائم از قفسه سینه بیمار گرفته شده است، ناحیه لکه‌های زمینه شیشه‌ای^۸ (GGO) با تراکم جزئی در قسمت تحتانی لوب راست ریه مشاهده می‌شود. تصویر b مربوط به سی‌تی‌اسکن روز هفتم بیماری است که در آن وسعت یافتن GGOها و انتشار آن‌ها، نشانه‌ی تورم فضای بینابینی^۹ به‌طور کامل مشخص است. تصویر c، سی‌تی‌اسکن بیمار در روز یازدهم بیماری را نشان می‌دهد که در آن GGOها با تراکم‌های جدید دیده می‌شوند. در تصویر بخش d که مربوط به



شکل ۲: تصاویر CXR یک بیمار مبتلا به کرونا (a) روز سوم ابتلا، (b) روز هفتم ابتلا، (c) روز یازدهم ابتلا و (d) روز بیستم ابتلا [۵]



شکل ۱: ساختار ویروس کرونا تشکیل یافته از رشته RNA، پروتئین پوششی و پروتئین شاخکی [۱]

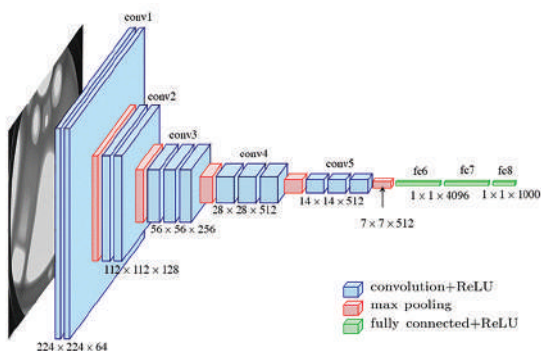


شکل ۳: معماری Alex Net به عنوان یکی از ابتدایی ترین معماری های CNN و مورد استفاده در تشخیص کووید-۱۹ [۱۰]

استخراج ویژگی های آن تصویر می پردازد. هر فیلتر کانولوشن، شامل مجموعه ای عدد است با قرار گرفتن فیلتر روی هریک از تصویر، اعداد در فیلتر درایه به درایه در پیکسل های متناظر تصویر ضرب می شوند و در نهایت همه اعداد با هم جمع می شوند. جهت کاهش حجم محاسبات از لایه ای موسوم به لایه تجمعی استفاده می شود. دو نوع لایه تجمیع وجود دارد Max Pooling و Average Pooling. لایه تجمیع Max Pooling مقدار بیشینه را از قسمتی از تصویر باز می گرداند که توسط کرنل یا ماسک مورد نظر، پوشش داده شده است و لایه Average Pooling میانگین همه مقادیری را که ماسک مورد نظر روی آن قرار گرفته، باز می گرداند. لایه های به طور کامل متصل یا FC در شبکه کانولوشن، به عنوان طبقه بندی یا کلاسیفایر^{۱۶} عمل می کنند. یعنی مجموعه ویژگی های استخراج شده با استفاده از لایه های کانولوشن در نهایت تبدیل به یک بردار می شوند و در نهایت این بردار ویژگی به لایه FC داده می شود تا کلاس درست را شناسایی کند. در ادامه به معرفی مهمترین معماری های CNN در طول چند سال اخیر پرداخته می شود [۹].

۳-۱- معماری Net Alex

درخشش اصلی CNN ها در سال ۲۰۱۲ در جریان رویداد "ImageNet-et Large Scale Recognition Challenge" همان مسابقه ImageNet اتفاق افتاد. اتفاقی که توجه جامعه محققان را به خود جلب کرد. در مسابقه ImageNet، Alex Krizhevsky از دانشگاه تورنتو با شبکه AlexNet وارد مسابقه پیچیده ImageNet شد. مسابقه ImageNet یک چالش دسته بندی با ۱/۲ میلیون تصویر در ۱۰۰۰ کلاس بود. شبکه AlexNet با خطای ۱۶,۴٪ به رتبه نخست مسابقه رسید. AlexNet به عنوان نقطه آغازین در استفاده از CNN ها، محسوب



شکل ۴: معماری VGG16 به عنوان یکی از معماری های پرکاربرد حوزه تشخیص کووید-۱۹ [۱۱]

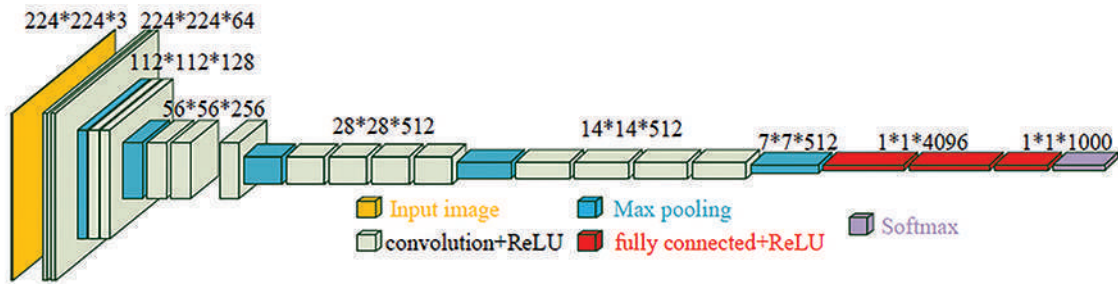
سی تی اسکن بیمار در روز بیستم است، GGOها در حال پراکندگی هستند و باندهای پارانشیمی مشاهده می شود [۵].

در سی تی اسکن قفسه سینه، سرعت ایجاد تصاویر با کیفیت از بافت ریه بالا است و رادیولوژیست می تواند به سرعت میزان درگیری ریه با بیماری را مشخص کند. سی تی اسکن قفسه سینه ویژگی های رادیولوژیکی رایج در بیماران مبتلا به ذات الریه ناشی از کووید-۱۹ را مشخص می کند. این ویژگی ها شامل نقاط توده ای تار^{۱۷}، لکه های چند کانونی^{۱۱} و تغییرات بینابینی با توزیع محیطی^{۱۲} است. برای تشخیص سریع و دقیق و مبارزه موثر با کرونا متخصصان شروع به استفاده از روش های تصویربرداری رادیولوژی کرده اند. این روش ها با روش های توموگرافی کامپیوتری (CT) یا تصویربرداری اشعه ایکس انجام می شود. مراحل بیماری اولیه و آخر کرونا دارای ویژگی های مشابهی در تصاویر CT هستند. در مطالعه ای که محققان چینی بر روی ۱۰۱۴ بیمار مشکوک به کرونا ویروس انجام دادند، مشخص شد که حساسیت سی تی اسکن در تشخیص بیماری کرونا، ۹۰ درصد بوده است [۶، ۷].

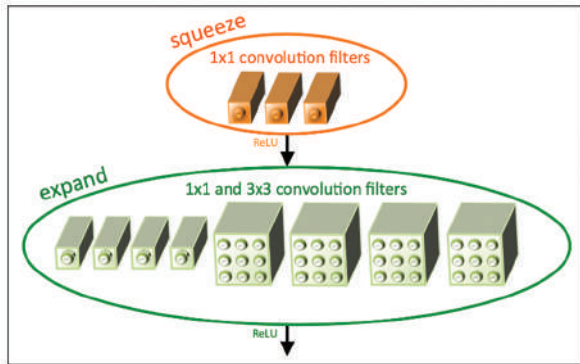
۳-۲ شبکه های عصبی کانولوشن نو ظهور

یکی از مهم ترین مزایای استفاده از شبکه های عصبی کانولوشن^{۱۳} توانایی آنها در استخراج ویژگی های تصاویر به صورت خودکار با استفاده از مفهوم یادگیری عمیق است. مفهوم شبکه CNN در سال ۱۹۹۰ با الهام گیری از آزمایش های انجام شده توسط Hubel و Wiesel روی قشر بینایی^{۱۴} معرفی شد. یکی از نخستین پروژه های انجام شده با این شبکه CNN پروژه معروف شناسایی ارقام دست نویس MNIST در سال ۱۹۹۸ توسط Yann Lecun بود که نتایج امیدوار کننده ای به همراه داشت، مانند یادگیری در مغز انسان که بسیاری از فرایندهای پیچیده به خاطر سپاری توسط لایه های درونی تر و عمیق تر مغز انسان صورت می پذیرد، یادگیری عمیق با استفاده از ساختارهای شبکه های عصبی کانولوشن و با بهره گیری از زیر لایه های بیشتر می تواند به آموزش الگوهای پیچیده تر کمک نماید. شبکه های عصبی کانولوشن مدلی از شبکه های عصبی مصنوعی بوده که همانند شبکه های عصبی معمولی از نورون، لایه و وزن ها تشکیل یافته و علاوه بر این دارای لایه های کانولوشن و تماماً متصل است [۸].

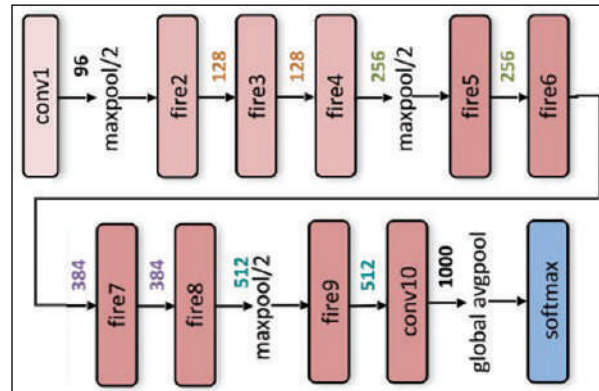
اصلی ترین لایه در یک CNN، لایه کانولوشن است که درصد اعظم محاسبات شبکه عصبی کانولوشن را به خود اختصاص داده است. شبکه کانولوشن تصاویر را به صورت قطعه به قطعه مقایسه می کند. یک CNN با ماسک گذاری بر روی قطعات مختلف، به



شکل ۵: شبکه عصبی کانولوشن VGG19، نسخه عمیق تر VGG16 [۱۲]



(ب)



(الف)

شکل ۶: الف) معماری SqueezeNet، ب) ماژول آتش در معماری SqueezeNet تشکیل شده از لایه squeeze و expand [۱۳]

می‌یابد و با یک لایه کانولوشن نهایی پایان می‌یابد (شکل ۶). برای کاهش تعداد کانال‌های ورودی به فیلتر 3×3 از لایه‌ای به نام squeeze استفاده می‌شود. این لایه‌ها در واقع از مجموعه فیلترهای 1×1 تشکیل شده‌اند. لایه دیگری که در این شبکه وجود دارد لایه expand است. این لایه ترکیبی از تعدادی فیلترهای 3×3 و 1×1 است مجموعه این دو لایه را بلاک آتش می‌نامند [۱۴، ۱۳].

۳-۵- معماری GoogLeNet

GoogLeNet جزو نخستین و عمیق‌ترین معماری‌های CNN محسوب می‌شود که توسط یکی از محققان شرکت گوگل طراحی شده است. آنچه که این معماری را با سایر معماری‌های مشابه متفاوت کرده، استفاده از بلاکی به نام Inception در این معماری است (شکل ۷). به شکل کلی یک شبکه کانولوشن GoogLeNet دارای دو لایه کانولوشن، دو لایه پولینگ و ۹ لایه Inception بوده هر لایه Inception خود دارای ۶ لایه کانولوشن و یک لایه پولینگ است. شکل (۸) ساختار یک GoogLeNet را نشان می‌دهد. مدل v3-Inception به‌عنوان یک مدل پیشرفته از شبکه عصبی کانولوشن گوگل‌نت، نخستین بار توسط Szegedy و همکاران در سال ۲۰۱۵ معرفی گردید [۱۳].

۳-۶- معماری MobileNet-V2

یک شبکه CNN با ۵۳ لایه عمیق است. شبکه با سه لایه کانولوشن آغاز می‌شود که پس از آن ۱۶ لایه معکوس قرار دارند و با یک لایه کانولوشن و یک لایه به‌طور کامل متصل پایان می‌یابند. این نوع یادگیری می‌تواند آموزش شبکه‌ها را با در نظر گرفتن ورودی‌های لایه به‌عنوان مرجع آسان کند (شکل ۹). معماری کامل موبایل‌نت شامل یک لایه پیش‌معمولی 3×3 به عنوان نخستین لایه و به دنبال آن مجموعه‌ای از بلاک‌ها می‌باشد و لایه آخر یک لایه کلی حداکثر تجمع^{۱۸} است [۱۶].

می‌شود. معماری AlexNet شامل پنج لایه کانولوشن و سه لایه به‌طور کامل متصل مطابق شکل (۳) است [۱۰].

۳-۲- معماری VGG 16

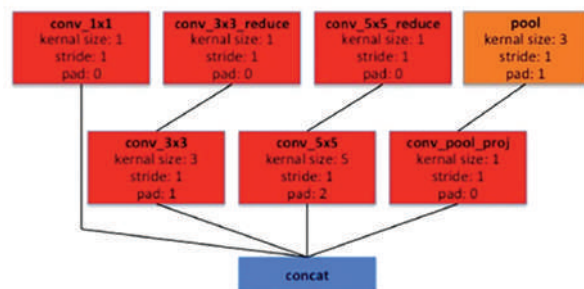
شبکه VGG^{۱۷} توسط محققانی از دانشگاه آکسفورد به‌عنوان یکی از موفق‌ترین شبکه‌های عصبی کانولوشنی که موفق به کسب رتبه بالایی در مسابقه ImageNet گردید، در سال ۲۰۱۵ معرفی شد [۱۱]. این ساختار CNN مانند معماری AlexNet از پنج بلوک کانولوشن و سه لایه به‌طور کامل متصل مطابق شکل (۴) تشکیل شده است.

۳-۳- معماری VGG 19

VGG19 نسخه عمیق‌تر با تعداد لایه بیشتر نسبت به VGG16 محسوب شده و از ۱۹ لایه شامل ۱۶ لایه کانولوشن و ۳ لایه به‌طور کامل متصل تشکیل شده است (شکل ۵).

۳-۴- معماری SqueezeNet

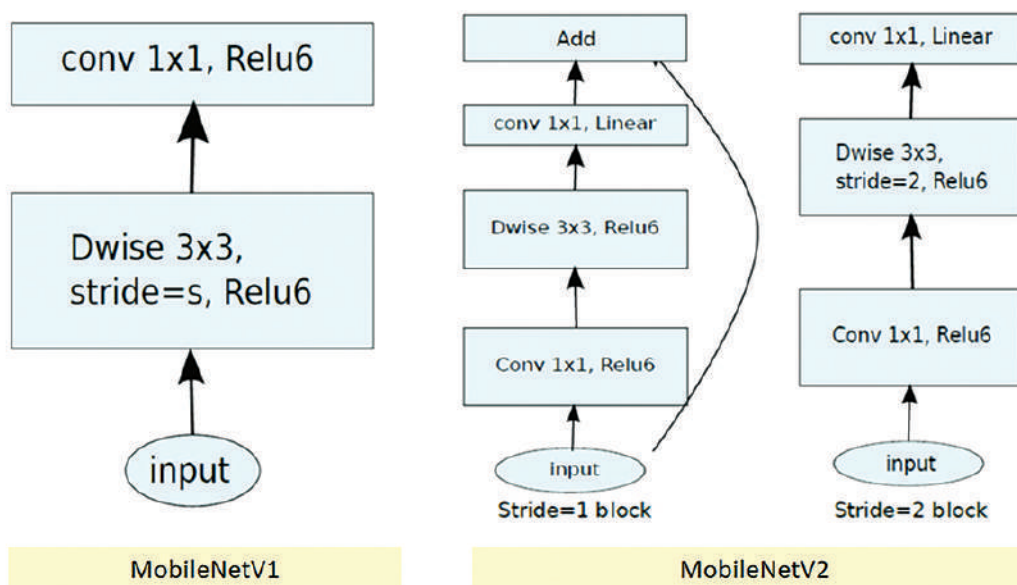
یک CNN فشرده با بیش از ۱۸ لایه قابل آموزش عمیق برای طبقه‌بندی تصاویر به ۱۰۰۰ کلاس مختلف است. شبکه با یک لایه کانولوشن مستقل آغاز می‌شود و با هشت ماژول آتش ادامه



شکل ۷: یک ماژول Inception-a3 از شبکه عصبی کانولوشن GoogLeNet [۱۵]



شکل ۸: مدل شبکه عصبی کانولوشن گوگلنت با ماژول‌های Inception به عنوان عمیق‌ترین CNN موجود [۱۵]



شکل ۹: معماری MobileNet-V1 در مقایسه با معماری MobileNet-V2 [۱۶]

تمامی انواع ResNet18، ResNet50 و ResNet101 نسخه‌هایی از ResNet هستند که بلوک باقیمانده خاص خود را دارند. ResNet18 با ۲۲ لایه عمیق است. با یک لایه کانولوشن آغاز می‌شود و با ۸ بلوک باقیمانده ادامه می‌یابد و با یک لایه به‌طور کامل متصل پایان می‌یابد. ResNet50 شامل ۵۰ لایه است و همین امر برای ResNet101 نیز صادق است که دارای ۱۰۱ لایه عمیق با ۳۳ بلوک باقیمانده است [۱۷].

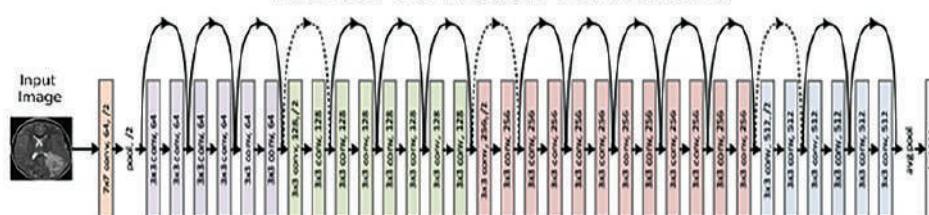
۳-۸ معماری‌های Inception

Inception v1 همان GoogLeNet است در معماری‌های Inception v2-V3 از الگوریتم بچ نرمالیزیشن استفاده شده است و لایه‌های

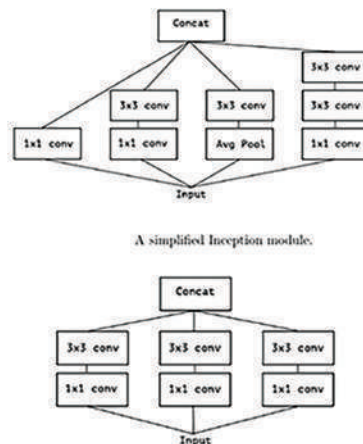
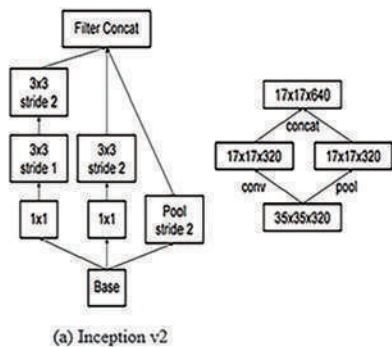
۳-۷ معماری ResNet

در این شبکه در کنار لایه‌های مختلف، ارتباطات و اتصالاتی خارج از ساختار کانولوشن در نظر گرفته شده تا ورودی‌های لایه قبلی را بدون واسطه به لایه بعدی منتقل کند تا بتوان شبکه را عمیق‌تر کرد و آن را سریع‌تر آموزش داد. به این ارتباطات skip connections و به ساختار حاصل از آن Residual block می‌گویند. ایده اصلی یک بلاک residual این است که ورودی توسط یک لایه کانولوشن، لایه ReLU و یک لایه کانولوشن پردازش می‌شود. نتیجه این تبدیلات یک تابع $F(x)$ تولید می‌گردد و نتیجه این تابع با ورودی لایه قبل جمع می‌شود (شکل (۱۰)).

ResNet-50 Model Architecture



شکل ۱۰: معماری ResNet [۱۷]



(b) Inception v3



(c) Inception v4

شکل ۱۱: معماری‌های Inceptionv2-v3-v4 [۱۸].

عمیق با عمق $1 \times n \times n$ و سپس با یک کانولوشن نقطه‌ای با طول و عرض $1 \times (1 \times n)$. شکل (۱۲) مربوط به معماری Xception است اطلاعات از سه قسمت عبور می‌کنند که بخش میانی ۸ بار تکرار شده است. بعد از هر لایه depthwise یک لایه pointwise و batch normalization قرار گرفته است. (شکل (۱۲)). در ماژول Xception هیچ تابع فعال‌ساز بین کانولوشن depthwise و pointwise وجود ندارد [۲۰].

۳-۱۱- معماری CNN + LSTM

LSTM یک شبکه عصبی مصنوعی است که می‌تواند وابستگی‌های طولانی‌مدت را یاد بگیرد تا بتواند کل توالی داده‌ها را پردازش کند. یک واحد LSTM مشترک از یک سلول، یک گیت ورودی، یک گیت فراموشی و یک گیت خروجی تشکیل شده است. گیت ورودی مشخص می‌کند که کدام اطلاعات باید وارد وضعیت سلول شوند. گیت فراموشی، مشخص می‌کند که کدام اطلاعات باید از حالات سلول قبلی حذف شوند تا فقط اطلاعات مربوطه را حفظ کنند. گیت خروجی مشخص می‌کند که چه مقدار از وضعیت داخلی باید در معرض لایه‌های بالاتر قرار گیرد. [۲۱].

۳-۱۲- معماری EffNet

EffNet یک روش شبکه عصبی کانولوشنال و روش مقیاس‌گذاری است که از یک ضریب ترکیبی استفاده می‌کند تا عرض، عمق

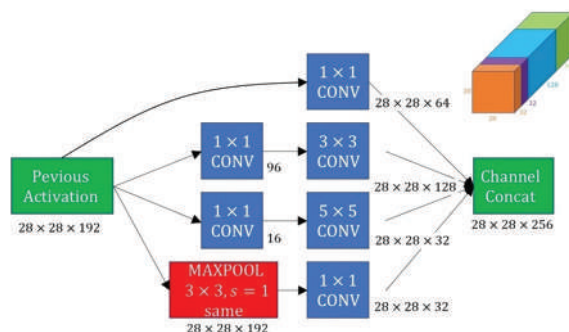
کانولوشن (5×5) با دوکانولوشن (3×3) جایگزین می‌شود (شکل (۱۱)). این امر باعث افزایش سرعت و کاهش زمان، محاسبات می‌شود. این معماری فاکتورهای $(n \times n)$ را به فاکتورهای $(n \times 1)$ و $(1 \times n)$ تبدیل می‌کند تا پیچیدگی محاسبات کاهش یابد. Inception v4 ترکیبی از ماژول‌های Inception- v3 و معماری ResNet است [۱۸].

۳-۹- معماری‌های DenseNet

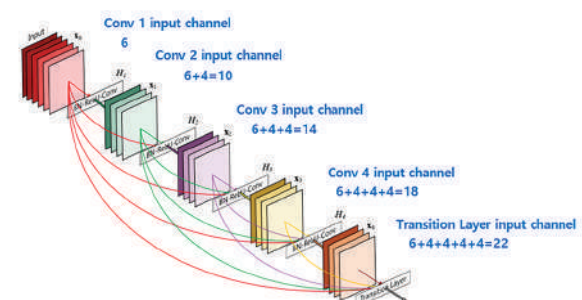
در این معماری هر لایه ورودی، از تمام لایه‌های قبلی به دست می‌آید و نقشه ویژگی‌های خاص خود را به همه موارد بعدی منتقل می‌کند. بین هر دو بلاک DenseNet لایه‌هایی به نام Transition وجود دارد که عملیات Pooling را انجام می‌دهد و سائز نگاشت ویژگی‌ها را کاهش می‌دهد (شکل (۱۲)). می‌توان گفت DenseNet با برخی تفاوت‌ها به‌طور کامل شبیه ResNet است [۱۹].

۳-۱۰- معماری Xception

شبکه عصبی کانولوشن Xception مبتنی بر Inception است که ماژول‌های آن با کانولوشن کانال‌های تفکیک‌پذیر^{۲۰} جایگزین می‌شوند. کانولوشن کانال‌های تفکیک‌پذیر یک نتیجه‌گیری ۳ بعدی استاندارد را به دو عمل جابه‌جایی جداگانه تبدیل می‌کند که از نظر محاسباتی کارآمدتر هستند: نخست یک کانولوشن



شکل ۱۳: معماری شبکه عصبی عمیق Xception [۲۰].



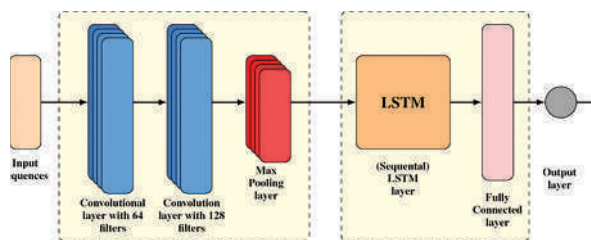
شکل ۱۲: یک معماری DenseNet با پنج لایه، هر لایه ویژگی‌های تمامی لایه‌های قبلی را دریافت می‌کند [۱۹].

فعال ساز Relu است نقش اصلی این لایه استخراج ویژگی های محلی^{۲۳} از پیکسل های تصاویر ورودی و انتقال آنها به کپسول می باشد. کپسول ها در لایه دوم با عنوان PrimaryCaps شناخته می شود که این لایه از ۳۲ واحد کپسول تشکیل شده که هر کدام از این واحدها خروجی لایه Conv1 که یک تنسور ویژگی با ابعاد [۲۵۶, ۲۰, ۲۰] را دریافت و یک عملیات کانولوشن دو بعدی بر روی این تنسور انجام می دهد (اندازه فیلتر ۹ در ۹ و طول گام ۲ است) و خروجی با ابعاد [۸, ۶, ۶] را تولید می کند. خروجی های لایه PrimaryCaps قبل از انتقال به لایه بعد فشرد می شوند. در این معماری از تابع Squash به عنوان تابع فعال ساز استفاده شده است. لایه DigitCaps از ۱۰ کپسول ۱۶ بعدی تشکیل شده است. اگر خواهیم این لایه را با یک لایه به طور کامل متصل در شبکه های معمولی با نرون های اسکالر مقایسه کنیم، لایه DigitCaps را می توان یک شبکه عصبی به طور کامل متصل با خروجی از نرون های ۱۶ بعدی در نظر گرفت که این نرون ها همان کپسول می باشد. در این لایه ورودی [۸, ۱۱۵۲] دریافت می شود و به ۱۰ کپسول ارسال می گردد [۲۴].

نقشه ویژگی پردازش شده از لایه global average pooling و لایه های متراکم پیوسته عبور می کند. تابع Relu بعد از هر کانولوشن برای فعال سازی غیر خطی استفاده می شود ConvNet قادر است به طور موفق و وابستگی های زمانی و فضایی را در یک تصویر با استفاده از فیلترهای مرتبط ثبت کند و همچنین، معماری فیلتر گذاری بهتری را روی مجموعه داده تصویر به دلیل کاهش تعداد پارامترهای درگیر و استفاده دوباره از وزن ها انجام می دهد. به بیان دیگر، شبکه می تواند برای درک تصاویر پیچیده به طور بهتری آموزش ببیند [۲۴].

۳-۱۵- معماری Net CovX

واحدهای باقیمانده^{۲۳} و شیفت دهنده^{۲۴} اصلی ترین بلاک های معماری CovXNet می باشند (شکل (۱۸)). در مرحله نخست، تصویر ورودی با هسته ها^{۲۵} پردازش می شود. سپس تصویر از مجموعه واحدهای باقیمانده عبور می کند. واحدهای شیفت دهنده تغییرات ابعادی را برای تعمیم بیشتر اطلاعات استخراج شده معرفی می کند. نقشه ویژگی پردازش شده از لایه global average pooling و لایه های متراکم پیوسته عبور می کند. تابع Relu بعد از هر کانولوشن برای فعال سازی غیر خطی این معماری استفاده می شود. این شبکه توانایی آموزش برای درک تصاویر پیچیده را دارد [۲۵].



شکل ۱۴: معماری CNN+LSTM [۲۱]

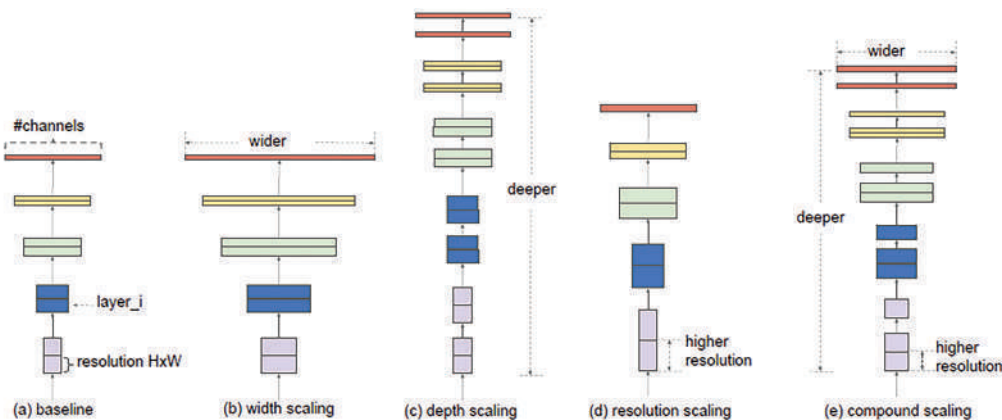
و وضوح شبکه را به صورت اصولی مقیاس بندی کند. روش مقیاس گذاری EfficNet به طور یکنواخت عرض، عمق و وضوح شبکه را با مجموعه ای از ضرایب ثابت مقیاس بندی می کند. به عنوان مثال، اگر خواهیم منابع محاسباتی 2^N برابر بیشتر استفاده کنیم، بنابراین می توانیم عمق شبکه را با α^N ، عرض توسط β^N و اندازه تصویر را توسط γ^N افزایش دهیم، که α ، β ، γ ضرایب ثابت هستند. روش مقیاس بندی مرکب با این بینش توجیه می شود اگر تصویر ورودی بزرگتر باشد، شبکه به لایه های بیشتری برای افزایش زمینه پذیرش و کانال های بیشتری برای جذب الگوهای ریز ساختار در تصویر بزرگتر نیاز دارد. پایه شبکه EfficientNet-B بر اساس بلوک های باقی مانده گلوگاه معکوس است در حالی که پایه شبکه MobileNetV2 بر اساس اضافه شدن بلوک های squeeze و excitation است [۲۲].

۳-۱۳- معماری Dark Covid net

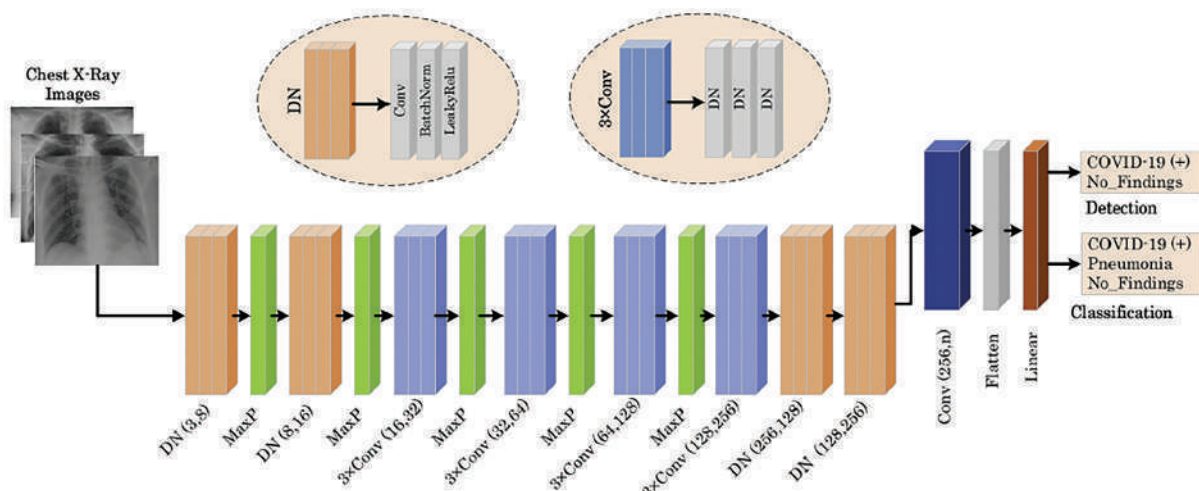
شبکه Dark Covid net مطابق شکل (۱۸)، دارای ۱۷ لایه کانولوشن است. لایه 2^N دارای یک لایه کانولوشنی، یک لایه نرمال سازی دسته ای^{۲۱} و تابع عملیاتی LeakyReLU است که سه بار به صورت متوالی راه اندازی می شود. از لایه نرمال سازی دسته ای برای استاندارد شدن ورودی، کاهش زمان آموزش و افزایش پایداری شبکه استفاده می شود مدل پیشنهادی وظیفه تشخیص کرونا را انجام می دهد. اگر سه مورد متفاوت باشد کلاسه بندی تصاویر در ورودی استفاده می شوند، این کلاسه بندی تعیین برچسب های تصاویر اشعه ایکس ورودی قفسه سینه به عنوان Covid-19، Pneumonia یا rate-Findings-No را انجام می دهد [۲۳].

۳-۱۴- معماری Caps net

معماری Caps net از سه لایه Caps Primry، Conv1 و DigitCaps تشکیل شده است (شکل (۱۸)). Conv1 یک لایه کانولوشن معمولی دو بعدی با فیلترهای 9×9 ، طول گام ۲، عمق ۲۵۶ و تابع



شکل ۱۵: معماری EfficNet (a)، شبکه پایه است. (b-c) مقیاس بندی کانولوشنی، با افزایش وضوح در یک بعد از عرض، عمق یا وضوح شبکه را افزایش می دهد. (d-e) روش مقیاس بندی مرکب است که به طور یکنواخت هر سه بعد را با یک نسبت ثابت مقیاس بندی می کند [۲۲].

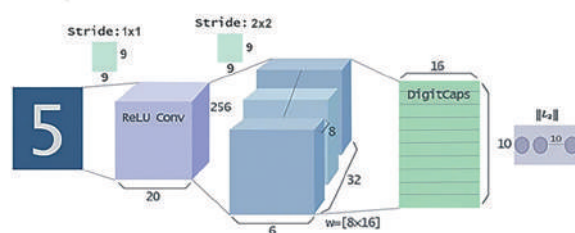


شکل ۱۶: معماری Dark COVID-19 net [۲۳]

جدول ۱: معیارهای ارزیابی عملکرد روش‌های دسته‌بندی داده [۲۷]

رابطه	معیار ارزیابی
$\frac{TP + TN}{P + N}$	دقت (ACC)
$\frac{TP}{TP + FP}$	قابلیت پیش‌بینی یا صحت (Sp)
$\frac{TP}{TP + FN}$	حساسیت (Se)
$\frac{2TP}{2TP + FP + FN}$	میانگین معیار رتبه (F1 (AvF1)

معیارهای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های غربالگری کرونا مانند بسیاری از روش‌های دسته‌بندی و غربالگری به‌طور معمول شامل دقت^{۲۹}، قابلیت پیش‌بینی^{۳۰} یا صحت^{۳۱}، حساسیت^{۳۲} و معیار امتیاز یا رتبه F1 می‌باشند. با توجه به نتایج این معیارها می‌توان در مورد عملکرد الگوریتم‌ها و ساختارهای پیشنهادی رایج شده بحث نمود. برای توضیح این چهار معیار باید ابتدا اجزای مورد استفاده برای محاسبه‌ی آن‌ها بررسی شوند. این اجزا شامل چهار مورد مثبت درست^{۳۳} (TP) یعنی آن دسته از نمونه‌هایی که دارای بیماری کووید-۱۹ بوده و به درستی تشخیص داده شده و به عنوان بیمار دسته‌بندی شده‌اند، مثبت نادرست^{۳۴} (FP) اشاره به آن دسته از تصاویر سی‌تی‌اسکن دارد که بیمار کرونا بوده و به اشتباه در دسته غیرکروناها قرار گرفته‌اند، منفی درست^{۳۵} (TN)



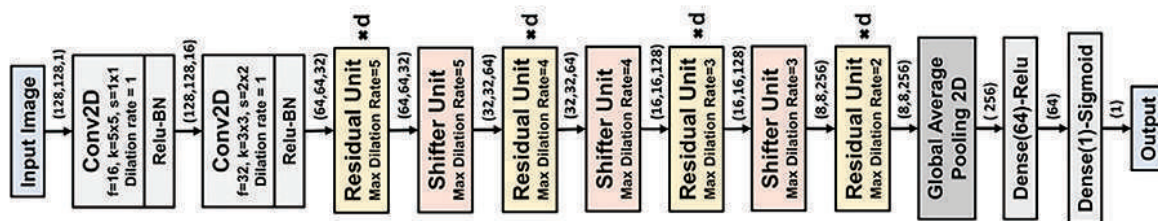
شکل ۱۷: معماری Caps net [۲۴]

۳-۱۶- معماری Covid-Net

Covid-Net براساس ساختار ریزمعماری^{۲۶} طراحی شده است و عمده‌تاز لایه‌های کانولوشن 1×1 و لایه‌های کانولوشن depth-wise تشکیل شده است. استفاده از الگوی (PEPX)^{۲۷}، بازدهی عملکرد را بهتر می‌کند و همچنین حساسیت و پیش‌بینی مثبت (PPV)^{۲۸} به Covid-19 را افزایش می‌دهد. این مدل شامل اتصال long-range است که این اتصال پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد و آموزش را آسان‌تر می‌کند [۲۶].

۴- بکارگیری معماری‌های مختلف CNN در تشخیص کووید-۱۹

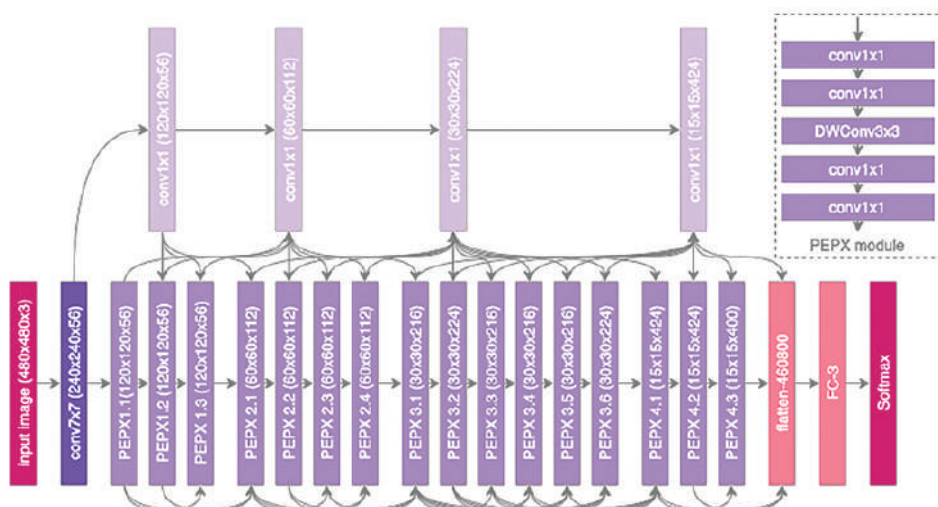
تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از CNN‌ها برای تشخیص بیماری‌های تنفسی مختلف با استفاده از تصاویر CXR ساده انجام شده است. در ادامه به بررسی برخی از آخرین دستاوردهای به‌کارگیری این روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در مقالات پرداخته می‌شود. تحقیقات در این حوزه از به‌کارگیری یک معماری ساده تا ترکیبی از دو یا چند معماری متفاوت است.



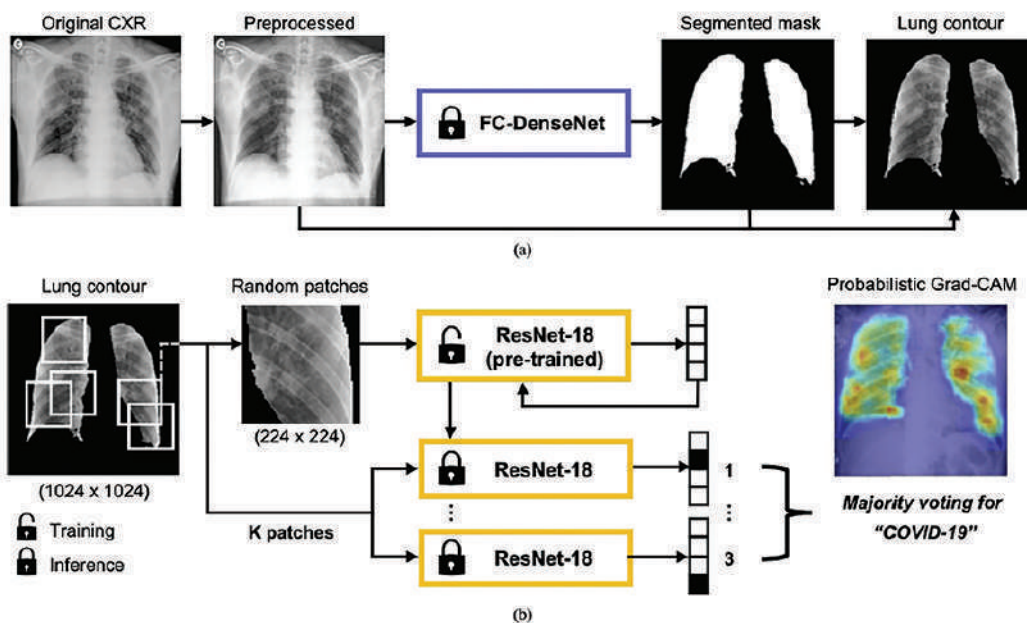
شکل ۱۸: معماری Net CovX [۲۵]

جدول ۲: دسته‌بندی مقالات حوزه غربالگری کرونا با معماری‌های مختلف CNN، تعداد تصاویر بکارگیری شده و معیار دقت بدست‌آمده [۲۷]

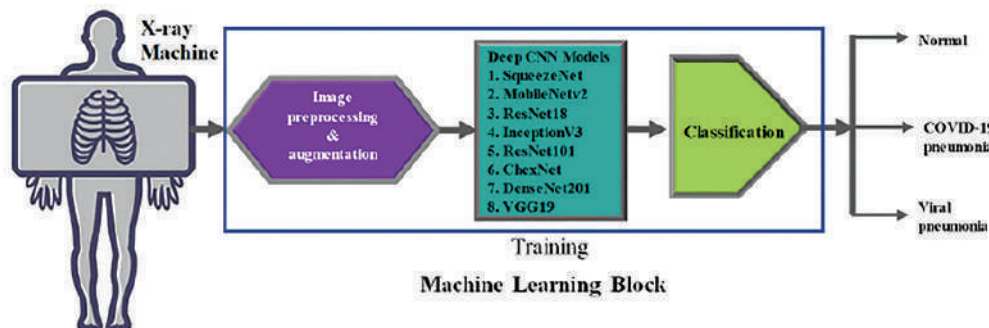
ردیف	نوع معماری CNN	تعداد تصاویر بانک اطلاعات تصاویر			معیار عملکرد	شماره مرجع
		کرونا	سرماخوردگی	نرمال		
۱	InceptionV3, InceptionResNetV2 ResNet50	۵۰	۵۰	-	ACC=%۹۸	[۲۸]
۲	VGG19 Dense Net	۲۵	۵۰	-	AvF1=۰,۹۰	[۲۹]
۳	Covid-Net ResNet50 VGG19	۳۵۸	۸۰۶۶	۵۵۳۸	ACC=%۹۳,۳	[۳۰]
۴	Efficient Net	۱۰۰	۱۴۳۱	-	Se=%۹۶ Sp=%۷۰	[۳۱]
۵	CNN + LSTM	۱۵۲۵	۱۵۲۵	۱۵۲۵	ACC=%۹۹	[۳۲]
۶	VGG16	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲	ACC=%۱۰۰	[۳۳]
۷	Xception	۱۲۷	۵۰۰	۵۰۰	ACC=%۹۷	[۳۴]
۸	Dark net	۱۲۷	۵۰۰	۵۰۰	ACC=%۸۷	[۳۵]
۹	Xception	۲۹۰	۳۱۰	۶۵۷	ACC=%۹۳	[۳۶]
۱۰	ResNet18 ResNet50 Squeeze Net DenseNet121	۱۸۴	۲۴۰۰	۲۶۰۰	Se=%۹۸ Sp=%۹۲,۹	[۳۷]
۱۱	VGG19 MobileNetV2 Inception Xception Inception ResNetV2	۲۲۴	۵۰۴	۷۰۰	ACC=%۹۴	[۳۸]
۱۲	Inception	۱۶۲	۲۰۰۳	۴۶۵۰	ACC=%۹۹	[۳۹]
۱۳	MobileNetV2 Squeeze Net	۲۹۵	۶۵	۹۸	ACC=%۹۹	[۴۰]
۱۴	VGG16	۴۰۳	۱۱۲۴	-	ACC=%۹۵	[۴۱]
۱۵	Alex net Google net ResNet18	۶۹	۷۹	۱۵۸	ACC=%۹۹	[۴۲]
۱۶	Caps net	۲۳۱	۱۰۵۰	۱۰۵۰	ACC=%۸۴	[۴۳]
۱۷	Covx Net	۳۰۵	۳۰۵	۶۱۰	ACC=%۹۰,۲	[۴۴]
۱۸	ResNet18	۱۸۰	۱۹۱	۱۳۱	ACC=%۸۹	[۴۵]
۱۹	Efficient Net-B	۲۱۹	۱۳۴۱	۱۳۴۵	ACC=%۹۹	[۴۶]
۲۰	Inception-V3	۹۰	۱۰۰۰	۶۸۷	AvF1=۰,۶۵	[۴۷]
۲۱	VGG16	۲۵۰	۳۵۲۵	۲۷۵۳	ACC=%۹۷	[۴۸]
۲۲	SqueezeNet MobileNet, ResNet18 InceptionV3 ResNet10, ChexNet, DenseNet201, VGG19	۴۲۳	۱۴۸۵	۱۵۷۹	ACC=%۹۹,۷	[۴۹]



شکل ۱۹: معماری Covid-Net [۲۶]



شکل ۲۰: به کارگیری دو معماری ResNet18 و DenseNet در تشخیص کرونا بر اساس بانک اطلاعات تصاویر ۳۰۵ فرد مبتلا به کرونا [۴۴]



شکل ۲۱: به کارگیری ترکیبی معماری‌های SqueezeNet, MobileNet, ResNet18, InceptionV3, ResNet10, ChexNet, DenseNet201 و VGG19 در تشخیص کرونا بر اساس بانک اطلاعات تصاویر ۴۲۳ فرد مبتلا به کرونا [۵۰]

جدول ۳: خلاصه ای از مجموعه تصاویر Covid-19 در پایگاه‌های اطلاعات [۵۱].

لینک تصاویر	کشور	فرمت تصاویر	تعداد	نام
https://aiforcovid.radiomica.it	Italy	DICOM	983 patients	AIforCOVID imaging archive
https://mosmed.ai/datasets/covid19_1110	Russia	NIfTI	patients 1110	MosMed COVID-19 Chest CT database
https://mosmed.ai/datasets/covid19_1110	Russia	NIfTI	patients 1110	MosMed COVID-19 Chest CT database
https://www.sirm.org/en/category/articles/covid-19-database	Italy	JPG	68 patients	SIRM database
https://radiopaedia.org/articles/covid-19-3	Global	JPG	101 patients	Radiopaedia database
https://bit.ly/BSTICovid19_Teaching_Library	UK	online only	59 patients	BSTI COVID-19 database
https://github.com/UCSD-AI4H/COVID-CT	Global	PNG	349 images from 216 patients	UCSD COVID-CT database
https://coronacases.org	China	online only	10 patients	Coronacases.org
https://www.eurorad.org/advanced-search?search=COVID	Global	JPG	50 patients	Eurorad database
https://github.com/ieee8023/covid-chestxray-dataset	Global	JPG, NIfTI	930 images from 461 patients, 20 volumes	CT machine learning dataset
http://medicalsegmentation.com/covid19	Italy	NIfTI	100 images from 40 patients	CT segmentation dataset 1
http://medicalsegmentation.com/covid19	Global	NIfTI	800 slices from 9 patients	CT segmentation dataset 2
https://zenodo.org/record/3757476	Global	NIfTI	20 cases	CT segmentation dataset 3

موفقی از دو معماری ResNet18 و DenseNet را در تشخیص کرونا بر اساس بانک اطلاعات تصاویر شامل ۳۰۵ فرد مبتلا به کرونا نشان می‌دهد بر اساس ردیف ۱۷ جدول (۲) دقت در این روش به بیش از ۹۰ درصد رسیده است [۴۴]. تصویر شماره (۲۱) ترکیب کاملی از معماری‌های In-ResNet18, MobileNet, SqueezeNet, ceptionV3, ResNet10, ChexNet, DenseNet201 و VGG19 را در تشخیص کرونا بر اساس بانک اطلاعات با ۴۲۳ تصویر افراد مبتلا به کرونا نشان می‌دهد [۵۰]. بر اساس اطلاعات ردیف ۲۲ جدول (۲)، دقت به‌دست آمده در این ترکیب به بیش از ۹۹ درصد رسیده است.

جدول (۳) خلاصه‌ای از مجموعه داده‌های، تصویربرداری Covid-19 را ارائه می‌دهد. از این پایگاه‌ها برای تشخیص در رادیولوژی، آموزش، تحقیق و همچنین برای توسعه ابزارهای هوش مصنوعی

اشاره به نمونه‌هایی دارد که کرونا نداشته و به درستی در دسته غیر کرونایی‌ها طبقه‌بندی شده‌اند و در نهایت منفی نادرست^{۳۶} (FN) اشاره به نمونه‌هایی دارد که غیر کرونا بوده و به اشتباه کرونایی کلاسه‌بندی شده‌اند [۲۴]. با توجه به توضیحات مطرح شده روابط ارزیابی عملکرد سیستم در جدول (۱) تعریف می‌گردد. در این جدول، P+N نشان‌دهنده‌ی تمام نمونه‌ها می‌باشد. جدول (۲) خلاصه‌ای از مهم‌ترین مقالاتی که به بررسی و تشخیص خودکار کرونا براساس تصاویر CXR و یادگیری عمیق پرداخته‌اند، را نشان می‌دهد [۲۷]. معیارهای ارزیابی در این دسته از مقالات بر اساس جدول (۱) در بهترین شرایط عملکردی گزارش شده‌اند. در ادامه دو نمونه از تحقیقات ترکیبی که از تلفیق چند معماری مختلف برای تشخیص دقیق‌تر کووید-۱۹ استفاده نموده‌اند در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است. شکل (۲۰) تلفیق

- 31 Accuracy
- 32 Predictive value
- 33 Precision
- 34 Sensitivity
- 35 True Positive (TP)
- 36 False Positive (FP)
- 37 True Negative (TN)
- 38 False Negative (FN)

۵- نتیجه گیری

بیماری کرونا در حال حاضر یکی از شایع‌ترین بیماری‌های ویروسی در سراسر جهان است که تسهیل و تسریع تشخیص آن نتایج بسیار مطلوبی بر روند درمان و غربالگری بیماران در جامعه خواهد داشت. استخراج ویژگی‌های تصاویر X-ray با به‌کارگیری شبکه‌های متعدد مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNN) مانند گوگل‌نت، وی جی جی، الکسنت، کویدنت و ... در تشخیص بیماری کرونا بسیار توانمندتر از آزمایش متداول (R.TPCR) reaction chain polymerase transcription Reverse است. با توجه به نتایج مقالات حوزه غربالگری کرونا، معیارهای ارزیابی Accuracy، میانگین معیار رتبه F1 (AvF1)، قابلیت پیش‌بینی یا صحت (Sp) و حساسیت (Se) با بهترین مقادیر به ترتیب برابر با ۱۰۰٪، ۹۰٪، ۹۶٪ و ۹۲٪ می‌باشد که نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که تکنیک‌های یادگیری ماشین در تشخیص بیماری کرونا بسیار موفق است.

اما نیاز به تصاویر پزشکی و توسعه بانک‌های اطلاعات تصاویر در شبکه‌های عصبی کانولوشن همواره یک چالش محسوب می‌گردد. زیرا تهیه تصاویر پزشکی از بیماران مختلف، فرایندی زمان‌بر و هزینه‌بر بوده و مشکلی جدی در کاربرد الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای طبقه‌بندی تصاویر پزشکی محسوب می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- مراجع
- [1] I. Khan, Z. Ahmed, A. Sarwar, A. Jamil, and F. Anwer, "The Potential Vaccine Component for COVID-19: A Comprehensive Review of Global Vaccine Development Efforts," *Cureus*, vol. 12, no. 6, 2020.
 - [2] H. A. Rothan and S. N. Byrareddy, "The epidemiology and pathogenesis of coronavirus disease (COVID-19) outbreak," *Journal of autoimmunity*, vol. 109, p. 102433, 2020.
 - [3] M. Keshavarz, M. Karbalaie Niya, A. Tavakoli, H. Keyvani, and A. Kachooei Mohagheghi Yaghubi, "A review on different types of Real-time PCR methods and its optimization," *Journal of Inflammatory Disease*, vol. 21, no. 3, pp. 90-76, 2017.
 - [4] F. Ucar and D. Korkmaz, "COVIDiagnosis-Net: Deep Bayes-SqueezeNet based diagnosis of the coronavirus disease 2019 (COVID-19) from X-ray images," *Medical Hypotheses*, vol. 140, p. 109761, 2020.
 - [5] B. S. Tan et al., "Rsnai international trends: A global perspective on the covid-19 pandemic and radiology in late 2020," *Radiology*, vol. 299, no. 1, pp. E193-E203, 2021.
 - [6] Y. Fang et al., "Sensitivity of chest CT for COVID-19: comparison to RT-PCR," *Radiology*, vol. 296, no. 2, pp. E115-E117, 2020.
 - [7] M. Yu et al., "Thin-section chest CT imaging of COVID-19 pneumonia: a comparison between patients with mild and severe disease," *Radiology: Cardiothoracic Imaging*, vol. 2, no. 2, p. e200126, 2020.
 - [8] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *ACM*, vol. 54, no. 10, pp. 95-103, 2011.
 - [9] C. Farabet, C. Couprie, L. Najman, and Y. LeCun, "Learning hierarchical features for scene labeling," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 35, 1915-1929 (2013).
 - [10] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," *Communications of the ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84-90, 2017.
 - [11] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.
 - [12] J. Xiao, J. Wang, Sh. Cao, and B. Li1, "Application of a Novel and Improved VGG-19 Network in the Detection of Workers Wearing Masks," *Journal of Physics: Conference Series*, 1518, p.012041.2020
 - [13] T. H. B. Nguyen, E. Park, X. Cui, V. H. Nguyen, and H. Kim, "fPADnet: small and efficient convolutional neural network for presentation attack detection," *Sensors*, vol. 18, no. 8, p. 2532, 2018.
 - [14] F. N. Iandola, S. Han, M. W. Moskewicz, K. Ashraf, W. J. Dally, and K. Keutzer, "SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and < 0.5 MB model size," *arXiv preprint arXiv:1602.07360*, 2016.
 - [15] C. Szegedy et al., "Going deeper with convolutions," in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 1-9.
 - [16] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, and A. Zhmoginov, "Mobilenetv2: inverted residuals and linear bottlenecks," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4510-4520. 20

- 1 Covid-19
- 2 Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS)
- 3 Middle East Respiratory Syndrome (MERS)
- 4 Acute Respiratory Distress Syndrome (ARDS)
- 5 Angiotensin Converting Enzyme 2 (ACE2)
- 6 Reverse-transcription polymerase chain reaction (RT-PCR)
- 7 Computerized Tomography
- 8 Ground-glass opacity (GGO)
- 9 interstitial changes (with peripheral distribution)
- 10 Ground-glass opacity (GGO)
- 11 Multifocal patchy consolidation
- 12 interstitial changes (with peripheral distribution)
- 13 Ground-glass opacity (GGO)
- 14 Multifocal patchy consolidation
- 15 Interstitial changes with peripheral distribution
- 16 Convolutional neural network (CNN)
- 17 Visual Cortex 6-Feature
- 18 VGG Deep Neural Network
- 19 Global Max Pooling
- 20 feature map
- 21 Depthwise Separable Convolutional Neural Network
- 22 DarkNet
- 23 Batch normalization
- 24 Local
- 25 Residual units
- 26 shifter unit
- 27 kernels
- 28 micro-architecture
- 29 projection-expansion-projection
- 30 Positive Predictive Value

COVID-19 infection in chest X-rays," *Irbm*, 2020.

- [35] T. Ozturk, M. Talo, E. A. Yildirim, U. B. Baloglu, O. Yildirim, and U. Rajendra Acharya, "Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 121, 2020.
- [36] A. I. Khan, J. L. Shah, and M. M. Bhat, "CoroNet: A deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 196, p. 105581, 2020.
- [37] S. Minaee, R. Kafieh, M. Sonka, S. Yazdani, and G. J. Soufi, "Deep-covid: Predicting covid-19 from chest x-ray images using deep transfer learning," *Medical image analysis*, vol. 65, p. 101794, 2020.
- [38] I. D. Apostolopoulos and T. A. Mpesiana, "Covid-19: automatic detection from x-ray images utilizing transfer learning with convolutional neural networks," *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 43, no. 2, pp. 635-640, 2020.
- [39] D. Das, K. Santosh, and U. Pal, "Truncated inception net: COVID-19 outbreak screening using chest X-rays," *Physical and engineering sciences in medicine*, vol. 43, no. 3, pp. 915-925, 2020.
- [40] M. Toğaçar, B. Ergen, and Z. Cömert, "COVID-19 detection using deep learning models to exploit Social Mimic Optimization and structured chest X-ray images using fuzzy color and stacking approaches," *Computers in biology and medicine*, vol. 121, p. 103805, 2020.
- [41] A. Waheed, M. Goyal, D. Gupta, A. Khanna, F. Al-Turjman, and P. R. Pinheiro, "Covidgan: data augmentation using auxiliary classifier gan for improved covid-19 detection," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91916-91923, 2020.
- [42] M. Loey, F. Smarandache, and N. E. M. Khalifa, "Within the lack of chest COVID-19 X-ray dataset: a novel detection model based on GAN and deep transfer learning," *Symmetry*, vol. 12, no. 4, p. 651, 2020.
- [43] S. Toraman, T. B. Alakus, and I. Turkoglu, "Convolutional capsnet: A novel artificial neural network approach to detect COVID-19 disease from X-ray images using capsule networks," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 140, p. 110122, 2020.
- [44] T. Mahmud, M. A. Rahman, and S. A. Fattah, "CovXNet: A multidilation convolutional neural network for automatic COVID-19 and other pneumonia detection from chest X-ray images with transferable multireceptive feature optimization," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 122, 2020.
- [45] Y. Oh, S. Park, and J. C. Ye, "Deep learning covid-19 features on cxr using limited training data sets," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 39, no. 8, pp. 2688-2700, 2020.
- [46] A. Altan and S. Karasu, "Recognition of COVID-19 disease from X-ray images by hybrid model consisting of 2D curvelet transform, chaotic salp swarm algorithm and deep learning technique," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 140, p. 110071, 2020.
- [47] R. M. Pereira, D. Bertolini, L. O. Teixeira, C. N. Silla Jr, and Y. M. Costa, "COVID-19 identification in chest X-ray images on flat and hierarchical classification scenarios," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 194, p. 105532, 2020.
- [48] L. Brunese, F. Mercaldo, A. Reginelli, and A. Santone, "Explainable deep learning for pulmonary disease and coronavirus COVID-19 detection from X-rays," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 196, p. 105608, 2020.
- [49] S. H. Yoo et al., "Deep learning-based decision-tree classifier for COVID-19 diagnosis from chest X-ray imaging," *Frontiers in medicine*, vol. 7, p. 427, 2020.
- [50] M. E. Chowdhury et al., "Can AI help in screening viral and COVID-19 pneumonia?," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132665-132676, 2020.
- [51] <https://www.eibir.org/covid-19-imaging-datasets>
- 18
- [17] K. He, X. Zhang, Sh. Ren, and J. Sun Microsoft Research, "Deep Residual Learning for Image Recognition," in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 770-778, 2016.
- [18] C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke, and A. Alexander, "Inception-v4, Inception-Res Net and the Impact of Residual Connections on Learning," in: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 4510-4520.
- [19] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, "Densely connected convolutional networks," in: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 4700-4708.
- [20] F. Chollet, "Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions," in: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 1251-1258.
- [21] F. Shahid, A. Zameer, and M. Muneeb, "Predictions for COVID-19 with deep learning models of LSTM, GRU and Bi-LSTM," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 140, p. 110212, 2020.
- [22] T. Mingxing, V. LeQuoc, "EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks," *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, Long Beach, California, PMLR 97, 2019.
- [23] T. Ozturk, M. Talo, E. A. Yildirim, U. B. Baloglu, O. Yildirim, and U. R. Acharya, "Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images," *Computers in biology and medicine*, vol. 121, p. 103792, 2020.
- [24] T. Vijayakumar, "Comparative study of capsule neural network in various applications," *Journal of Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 01, pp. 19-27, 2019.
- [25] T. Mahmud, M. A. Rahman, and S. A. Fattah, "CovXNet: A multi-dilation convolutional neural network for automatic COVID-19 and other pneumonia detection from chest X-ray images with transferable multi-receptive feature optimization," *Computers in biology and medicine*, vol. 122, p. 103869, 2020.
- [26] L. Wang, Z. Q. Lin, and A. Wong, "Covid-net: A tailored deep convolutional neural network design for detection of covid-19 cases from chest x-ray images," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 19549, 2020.
- [27] J. D. Arias-Londoño, J. A. Gomez-Garcia, L. Moro-Velázquez, and J. I. Godino-Llorente, "Artificial Intelligence applied to chest X-Ray images for the automatic detection of COVID-19. A thoughtful evaluation approach," *IEEE Access*, 2020.
- [28] A. Narin, C. Kaya, and Z. Pamuk, "Automatic detection of coronavirus disease (covid-19) using x-ray images and deep convolutional neural networks," *Pattern Analysis and Applications*, pp. 1-14, 2021.
- [29] E. E.-D. Hemdan, M. A. Shouman, and M. E. Karar, "Covidx-net: A framework of deep learning classifiers to diagnose covid-19 in x-ray images," *arXiv preprint arXiv:2003.11055*, 2020.
- [30] L. Wang, Z. Q. Lin, and A. Wong, "Covid-net: A tailored deep convolutional neural network design for detection of covid-19 cases from chest radiography images," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 19549, 2020.
- [31] J. Zhang, Y. Xie, Y. Li, C. Shen, and Y. Xia, "Covid-19 screening on chest x-ray images using deep learning based anomaly detection," *arXiv preprint arXiv:2003.12338*, vol. 27, 2020.
- [32] M. Z. Islam, M. M. Islam, and A. Asraf, "A combined deep CNN-LSTM network for the detection of novel coronavirus (COVID-19) using X-ray images," *Informatics in medicine unlocked*, vol. 20, p. 100412, 2020.
- [33] J. Civit-Masot, F. Luna-Perejón, M. Domínguez Morales, and A. Civit, "Deep learning system for COVID-19 diagnosis aid using X-ray pulmonary images," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 13, p. 4640, 2020.
- [34] N. N. Das, N. Kumar, M. Kaur, V. Kumar, and D. Singh, "Automated deep transfer learning-based approach for detection of

◀ آنالیز تئوری اطلاعاتی سیستم تأیید موقعیت

رزیتا غلامی

استاد راهنما: دکتر عابد همدتی
دانشگاه فردوسی مشهد

◀ طراحی بلوک‌های دیجیتال مورد استفاده در کاربردهای پزشکی

الناز ظفرخواه

استاد راهنما: دکتر محمد میمندى نژاد
دانشگاه فردوسی مشهد

با توجه به اهمیت استفاده از مدارهای الکترونیکی در کاربردهای پزشکی، هدف کلی از انجام این تحقیق، ارائه‌ی طراحی بهینه‌ای برای یکی از مدارهای پرکاربرد در این حوزه است. یکی از مدارهای با اهمیت در حوزه‌ی مهندسی پزشکی، مدارهای ثبت سیگنال‌های بدن انسان یا به شکل جامع‌تر، مدارهای واسط حسگر پزشکی می‌باشد. از این‌رو در این رساله، بر روی بهینه‌سازی مدارهای واسط حسگر پزشکی تمرکز شده است. با توجه به مزایای مهمی از قبیل وجود چالش‌های کمتر برای کاهش دو عامل مهم در هر مدار پزشکی، یعنی توان مصرفی و ابعاد مدار، ساختار دیجیتال برای طراحی‌ها انتخاب شده است.

برای بهینه‌سازی مدارهای واسط حسگر، یک مدار واسط حسگر تمام دیجیتال برای ثبت سیگنال قلب (ECG)، به‌عنوان پایه و اساس کار در نظر گرفته شده است. بلوک مبدل زمان به دیجیتال که یکی از بلوک‌های اصلی این مدار به شمار می‌رود، مورد توجه ما می‌باشد و سعی می‌شود به طراحی مناسبی از این بلوک پرداخته شود. در این راستا، یک مبدل زمان به دیجیتال با مصرف توان بسیار کم و بر پایه‌ی نوسانگر حلقوی خاموش شونده، برای کار در فرکانس‌های پایین پزشکی طراحی شده که در آن از یک روش جدید برای رفع مشکل جریان ناشی و نویز تولیدی ناشی از آن استفاده شده است. برای طراحی از فناوری CMOS 0.13 μm استفاده شده و مقدار منبع تغذیه 0.4 V لحاظ گردیده است. با توجه به بازه‌ی ولتاژی سیگنال ECG، محدوده‌ی دینامیکی مورد نیاز مبدل 1.76 μs و رزولوشن آن در مقدار 1.76 ns تنظیم شده است. همچنین، در گوشه‌ی TT، مصرف توان مبدل پیشنهادی برابر با 45.85 nW، نسبت سیگنال به نویز و اعوجاج آن برابر با 45.55 dB و تعداد بیت موثر آن برابر با 8.77 بدست آمده است.

با توجه به نوع ساختار انتخابی برای مبدل زمان به دیجیتال؛ بلوک نوسانگر حلقوی نیز به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. یک رابطه‌ی صریح و دقیق برای فرکانس نوسان حلقه پیشنهاد شده و روش محاسبه‌ی این رابطه برای سایر فناوری‌ها نیز ذکر شده است. همچنین یک استراتژی کارا برای طراحی یک نوسانگر حلقوی تک سر با این هدف که توان و مساحت در آن مینیمم باشند، نویز از یک حد معین بیشتر نشود و در عین حال حلقه در فرکانس مورد نظر نوسان نماید، معرفی شده است. به علاوه گیت اینورتر که پایه و اساس مدارهای دیجیتال می‌باشد نیز مورد بررسی قرار گرفته و یک رابطه‌ی دقیق برای زمان تأخیر آن محاسبه شده است. در انتها به طراحی یک بخش فیلترینگ دیجیتال نیز پرداخته شده است.

کلمات کلیدی:

مدار واسط حسگر پزشکی، مبدل زمان به دیجیتال، ساختار نوسان حلقوی خاموش شونده، فرکانس نوسان نوسانگر حلقوی تکسر، زمان

تعیین موقعیت بی‌سیم یک موضوع تحقیقاتی فعال در گذشته بوده و در سال‌های اخیر، مساله تأیید موقعیت با توجه به تأثیر آن روی عملکرد، امنیت و ایمنی شبکه‌های بی‌سیم اهمیت بیشتری یافته است. اهمیت تأیید موقعیت در سیستم‌های حمل و نقل هوشمند و شبکه‌های ادهاک مربوط به وسایل نقلیه بیشتر دیده می‌شود. در چنین شبکه‌هایی، تأیید اطلاعات موقعیت به دست آمده از وسایل نقلیه برای بسیاری از مسائل مربوط به ایمنی مسافر ضروری است.

در این رساله، ابتدا عملکرد سیستم تأیید موقعیت را تحت نویز گوسی و با هدف پیدا کردن یک آستانه تصمیم بهینه برای تشخیص یک موقعیت جعلی، از نگاه‌های آمار ریاضی و تئوری مخابراتی - اطلاعاتی تجزیه و تحلیل می‌کنیم. برای این منظور از معیارهای تئوری اطلاعاتی متفاوتی از جمله اطلاعات متقابل و دیورژانس کولیک - لیبلر، اطلاعات متقابل و دیورژانس رنی و دیورژانس جنسون - شانون برای شناسایی کاربر مخرب استفاده و با مقایسه آنها متریک بهینه‌ساز را برای تشخیص موقعیت جعلی می‌یابیم. همچنین مزایای عملی این چارچوب تئوری اطلاعاتی را نسبت به چارچوب‌های تأیید موقعیت بیزی قدیمی مورد بحث قرار می‌دهیم. سپس عملکرد سیستم تأیید موقعیت تئوری اطلاعاتی را در محیط‌های عملی با حضور نویز غیرگوسی بررسی می‌کنیم.

همچنین در این رساله، عملکرد سیستم تأیید موقعیت پیشنهادی را با شبیه‌سازی نرم‌افزاری در کنار تحلیل دقیق ریاضی می‌سنجیم. در نهایت، مشاهده می‌کنیم که نتایج عملکرد تئوری و شبیه‌سازی نزدیک هم می‌باشد و مقایسه بین معیارهای پیشنهادی نشان می‌دهد که با استفاده از معیار دیورژانس جنسون - شانون می‌توان نقطه عملیاتی بهینه را برای تشخیص موقعیت جعلی در محیط‌های هم‌گوسی و هم غیر گوسی به‌دست آورد و این معیار باعث بهبودی بیشتر در شناسایی کاربران مخرب می‌شود به‌طوری‌که می‌توان سیستم تأیید موقعیت پیشنهادی را در سناریوهای مختلفی مانند شبکه حمل و نقل هوشمند و شبکه‌های بی‌سیم از حسگرها مورد استفاده قرار داد.

کلمات کلیدی:

آستانه تصمیم‌گیری، سیستم تأیید موقعیت، شبکه‌های ادهاک وسایل نقلیه، کاربر مخرب، معیارهای تئوری اطلاعاتی، نویز غیرگوسی.

حفاظت پشتیبان خطوط انتقال مبتنی بر سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده با قابلیت حفاظت خطوط انتقال جبران شده موازی

محمد رضا احمدی‌نیا
استاد راهنما: دکتر جواد سادہ
دانشگاه فردوسی مشهد

پایدارسازی رده‌ای از سیستم‌های غیرخطی تکین تاخیری درحضور عدم قطعیت و اغتشاش و کاربرد آن در نوعی ربات خودگردان زیرسطحی (AUV)

محمد هدایتی خدایاری
استاد راهنما: دکتر ناصر پریز
دانشگاه فردوسی مشهد

در این رساله، مساله پایداری و پایدارسازی سیستم‌های تکین تاخیر زمانی در حضور عدم قطعیت در مدل، اشباع عملگر و اغتشاش بیرونی مطالعه شده است. براساس تحلیل پایداری به کمک حل نامساوی‌های ماتریسی خطی و شبه خطی، به مساله طراحی پایدارساز پس‌خورد حالت و پایدارساز دینامیکی برای این سیستم‌ها پرداخته شده است. در واقع هدف از این طراحی مشخص نمودن بردار کنترل جدید به شکلی است که پایداری سیستم حلقه بسته را در حد بالای تاخیر، مجاز و تضمین نماید. تحلیل پایداری در حوزه زمان و با استفاده از روش لیاپانوف کراسوفسکی و با شیوه وابسته به تاخیر و نرخ آن انجام شده که نسبت به سایر روش‌های معمول دارای تخمین دقیق‌تر در خصوص بیشترین زمان تاخیر مجاز سیستم است. تاخیرهای زمانی مدنظر دارای تنوعی از تاخیرهای ثابت، متغیر با زمان و تاخیر توزیع شده می‌باشند.

این رساله مشتمل بر ارایه سه روش جدید جهت پایدارسازی سیستم‌های تکین تاخیری با قیود عنوان شده است. روش نخست شامل پایداری سیستم تکین تاخیری با وجود عدم قطعیت و قید اشباع عملگر به همراه معرفی قضیه‌ای جدید است. در روش دوم علاوه بر قیود مساله اول با روشی متفاوت به بررسی تقریب همزمان ناحیه جذب سیستم غیرخطی هم پرداخته شده است. در روش سوم نیز بررسی پایداری مقاوم سیستم تکین تاخیری در برابر اغتشاش و عدم قطعیت به صورت همزمان ارایه شده است.

سیستم مورد مطالعه با توجه به قید اشباع عملگر به صورت کلی در دسته سیستم‌های غیرخطی در نظر گرفته می‌شود از این رو علاوه بر نقاط تعادل سیستم لزوم توجه به ناحیه جذب و بیشترین مقدار تقریب آن نیز اجتناب‌ناپذیر است.

در این مسایل با وجود عدم قطعیت و اغتشاش بیرونی، ناگزیر از به کارگیری کنترل‌کننده مقاوم هستیم. عدم قطعیت در این رساله از نوع متغیر با زمان، چندوجهی و محدود در یک بازه مشخص است. با توجه به در نظر گرفتن مدل تکین برای سیستم، هدف اصلی علاوه بر پایداری، منظم بودن و عاری بودن پاسخ حلقه بسته سیستم از توابع ضربه دیراک است. از این رو در روش نخست و دوم تابعی جدیدی پیشنهاد شده و با استفاده از نامساوی‌های معمول به دور از پیچیدگی‌های محاسباتی رایج در سیستم‌های تکین و تاخیری، شرط پایداری حاصل شده است. دقت تخمین بیشترین تاخیر مجاز با روش ارایه شده در این رساله نسبت به روش‌های ارایه شده در مراجع معتبر بهبود یافته و به مقدار حاصل از روش فرکانسی (روش مرجع) نزدیکتر است.

شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی یک ربات خودگردان زیر سطحی صورت گرفته که نه تنها قیود آن مشمول قید عنوان شده در این تحقیق است، بلکه چالش‌های آن در محیط عملیاتی نیز تقارب زیادی به صورت مساله مطرح شده در این سیستم و دینامیک‌های مشابه است.

کلمات کلیدی:

تابعی لیاپانوف کراسوفسکی، سیستم‌های تکین، سیستم‌های تاخیری، ناحیه جذب، نامساوی‌های خطی و شبه خطی، ربات خودگردان زیر سطحی

در سیستم‌های قدرت سنتی حفاظت اصلی و پشتیبان خطوط انتقال بر عهده رله دیستانس می‌باشد. در سال‌های اخیر و با افزایش تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازور در شبکه‌های قدرت، بهره‌گیری از سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده جهت حفاظت خطوط انتقال رواج یافته و فرصت‌های زیادی جهت بهبود حفاظت سیستم قدرت ایجاد شده است. بهره‌گیری از سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده جهت حفاظت پشتیبان خطوط انتقال تحت عنوان حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده شناخته می‌شود.

در بهره‌گیری از سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده جهت حفاظت پشتیبان خطوط انتقال دو دیدگاه وجود دارد. در دیدگاه نخست فرض می‌شود در طرفین تمامی خطوط تحت حفاظت واحد اندازه‌گیری فازور نصب شده است، اما در دیدگاه دوم فرض می‌شود که به دلایل اقتصادی طرفین تمامی خطوط تحت حفاظت مجهز به واحد اندازه‌گیری فازور نبوده و طرح حفاظت پشتیبان با فرض محدود بودن واحدهای اندازه‌گیری فازور ارائه می‌گردد. به منظور بهبود بارپذیری و پایداری خطوط انتقال می‌توان از جبران‌سازهای موازی بهره گرفت. مطابق ارزش‌های صورت گرفته طرح‌های حفاظت پشتیبان موجود قابلیت حفاظت پشتیبان خطوط انتقال جبران شده موازی را دارا نمی‌باشند. با توجه به دو دیدگاه اشاره شده، در رساله حاضر طرح‌هایی جهت حفاظت پشتیبان خطوط انتقال جبران شده موازی مبتنی بر بهره‌گیری از سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده ارائه شده است. علاوه بر دو طرح پیشنهادی جهت حفاظت پشتیبان خطوط انتقال، روشی جهت مکان‌یابی خطا برای خطوط انتقال جبران‌سازی شده و فاقد جبران‌سازی نیز ارائه شده است.

در طرح پیشنهادی نخست با اعمال اصلاحات مناسب بر روی یکی از طرح‌های موجود برای خطوط بدون جبران‌سازی، یک طرح بهبود یافته با قابلیت حفاظت خطوط جبران شده موازی ارائه شده است. این طرح بر اساس وجود واحد اندازه‌گیری فازور در طرفین تمامی خطوط تحت حفاظت پایه‌ریزی شده است. در طرح پیشنهادی علاوه بر ولتاژ توالی مثبت باس‌ها از ولتاژهای توالی منفی و صفر نیز جهت تشخیص نزدیکترین باس‌ها به محل خطا استفاده می‌شود. بهره‌گیری از اختلاف فاز جریان‌های توالی منفی (در کنار توالی مثبت) جهت تشخیص دقیق خط خطادار در اتصال کوتاه‌های نامتقارن، مهمترین نوآوری طرح پیشنهادی می‌باشد. در طرح پیشنهادی دوم که با فرض محدود بودن تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازور ارائه شده است، ابتدا با توجه به نحوه قرارگیری واحدهای اندازه‌گیری فازور، ناحیه خطادار مشخص می‌گردد، سپس با توجه به نوع ناحیه خطا و بهره‌گیری از الگوریتم‌های مناسب، خطی از ناحیه که خطا در آن رخ داده است، تعیین شده است. طرح پیشنهادی دوم نیز قابلیت حفاظت پشتیبان خطوط جبران شده موازی را دارا بوده و بر خلاف روش‌های موجود قادر است بدون نیاز به اطلاعات ولتاژ و جریان قبل از رخداد خطا، خط خطادار را با دقت بالا شناسایی نماید. در رساله حاضر بعد از تعیین خط خطادار طرحی جهت مکان‌یابی محل خطا نیز ارائه شده است. طرح مکان‌یابی پیشنهادی قادر است مکان خطا را در شرایطی که اطلاعات موجود ناقص نیز هستند، با دقت بالایی تعیین نماید. بر این اساس پس از تعیین خط خطادار توسط طرح‌های حفاظت پشتیبان پیشنهادی، محل دقیق خطا در انواع خطوط (بدون جبران‌سازی یا جبران شده موازی) تعیین می‌گردد.

کلمات کلیدی:

حفاظت پشتیبان، اندازه‌گیری ناحیه گسترده، واحد اندازه‌گیری فازور، خط انتقال جبران شده موازی، مکان‌یابی خطا



مقاله علمی-ترویجی

مقایسه‌ی شبکه‌های عصبی MLP و SVR جهت مدل‌سازی و عیب‌یابی توربین بادی نیروگاه بادی کهک

■ مجتبی‌ی‌حیدرزاده قره‌ورن،* دانشگاه شهید بهشتی تهران، m.heidarzade@sbu.ac.ir

■ علیرضا یزدی‌زاده، دانشگاه شهید بهشتی تهران، a_yazdzade@sbu.ac.ir
*نویسنده مسئول

چکیده

در این مقاله به مدل‌سازی و سپس عیب‌یابی توربین بادی با استفاده از شبکه‌های عصبی هوشمند MLP و SVR پرداخته شده است. عیب‌یابی و مدل‌سازی مربوط به بخش سیستم الکتریکال توربین بادی موردنظر می‌باشد. داده‌های واقعی دریافتی از توربین بادی مربوط به سایت نیروگاه بادی کهک به عنوان اطلاعات پایه‌ای مورد نیاز برای انجام مدل‌سازی و عیب‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. پس از مدل‌سازی توربین بادی توسط دو شبکه‌ی عصبی ذکر شده در بالا، مقایسه این دو روش اتفاق افتاده است و میزان دقت و مقادیر انواع خطاهای مدل‌سازی برای هر یک از این دو روش بررسی و تحلیل شده است و نتایج حاکی از دقت و صحت روش SVR در مدل‌سازی و به طبع آن دقت و صحت در عیب‌یابی توربین بادی می‌باشد. شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در نرم‌افزار MATLAB بوده است و این نرم‌افزار یکی از نرم‌افزارهای بسیار پرکاربرد و مورد اعتماد در زمینه‌ی شبیه‌سازی سیستم‌های الکتریکی و الکترومکانیکی است. نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌ها در قالب شکل‌های مختلف در متن مقاله آورده شده است. قابل ذکر است که عیب‌یابی انجام شده برای سنسور سرعت ژنراتور توربین بادی می‌باشد و اساس مدل‌سازی و عیب‌یابی روش داده محور است.

کلمات کلیدی: شبکه‌های عصبی هوشمند، عیب‌یابی، مدل‌سازی، توربین بادی، نیروگاه بادی کهک، داده محور

Comparing SVR and MLP neural network for modelling and fault detection of KAHAK wind farm

■ Mojtaba Heidarzadeh Ghareveran, Shahid Beheshti University, m.heidarzade@sbu.ac.ir

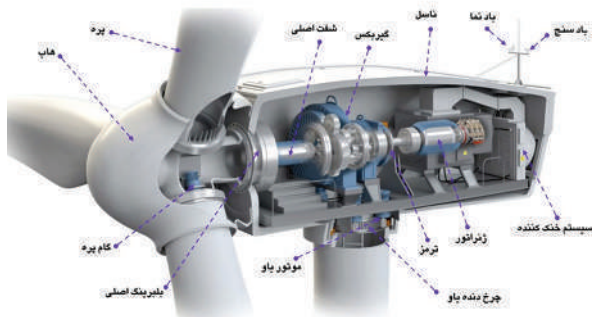
■ Alireza Yazdzadeh, Shahid Beheshti University, a_yazdzade@sbu.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

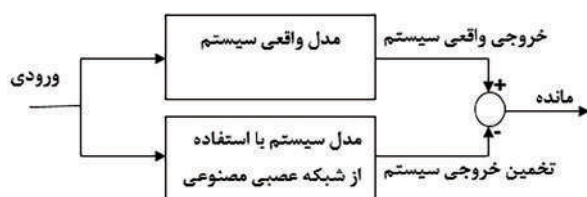
In this paper we use SVR and MLP Neural Network for modelling and fault detection of KAHAK wind turbines. Electrical subsystems is our purpose for modelling and fault detection. We have actual data and real parameters about 2.5 MW wind turbines that installed in KAHAK wind farm. In first step we modelled and fault detect with two approach, Support Vector Regresion (SVR) and Multi Layer Perceptron (MLP), in second step we compare model error and accurase of SVR and MLP approach, that we can see SVR approach is better than MLP approach according modelling error. We use MATLAB software for this work.

Keywords: Neural Network, Fault Detection, Modelling, Wind Turbine, Data-based, KAHAK



شکل ۱: اجزای توربین بادی

به مراتب مقداری بیشتر از صفر خواهد بود و همین عدم صفر بودن مقدار مانده یا به عبارت دیگر جهش مانده، رخداد عیب را مشخص می‌سازد.



شکل ۲: روند تولید مانده برای انجام عملیات عیب‌یابی

در هر سیستم عیب می‌تواند در سه بخش مختلف از آن اتفاق افتد، عیب در سنسورها، عیب در عملگرها (محرک‌ها) و عیب در ذات سیستم که در این مقاله عیب موجود در سنسور مورد بررسی قرار گرفته است. سنسور مورد بررسی مربوط به ژنراتور توربین بادی می‌باشد و سرعت چرخشی ژنراتور را اندازه‌گیری می‌کند.

برای انجام عملیات عیب‌یابی سه روش کلی مرسوم است، نخست روش داده محور که از داده‌های دریافتی و جمع‌آوری شده از سیستم برای انجام عملیات عیب‌یابی استفاده می‌شود که روش عیب‌یابی در این مقاله نیز از نوع روش عیب‌یابی داده محور است، دوم روش مدل محور که بر اساس مدل ریاضی موجود سیستم عیب‌یابی صورت می‌گیرد و سوم روش سیگنال محور که مقایسه‌ی سیگنال ارسالی از سیستم و مقایسه‌ی آن با یک مقدار مرجع رخداد و عدم رخداد عیب در سیستم را مشخص می‌کند.

در مرور کارهای پیشین در حوزه‌ی عیب‌یابی توربین‌های بادی قابل ذکر است که در مرجع [۱] عیب‌یابی برای سنسور و عملگرهای مختلف توربین بادی نظیر عملگرهای سیستم چرخش پره، سیستم چرخش ناسل انجام گرفته است، عیب‌یابی انجام گرفته در دسته‌بندی عیب‌یابی مدل محور می‌باشد و برای توربین بادی 47V/660KW سایت نیروگاه بادی منجیل استان گیلان صورت گرفته است و روش استفاده شده ترکیب الگوریتم تطبیقی و فیلتر کالمن می‌باشد که الگوریتم تطبیقی وظیفه‌ی مشخص‌سازی نامعینی‌های سیستم و فیلتر کالمن وظیفه‌ی یک روی‌نگر یا همان مشاهده‌گر را بر عهده دارد و مانده‌ی تولیدی نتیجه‌ی تفاضل خروجی‌ها و حالت‌های سیستم و خروجی‌ها و حالت‌های مربوط به روی‌نگر سیستم یا همان فیلتر کالمن است. در مرجع [۲] عیب‌یابی برای سنسورهای چرخشی روتور (شف‌ت سرعت پایین) و ژنراتور (شف‌ت سرعت بالا) و سنسورهای اندازه‌گیری مورد استفاده در مبدل الکترونیک قدرت توربین بادی انجام گرفته است و این

امروزه با توجه به مسائل زیست محیطی و همچنین اهمیت توجه به کاهش سطح ذخایر انرژی‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار بیشتر از قبل مورد استفاده و اقبال قرار گرفته است. از جمله این انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد می‌باشد که توسط توربین‌های بادی این انرژی بادی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد. توربین‌های بادی تجهیزات بسیار بزرگ، گران قیمت و پیچیده‌ای می‌باشند که حفظ و نگهداری این تجهیزات مساله و چالش مهمی در صنعت برق می‌باشد. یکی از راه‌کارهای بسیار مناسب جهت انجام نگهداری دقیق از توربین‌های بادی انجام عملیات عیب‌یابی برای آنها می‌باشد. منظور از انجام عملیات عیب‌یابی بررسی رفتار سیستماتیک توربین بادی و بخش‌های مختلف آن جهت پیش‌گیری از رخداد خرابی است. در عملیات عیب‌یابی، عیب‌های محتمل توربین بادی بررسی می‌شود و رخداد عیب آشکار می‌شود و در نهایت با برطرف نمودن عامل رخداد عیب، از بروز خرابی در توربین بادی جلوگیری به عمل می‌آید. سیستم‌ها با وجود عیب می‌توانند به کار خود ادامه دهند اما با رخداد خرابی در سیستم، از کار باز خواهند ماند. در حقیقت خرابی در سیستم پس از بروز عیب در سیستم اتفاق می‌افتد و بنابراین با آشکارسازی رخداد عیب در سیستم و رفع عامل مربوطه می‌توان از رخداد خرابی ممانعت کرد.

همان‌گونه که بیان شد توربین‌های بادی سیستم‌های بسیار بزرگ و پیچیده‌ای می‌باشند که این توربین‌های بادی در مرحله‌ی نخست توسط بخش آیرودینامیکی، انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و سپس در مرحله‌ی بعد انرژی مکانیکی توسط بخش مکانیکال با درایوترین به بخش الکتریکال که وظیفه‌ی تولید انرژی الکتریکی از انرژی مکانیکی را دارد، منتقل می‌شود و توسط بخش الکتریکال، انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. بخش آیرودینامیکی شامل هاب یا دماغه‌ی توربین بادی، پره‌های توربین بادی، شف‌ت سرعت پایین و یاتاقان‌های مربوطه می‌شود و نیز سیستم مکانیکی یا درایوترین از بخش‌هایی همچون شف‌ت‌های سرعت بالا و سرعت پایین، سیستم ترمز، یاتاقان‌های مربوطه و جعبه‌دنده تشکیل شده است، دیگر بخش بسیار مهم توربین‌های بادی قسمت الکتریکال می‌باشد که بخش مهم آن ژنراتور است که وظیفه‌ی تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را برعهده دارد، مبدل‌های الکترونیک قدرت، تابلوهای برق و ترانس مربوطه نیز از جمله بخش‌های مربوط به سیستم الکتریکال توربین بادی می‌باشند. در این مقاله قسمت الکتریکال توربین بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱) بخش‌های مختلف توربین بادی به تفکیک نشان داده شده است.

منظور از بررسی در قسمت قبل، انجام مدل‌سازی و عیب‌یابی سیستم توربین بادی است. مدل‌سازی بیان رفتار سیستم در قالب معادلات ریاضی یا نمودار، اشکال و مجموعه داده‌های مختلف بوده و عیب‌یابی آشکارسازی رفتار نامتعارف در سیستم که عیب خوانده می‌شود، است. مبنای انجام عملیات عیب‌یابی در سیستم‌ها تولید مانده می‌باشد، مانده به اختلاف مقادیر در رفتار واقعی سیستم و رفتار شبیه‌سازی شده‌ی سیستم گفته می‌شود. در شکل (۲) روند تولید مانده جهت انجام عملیات عیب‌یابی در این مقاله نشان داده شده است. قابل ذکر است که در حالت عدم رخداد عیب در سیستم مانده‌ی تولید شده دارای مقداری بسیار کم و در حدود صفر است ولی با رخداد عیب در سیستم مقدار مانده‌ی تولید شده

عیب‌یابی در دسته‌بندی عیب‌یابی مدل محور قرار دارد و از روش ورودی و خروجی ناشناخته یا به اختصار UIO برای انجام عملیات عیب‌یابی استفاده شده است. در مرجع [۳] عیب‌یابی جامع و کلی برای سنسورها، عملگرها و ذات سیستم توربین بادی 47V/660KW نصب شده در نیروگاه بادی منجیل استان گیلان با استفاده از روش PIO-UI بر مبنای مدل سیستم انجام گرفته است. قابل ذکر است که توربین‌های بادی مرجع‌های [۱] و [۳] از یک نوع توربین بادی می‌باشند و به عبارت دیگر برای توربین‌بادی منجیل چندین روش انجام عیب‌یابی صورت گرفته است. در مرجع [۴] برای توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم عملیات عیب‌یابی انجام شده است و در این مقاله یک روش جدید انجام عیب‌یابی صورت پذیرفته است، عنوان این روش توسط بینگینگ کیو و همکارانش «تراژکتوری جریان نرمالیزه شده بر مبنای سرعت باد» نام‌گذاری شده است. این روش عیب‌یابی بر مبنای سیگنال می‌باشد و در واقع روش عیب‌یابی سیگنال محور می‌باشد و با مقایسه تراژکتوری جریان نرمالیزه با بردار تراژکتوری جریان در مورد رخداد و عدم رخداد عیب تصمیم‌گیری می‌کند. در واقع عیب‌یابی صورت گرفته در این مقاله برای آشکارسازی عیب در کانورتر ژنراتور بوده و به عیب‌یابی مدار IGBT کانورتر می‌پردازد و بردار جریان‌های نرمالیزه شده حالت‌های مورد استفاده برای تحلیل رخداد و عدم رخداد عیب است. در مرجع [۵] عملیات عیب‌یابی داده محور برای عملگرهای سیستم چرخش پرهی توربین بادی و همچنین برای سنسورهای مورد استفاده در سیستم خنک‌کاری با استفاده از روش هوشمند الگوریتم SDW-LSI انجام شده است. در مرجع [۶] عیب‌یابی توربین بادی با استفاده از قوی‌ترین رویکرد مربوط به خانواده‌ی فیلترهای کالمن، یعنی فیلتر کالمن توسعه یافته یا به اختصار EKF صورت گرفته است، در این مقاله عیب‌یابی بر مبنای مدل سیستم توربین بادی می‌باشد و عیب‌یابی به جهت مشخص‌سازی رخداد و عدم رخداد عیب در عملگر سیستم زاویه گام پره، سنسور سنجش سرعت روتور و نیز سنسور سنجش سرعت ژنراتور انجام شده است. همان‌گونه که اشاره شد، در این مقاله عیب‌یابی برای دو بخش از قسمت‌های محتمل برای رخداد عیب، یعنی بخش عملگرها و سنسورها اعمال شده است. در مرجع [۷] عیب‌یابی مربوط به سیستم انتقال قدرت توربین بادی با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه یا به اختصار MLP انجام گرفته است، هرچند شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به خوبی توانسته عیب‌یابی مربوطه را انجام دهد، اما استفاده از آن دارای خطای مدل‌سازی زیادی می‌باشد که برای عیب‌یابی دقیق این روش پیشنهاد نمی‌گردد چرا که در همین مقاله روش دیگری از شبکه‌های هوشمند عصبی بیان شده و با این روش مقایسه گردیده است و نتایج مطلوب‌تری حاصل شده است که در ادامه به این موضوع پرداخته شده است. مرجع [۸] انجام عملیات عیب‌یابی توربین بادی را با استفاده از سه شبکه عصبی، MLP، RBF و RBFE انجام داده و نتایج مدل‌سازی و خطاهای مدل‌سازی را برای هر سه روش محاسبه نموده و مشخص گردیده است که شبکه عصبی RBFE نتایج بهتر و قابل قبول‌تری ارائه داده است و این عیب‌یابی انجام گرفته برای سنسورهای توربین بادی و بر اساس داده‌های دریافتی از سایت نیروگاه بادی مورد نظر بوده است.

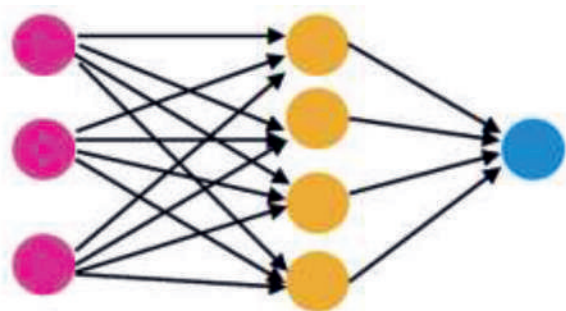
پس از مروری مختصر بر کارهای انجام شده‌ی قبلی در حوزه‌ی عیب‌یابی توربین‌های بادی، به تشریح روند نگارش مقاله

می‌پردازیم:

ما در این مقاله به عیب‌یابی زیربخش سیستم الکتریکیال توربین بادی (سنسور سرعت مربوط به ژنراتور توربین بادی) خواهیم پرداخت، عملیات عیب‌یابی که در این مقاله به دنبال آن هستیم از نوع عیب‌یابی بر مبنای داده‌های واقعی دریافت شده از سایت نیروگاه بادی کهک استان قزوین می‌باشد به عبارت دیگر عیب‌یابی داده محور و برای سنسور سیستم می‌باشد. در این مقاله از شبکه‌ی عصبی SVR و MLP برای انجام عملیات مدل‌سازی و عیب‌یابی توربین بادی استفاده می‌شود و در ادامه به معرفی شبکه‌های عصبی مورد استفاده می‌پردازیم و سپس در چند مرحله شبیه‌سازی انجام داده و نتایج را بررسی و تحلیل خواهیم کرد و در آخر نتیجه‌گیری آورده خواهد شد. همان‌گونه که پیش از این اشاره شده شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

۲- معرفی شبکه‌ی عصبی MLP و SVR

شبکه‌های عصبی مصنوعی واحدهای حافظه‌داری می‌باشند که می‌تواند اطلاعات را به‌صورت لحظه‌ای و یا دوره‌ای ذخیره کرده و برای مشخص‌سازی رفتار بعدی و آتی سیستم از آن‌ها استفاده کنند. شبکه‌های عصبی را می‌توان به دو بخش عمده‌ی شبکه‌های عصبی استاتیکی و دینامیکی طبقه‌بندی کرد که شبکه‌های عصبی استاتیکی را شبکه‌های عصبی پیشرو نیز می‌نامند. در شکل (۳) ساختار شبکه عصبی استاتیکی - پیشرو آورده شده است.



شکل ۳: ساختار شبکه عصبی پیشرو

شبکه‌های عصبی استاتیکی را می‌توان به‌عنوان شبکه‌های بدون حافظه یا به‌صورت واضح‌تر شبکه‌هایی که خروجی آن‌ها تابعی از ورودی لحظه‌ای حال باشد در نظر گرفت. در شبکه‌های عصبی استاتیکی سه فاز یادگیری، تایید و آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبکه‌های عصبی استاتیکی برای مسائل غیرخطی و مدل کردن سیستم‌های غیرخطی و پیچیده، با توانایی و انعطاف بالا بسیار مورد استفاده می‌باشند. مزیت شبکه‌های عصبی استاتیکی این است که شبکه به راحتی می‌تواند با یک الگوریتم بهینه‌سازی ساده ساخته شود [۱۱].

در این مقاله از دو شبکه عصبی MLP و SVR استفاده شده است که در ادامه به معرفی هریک می‌پردازیم. یکی از شبکه‌ی عصبی مورد استفاده در این مقاله، شبکه‌ی عصبی SVR می‌باشد. شبکه‌های چند لایه‌ی پیشرو یکی از مهم‌ترین ساختارهای شبکه عصبی مصنوعی هستند و به‌طور معمول این شبکه‌ها شامل مجموعه‌ای از نرون‌ها می‌باشند که شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان است. سیگنال ورودی در خلال شبکه و در مسیری رو به جلو به‌صورت لایه به لایه منتشر می‌شود [۱۲]. شبکه

در ادامه فرمولاسیون مربوط به شبکه عصبی پرسپترون چند لایه آورده شده است.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^N \omega_i^T \varphi_i(x) + b \quad (8)$$

$$e = y - \hat{y} \quad (9)$$

که در آن $\mathcal{Y}$ خروجی سیستم، $\hat{\mathcal{Y}}$ خروجی مدل سازی، ω_i^T وزن های شبکه ی عصبی، تابع ورودی های سیستم، b مقدار بایاس و e خطای مدل سازی می باشد. تابع هدف برای این شبکه ی عصبی به قرار زیر تعریف می شود [۱۳].

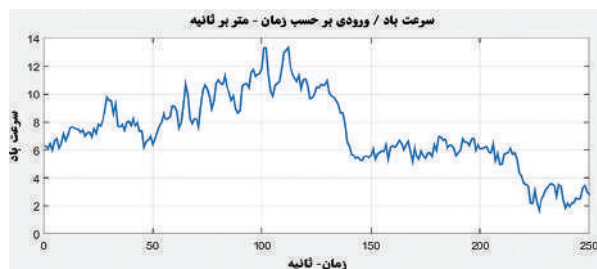
$$J = \min \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \min \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

۳- بیان سیستم توربین بادی

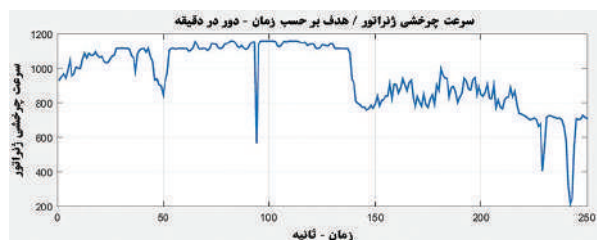
داده های مورد استفاده در این مقاله با نرخ نمونه برداری هایی با فاصله ی زمانی ۵ دقیقه و به تعداد ۵۰۰ داده می باشد. این داده ها مربوط به سرعت چرخشی ژنراتور توربین بادی و نیز سرعت باد است. سرعت باد به عنوان ورودی و سرعت چرخشی ژنراتور نیز به عنوان هدف برای شبکه عصبی مورد نظر تعریف شده است. در ادامه شکل های مربوط به ورودی و هدف شبکه عصبی آورده شده است. برای بیان سیستم ها روش های مختلفی همانند بیان سیستم با معادلات ریاضی و بیان سیستم با داده های دریافتی از آن سیستم وجود دارد و در این پژوهش نیز از مجموعه داده های سیستم واقعی برای بیان سیستم استفاده شده است. برای انجام مدل سازی و عیب یابی سیستم الکتریکی توربین بادی نصب شده در نیروگاه بادی کهک از داده هایی همانند داده های ترسیم شده در شکل های (۵) و (۶) استفاده شده است.

۴- مدل سازی و شبیه سازی بخش الکتریکی

مدل سازی توسط شبکه ی عصبی در ادامه آورده شده است، برای مدل سازی زیربخش الکتریکی توربین بادی توسط شبکه ی عصبی،

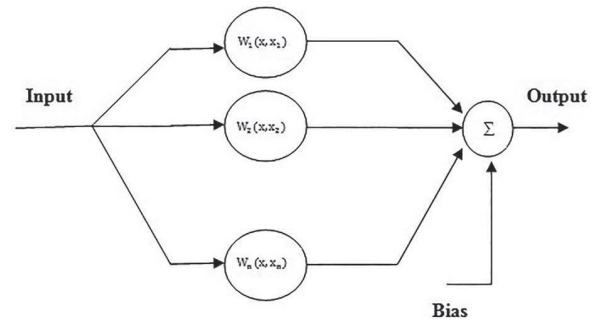


شکل ۶: سرعت باد به عنوان ورودی شبکه عصبی



شکل ۷: سرعت چرخشی ژنراتور به عنوان هدف شبکه عصبی

عصبی SVR یک شبکه ی عصبی استاتیکی پیشرو و با سرپرست یا نظارتی می باشد. در شکل (۴) ساختار شبکه عصبی SVR آورده شده است.



شکل ۴: ساختار شبکه عصبی SVR

در ادامه فرمولاسیون مربوط به شبکه عصبی SVR قابل رویت است.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^N \omega_i^T(x, x_i) \varphi_i(x) + b \quad (1)$$

$$e = y - \hat{y} \quad (2)$$

که در آن $\mathcal{Y}$ خروجی سیستم، $\hat{\mathcal{Y}}$ خروجی مدل سازی، ω_i^T وزن های شبکه ی عصبی، $\varphi_i(x)$ تابع ورودی های سیستم، b مقدار بایاس و e خطای مدل سازی می باشد. تابع هدف برای این شبکه ی عصبی به قرار زیر تعریف می شود.

$$J = \min \frac{1}{2} \omega^T \omega + C \sum_{i=1}^N (\zeta_i^+ + \zeta_i^-) \quad (3)$$

به طوری که شروط ۴ تا ۷ برقرار باشد:

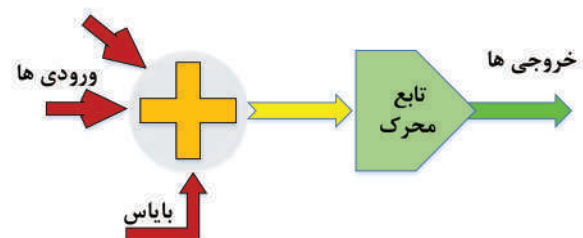
$$-\hat{y}_i + y_i + \varepsilon + \zeta_i^+ \geq 0 \quad \forall i \quad (4)$$

$$\hat{y}_i - y_i + \varepsilon + \zeta_i^- \geq 0 \quad \forall i \quad (5)$$

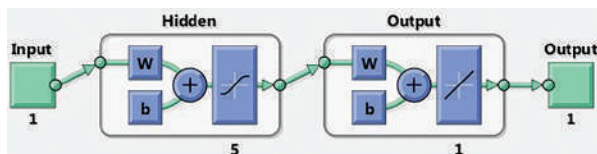
$$\zeta_i^+ \geq 0 \quad \forall i \quad (6)$$

$$\zeta_i^- \geq 0 \quad \forall i \quad (7)$$

یکی دیگر از شبکه های عصبی مورد استفاده در این مقاله شبکه عصبی MLP می باشد که در ادامه به معرفی این شبکه عصبی می پردازیم. شبکه عصبی MLP یک شبکه ی عصبی استاتیکی پیشرو و با سرپرست یا نظارتی می باشد [۱۴ و ۱۵]. در شکل (۵) ساختار شبکه عصبی MLP آورده شده است.

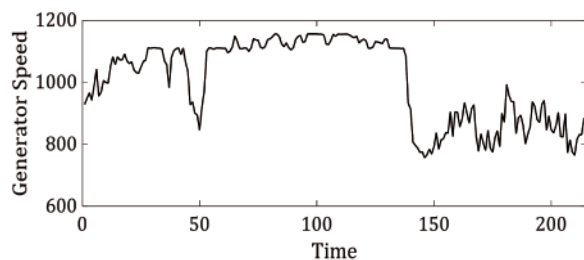


شکل ۵: ساختار شبکه عصبی MLP

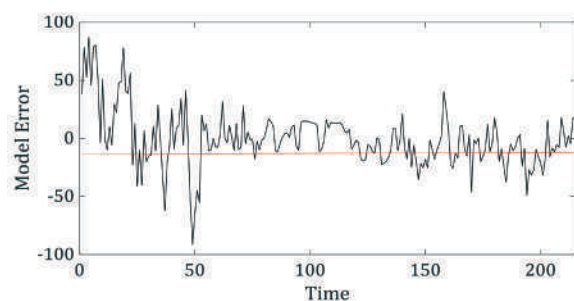


شکل ۱۱: ساختار شبکه عصبی MLP مورد استفاده

شکل (۱۱) ساختار شبکه عصبی MLP در نرم افزار متلب را نشان می دهد. لایه ی پنهان در واقع لایه هایی از شبکه عصبی هستند که محاسبات و آموزش های مربوط به شبکه عصبی در آن ها صورت می گیرد. مشخص سازی تعداد لایه های پنهان در هر شبکه عصبی به صورت سعی و خطا صورت می پذیرد، هر چند برای محاسبه ی تعداد این لایه های پنهان نیز روش بهینه سازی وجود دارد ولی استفاده از روش سعی و خطا راحت تر می باشد.



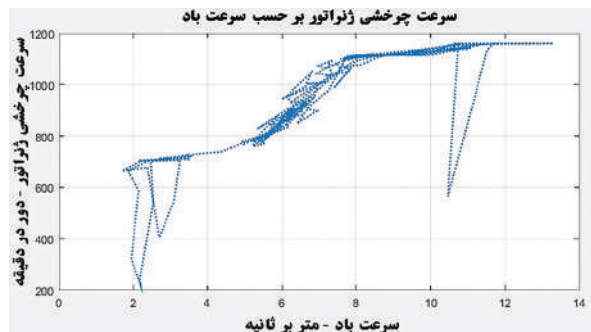
شکل ۱۲: مدل سازی بخش الکتریکی با شبکه عصبی MLP



شکل ۱۳: خطای مدل سازی با شبکه عصبی MLP

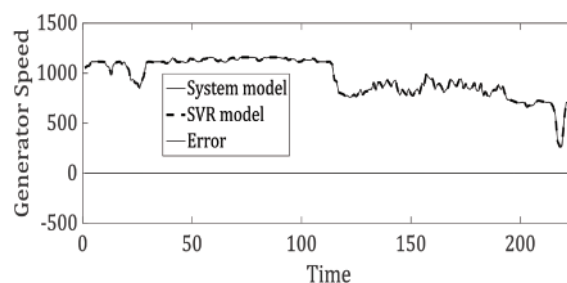
شکل های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مربوط به مدل سازی و خطای مدل سازی با استفاده از شبکه عصبی MLP می باشد، همان گونه که در شکل (۱۳) به وضوح مشخص است، میزان خطای مدل سازی مقدراری به مراتب بیشتر از مقدار خطای مدل سازی توسط شبکه عصبی SVR می باشد و این موضوع بیان گر ضعف شبکه عصبی MLP در مقابل شبکه عصبی SVR است.

با توجه به عدم کارکرد و مدل سازی دقیق شبکه عصبی MLP به عیب یابی سیستم الکتریکی توربین بادی با استفاده از این شبکه نخواهیم پرداخت و در ادامه با اعمال عیب فرضی به سیستم می بایست توسط شبکه عصبی SVR رخداد عیب تشخیص داده شود و تشخیص رخداد عیب نیز توسط مانده ی تولید شده امکان پذیر است، به گونه ای که می بایست با رخداد عیب مقدار مانده جهش یافته و مقداری به مراتب بیشتر از صفر گردد. عیب فرضی اعمال شده در این مقاله تابع پله با دامنه ی ۱۰۰ و زمان جهش ۷۵ ثانیه می باشد. در شکل (۱۴) مانده ی تولید شده در حالت رخداد عیب آورده شده است. انتخاب حد آستانه ای بر مبنای اندازه ی عیب وارد شده به سیستم الکتریکی می باشد و مقدار آن از رابطه ی زیر محاسبه می گردد:

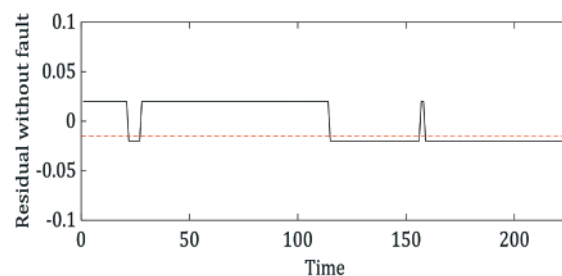


شکل ۸: سرعت چرخشی ژنراتور بر حسب سرعت باد

از یک شبکه ی عصبی SVR و همچنین شبکه عصبی MLP استفاده شده است، به دلیل وجود تنها یک مجموعه ورودی و تنها یک مجموعه خروجی، لایه ی ورودی و خروجی شبکه ی عصبی ساخته شده، تک لایه است.



شکل ۹: مدل سازی بخش الکتریکی با شبکه عصبی SVR



شکل ۱۰: مانده تولیدی در حالت عدم رخداد عیب با شبکه عصبی SVR

شکل (۹) مربوط به مدل سازی سیستم الکتریکی توربین بادی با استفاده از شبکه عصبی SVR می باشد، همان گونه که در شکل مشخص است مدل واقعی سیستم و مدل حاصل از شبکه عصبی SVR به خوبی منطبق هستند و همان طور که در شکل نشان داده شده است، میزان اختلاف این دو مقدار تقریباً برابر صفر می باشد که این خود نشان دهنده ی نخست سالم بودن و عدم رخداد عیب در سیستم و نیز بیان گر دقت مدل سازی انجام شده توسط این شبکه عصبی است.

شکل (۱۰) نشان دهنده ی مقدار مانده است، همان گونه که پیش از این بیان شد باقیمانده مبنای تشخیص رخداد و عدم رخداد عیب است، در این شکل باقیمانده در حدود صفر بوده که بیانگر عدم رخداد عیب است.

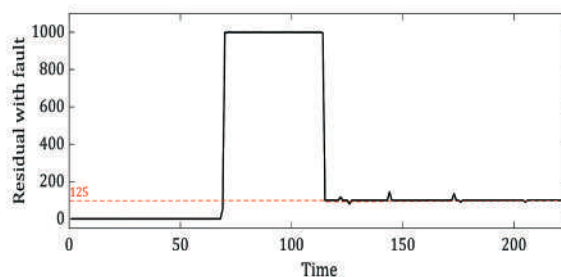
گواه آن است که شبکه عصبی SVR بسیار دقیق تر و کارآتر از شبکه عصبی MLP می باشد. همان گونه که مشاهده گردید، میزان میانگین مجموع مربعات خطا، مجذور میانگین مربعات خطا و مجموع مربعات خطا مربوط به مدل سازی با شبکه عصبی SVR به مراتب بسیار کمتر از مدل سازی با شبکه عصبی MLP می باشد. بنابراین می توان ادعا نمود که شبکه عصبی SVR روشی بسیار مناسب جهت مدل سازی و نهایتاً عیب یابی سیستم توربین بادی بوده است چراکه هر چقدر میزان خطاهای یاد شده کمتر باشد، نشان گر دقت بالای روش مورد نظر است و همچنین از این روش نه تنها برای توربین باد، بلکه برای سایر سیستم ها نیز می توان استفاده نمود.

مراجع

- [1] مجتبی حیدرزاده قهرورن، علیرضا یزدی زاده، مصطفی عابدی، (۱۳۹۶) «عیب یابی توربین بادی 47V/660kW با استفاده از الگوریتم تطبیقی MIT-Rule و فیلتر کالمن»، کنفرانس انرژی باد، تهران، ایران، ۹ و ۸ مهر.
- [2] F. Odgaard And J. Stoustrup (2010) Unknown Input Observer Based Detection of Sensor Fault in a Wind Turbine, "IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE, Yokohama, Japan, Septam. 8-10
- [3] Sh. Asgari And A. Yazdizadeh (2017) Robust model-based fault diagnosis mechanical drive train in V47/660kW wind turbine "Springer on Energy system, Vol10, NO. 1007 January.
- [4] Y. Oiu, H. Jiang, Y. Feng, M. Cao, Y. Zhao and D. Li, (2016) "A New Fault Diagnosis Algorithm for PMSG Wind Turbine Power Converter under Variable Wind Speed Condition", energies, Vol. 9, NO. 548, July.
- [5] D. Wu, W. Liu, J. Song, and Y. Shen, (2016) "Fault Estimation and Fault Tolerant Control of Wind Turbines Using the SDW-LSI Algorithm", IEEE, Vol. 4, Septam. pp. 7223 – 7231.
- [6] M. Heidarzadeh Ghareveran, A. Yazdizadeh (2018) "Model-Based Fault Detection of V47/660kW Wind Turbines with Extended Kalman Filter", International Energy Conference (IEC), Tehran, Iran, Vol. 12, Junary.
- [7] مجتبی حیدرزاده قهرورن و علیرضا یزدی زاده (۱۳۹۷) «عیب یابی سیستم انتقال قدرت توربین بادی با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه»، کنفرانس انرژی باد، تهران، ایران، ۲۴ و ۲۵ مهر، دوره ۶.
- [8] مجتبی حیدرزاده قهرورن، علیرضا یزدی زاده، (۱۳۹۷) «مدل سازی و عیب یابی توربین بادی با استفاده از شبکه های عصبی MLP, RBF, RBF و مقایسه ای مدل سازی های انجام شده»، نشریه ی مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۴.
- [9] M. Singh, E. Muljadi, J. Jonkman, and V. Gevorgian, (2014) Simulation for Wind Turbine Generator - With FAST and MATLAB – Simulink Modules, 1th ed., NREL, Denver West Parkway Golden.
- [10] K.S. Narendra and K. Parthasarathy (1990) "Identification and control of dynamical systems using neural networks," Neural Networks IEEE Transactions on, NO.1, 4-27.
- [11] A. Yazdizadeh, K. Khorasani, and R. V. Patel, (2000) "Identification of a two-link flexible manipulator using adaptive time delay neural networks," Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, Vol. 30, pp. 165-172.
- [12] A. Yazdizadeh and K. Khorasani, (2002) "Adaptive time delay neural network structures for nonlinear system identification," Neurocomputing, Vol. 47, pp. 207-240.
- [13] R. K. Ibrahim, J. Weinert, S. J. Watson, (2018) "Neural Networks for Wind Turbine Fault Detection via Current Signature Analysis", No. 64, Vol. 70, pp. 208 – 220.
- [14] Sh. Yin, G. Wang, H. R. Karimi, (2013), "Data-driven design of robust fault detection system for wind turbines", No. 14, Vol. 3, Issue 2, pp. 1025 – 1043.
- [15] H. Jurgen, N. Esmaili, (2017) "Wind Turbine Fault Detection based on Artificial Neural Networks Analysis of SCADA data", S.Mærsk Mc-Kinney Møller Institute, University of Southern Denmark.

$$TH = \frac{\|f\|}{2}$$

که در این رابطه $\|f\|$ اندازه ی عیب وارد شده به سیستم است.



شکل ۱۴: مانده تولید شده در حالت رخداد عیب با شبکه عصبی SVR

همان گونه که مشخص است مقدار مانده در زمان اعمال عیب دچار جهش شده و بیانگر رخداد عیب در سیستم می باشد. برای مشخص سازی دقت مدل سازی انجام شده به معرفی و محاسبه ی MSE، RMSE و SSE می پردازیم. MSE میانگین مجموع مربعات خطا. RMSE مجذور میانگین مجموع مربعات خطا. SSE مجموع مربعات خطا.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2$$

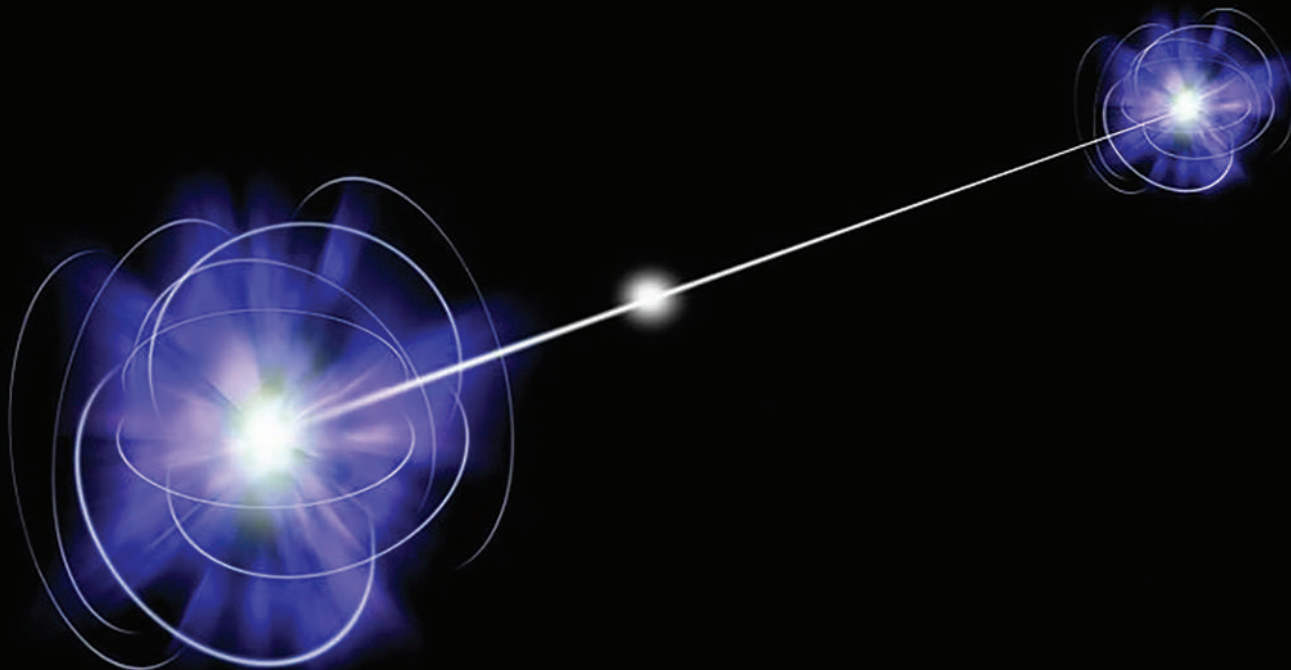
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (e_i)^2$$

که مقادیر این پارامترها در روش SVR به ترتیب، ۰/۰۰۰۰۴، ۰/۰۲۰۰ و ۰/۰۹۰۴ می باشد که این مقادیر نشان دهنده ی دقت بسیار بالای مدل سازی انجام شده است. در روش MLP نیز، ۵۵/۴۷۰، ۲۲/۱۴۱۷ و ۵۳۵۴ e+۳ است و با مقایسه ی اعداد مربوط به میزان انواع مختلف خطاها، به این مهم خواهیم رسید که دقت و کارآیی شبکه های عصبی SVR بسیار بالاتر از شبکه های عصبی MLP است.

۵- نتیجه گیری

در اینجا از شبکه های عصبی مصنوعی SVR و MLP برای مدل سازی زیربخش الکتریکال توربین بادی، با استفاده از داده های واقعی استفاده شده است. تولید مانده و در نتیجه آشکار سازی عیب توسط این نوع از شبکه های عصبی مصنوعی به خوبی صورت گرفته است. بنابراین از این الگوریتم هوشمند می توان به همراه یک تصمیم گیر موازی، به عنوان یک روش بسیار قابل اطمینان در تشخیص انواع مختلف عیب های سنسوری، عملگری و سیستمی بهره گرفت. همچنین مقایسه ی بین دو شبکه عصبی نام برده شده



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی

منیره هوشمند، گروه مهندسی برق، دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)، مشهد، ایران، m.hooshmand@imamreza.ac.ir

چکیده

پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی یکی از مهم‌ترین پروتکل‌های اطلاعات کوانتومی است. در این پروتکل، به کمک درهم‌تنیدگی کوانتومی و کانال کلاسیک، حالت یک ذره کوانتومی بدون پیمایش فاصله فیزیکی از فرستنده به گیرنده منتقل می‌شود. مخابره از راه دور کوانتومی، واحد سازنده پروتکل‌های رمزنگاری کوانتومی، محاسبات کوانتومی و شبکه‌های کوانتومی است. از این رو پس از پیشنهاد ایده‌های اولیه پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی در سال ۱۹۹۳، تلاش‌های بسیاری در مباحث نظری و پیاده‌سازی این پروتکل تاکنون صورت گرفته است. در پژوهش پیش‌رو، پس از معرفی و دسته‌بندی ایده‌های نظری پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی، به بررسی پیاده‌سازی‌های عملی این پروتکل می‌پردازیم. در ادامه الزامات فناوری مورد نیاز به همراه نقاط ضعف و قوت هر کدام ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: تشدید مغناطیسی هسته‌ای، سیستم‌های حالت جامد، فوتون، مخابره از راه دور کوانتومی.

An overview of quantum teleportation protocols

Monireh Houshmand, Electrical Engineering Department, Imam Reza International University, Mashhad, Iran, m.hooshmand@imamreza.ac.ir

Abstract

Quantum teleportation protocol is one of the most important quantum information protocols. In this protocol, with the help of quantum entanglement and the classical channel, the state of a quantum particle is transmitted without traveling the physical distance from the sender to the receiver. Quantum teleportation, is the building block of quantum cryptographic protocols, quantum computing, and quantum networks. Therefore, since the initial ideas of the quantum teleportation protocol were proposed in 1993, many efforts have been made in the theoretical discussions and implementation of this protocol. In the present study, after introducing and classifying the theoretical ideas of quantum communication protocol, we will examine the practical implementations of this protocol. Next, the required technology requirements are presented along with the strengths and weaknesses of each.

Keywords: Nuclear Magnetic Resonance, Solid State Systems, Photon, Quantum Teleportation

در فواصل دور بهره گرفت. از آنجا که مخابره از راه دور کوانتومی با مبنای ارسال اطلاعات کلاسیک تحقق می‌پذیرد، سرعت این نوع مخابره نیز محدود به سرعت نور است. مخابره از راه دور کوانتومی در ابتدا با فوتون‌های منفرد محقق شد اما در ادامه در سیستم‌های ماده‌ای متعدد از قبیل اتم‌ها، یون‌ها، الکترون‌ها و مدارات ابررسانا نیز محقق گردید [۹]. تاکنون مخابره از راه دور کوانتومی در ابعاد بزرگتر از مولکول گزارش نشده است [۱۰]. در پژوهش پیش‌رو پس از معرفی پروتکل اولیه مخابره از راه دور کوانتومی، به معرفی، دسته‌بندی و ارزیابی انواع مشتقات دیگر این پروتکل می‌پردازیم سپس پروژه‌های پیاده‌سازی شده این پروتکل معرفی می‌گردد. در ادامه انواع فناوری‌های قابل استفاده در پیاده‌سازی این پروتکل‌ها به همراه نقاط قوت و ضعف هر کدام معرفی می‌شود.

۲- مروری بر مکانیک کوانتومی

در دنیای کلاسیک همه اطلاعات اعم از حروف و اعداد با مجموعه‌ای از بیت‌ها به کامپیوتر داده می‌شود. هر بیت در هر لحظه مقداری برابر با صفر، یا مقداری برابر با یک دارد. واحد اطلاعات در کامپیوترهای کوانتومی، کیوبیت^۱ (مخفف کوانتوم بیت)، نامیده می‌شود که تحقق عملی آنها می‌تواند بر اساس الکترون‌ها، فوتون‌ها و ... باشد. بر خلاف بیت، کیوبیت‌ها می‌توانند چندین حالت را در یک لحظه اختیار کنند. این خاصیت فیزیکی در مکانیک کوانتومی، برهم‌نهی^۱ نامیده می‌شود. حالت یک کیوبیت با بردار

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \alpha, \beta \in \mathbb{C}, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1,$$

توصیف می‌شود که

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

به‌عنوان مثال فرض کنیم در دنیای کلاسیک، ۳ واحد حافظه داریم که هر کدام توانایی ذخیره یک بیت را دارند. این سه حافظه در کنار هم ۸ حالت، یعنی از اعداد ۰ (۰۰۰) تا عدد ۷ (۱۱۱) را به باینری نمایش خواهند داد که در هر لحظه فقط یکی از این حالت‌ها وجود خواهد داشت. ولی در سیستم‌های کوانتومی در همین سه حافظه که کیوبیت‌ها را ذخیره می‌کنند، تمام این ۸ حالت می‌توانند هم‌زمان موجود باشند. به همین علت، ۳ حافظه کوانتومی می‌تواند تمامی ۸ حالت را در یک لحظه محاسبه و پردازش کند. از این خاصیت، به‌عنوان محاسبات موازی نام برده می‌شود. حال اگر یک سیستم کوانتومی با n واحد حافظه در نظر بگیریم، چنین سیستمی، همانند سیستم بالا، می‌تواند 2^n حالت را هم‌زمان داشته و برای همه حالات به‌صورت هم‌زمان محاسبه انجام دهد. اما، وقتی این سیستم مشاهده یا اندازه‌گیری می‌شود، حالت سیستم تغییر کرده و با یک توزیع احتمال مشخص، به یکی از این 2^n حالت سقوط می‌کند.

درهم‌تنیدگی کوانتومی خاصیتی از سیستم کوانتومی با دو یا تعداد بیشتری جز است که در آن اجزا سیستم به یکدیگر جفت شده‌اند، به طوری که یک جز سیستم را بدون در نظر گرفتن کل سیستم نمی‌توان توصیف کرد، حال حتی اگر این اجزا را کیلومترها از یکدیگر دور کنیم، تغییر در یک جز به صورت بلافاصله، در اجزا دیگر نیز تغییر ایجاد می‌کند. تحول هر ذره کوانتومی یا گیت کوانتومی با یک ماتریس یکانی U محقق می‌شود. ماتریس

در سال ۱۹۶۵، گوردون مور^۱، یکی از بنیانگذاران کمپانی اینتل، اظهار کرد تعداد ترانزیستورهای روی یک مدار مجتمع به‌طور تقریبی هر دو سال یک‌بار دو برابر می‌شود. نظریه مور در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی تا حدودی درست بود. اما از ابتدای دهه ۸۰ میلادی و با سرعت گرفتن این پیشرفت‌ها، شباهت و پرسش‌هایی در محافل علمی مطرح شد که این کوچک‌سازی‌ها تا کجا می‌توانند ادامه پیدا کنند؟ کوچک کردن ترانزیستورها و مجتمع کردن آنها در فضای کمتر نمی‌تواند تا ابد ادامه داشته باشد زیرا در حدود ابعاد نانومتری اثرات کوانتومی از قبیل تونل‌زنی الکترونی بروز می‌کنند [۱]. گرچه همیشه فناوری چندین گام بزرگ از نظریه عقب است، بسیاری از دانشمندان در زمینه‌های مختلف به فکر رفع این مشکل تا زمان رشد فناوری به حد مورد نظر افتادند. به این ترتیب بود که برای نخستین بار در سال ۱۹۸۲، ریچارد فاینمن^۲ استاد فیزیک و برنده جایزه نوبل، پیشنهاد کرد که باید محاسبات را از دنیای دیجیتال وارد دنیای جدیدی به نام محاسبات کوانتومی کرد که بسیار متفاوت از قبلی بوده و نه تنها مشکلات گذشته و محدودیت‌های موجود را بر طرف می‌سازد، بلکه افق‌های جدیدی را نیز به این مجموعه اضافه می‌کند. در واقع هدف محاسبات کوانتومی یافتن روش‌هایی برای طراحی دوباره ادوات شناخته شده محاسبات (مانند گیت‌ها و ترانزیستورها) به گونه‌ای است که بتوانند تحت اثرات کوانتومی که در محدوده ابعاد نانومتری و کوچک‌تر بروز می‌کنند، کار کنند. در فیزیک کوانتومی رفتارهای شگفت‌انگیزی از ذرات دیده می‌شود که نسخه متناظر کلاسیکی برای آنها وجود ندارد، از مهم‌ترین آنها می‌توان از محاسبات موازی، اندازه‌گیری احتمالاتی کوانتومی و درهم‌تنیدگی^۳ نام برد [۱]. یافتن روشی کارآمد برای ارسال ذرات کوانتومی بین دو گره در یک شبکه [۳] یک هدف اصلی در علم محاسبات و اطلاعات کوانتومی [۲، ۳] است. اینترنت کوانتومی [۴] بستر پردازش اطلاعات نسل بعدی است که نوید مخابره امن و افزایش نمایی سرعت در محاسبات توزیع شده^۴ را می‌دهد. توزیع اطلاعات کوانتومی در فواصل طولانی یک مولفه اصلی برای تحقق این بستر جهانی است. یک روش برای حصول به این هدف، ارسال مستقیم یا جابجایی فیزیکی حالات است. از آنجا که بازدهی ارسال به صورت نمایی با فاصله بین گره‌ها کاهش می‌یابد، در فواصل طولانی، اتلاف‌های شدید این سناریو را غیرعملی می‌کند. در خصوص مخابرات کلاسیک راه حل آسان است. حالت می‌تواند در گره‌های میانی، تقویت شود. همچنین حالت می‌تواند کپی گردد که چنانچه، در ارسال از دست رفت، مجدداً آن را ارسال کرد. اما در مکانیک کوانتومی کپی کردن حالت امکان‌پذیر نمی‌باشد [۵]. برای حل این چالش می‌توان از مخابره از راه دور کوانتومی^۵ بهره گرفت. در مخابره از راه دور کوانتومی، یک حالت کوانتومی نامعلوم با کمک دو پارامتر درهم‌تنیدگی کوانتومی و ارسال اطلاعات کلاسیک از فرستنده به گیرنده بدون طی مسیر منتقل می‌شود. از آنجا که در مخابره از راه دور کوانتومی کیوبیت حاوی اطلاعات بر روی کانال ارسال نمی‌شود، بنابراین امکان حمله دشمن به اطلاعات وجود ندارد. بنابراین از این پروتکل در بسیاری از پروتکل‌های رمزنگاری کوانتومی [۶] می‌توان استفاده کرد. از طرف دیگر، مخابره از راه دور کوانتومی پیش نیاز جابجایی در هم‌تنیدگی^۶ [۷] است که به همراه حافظه کوانتومی و تغلیظ در هم‌تنیدگی^۷، تکرارگر^۸ کوانتومی [۸] را تولید می‌کنند که از آن می‌توان برای توزیع در هم‌تنیدگی

U ماتریسی است که معکوس آن با ترانهاده مزدوج آن ماتریس یکسان است. دو گیت مورد استفاده در پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی به شرح زیر است.

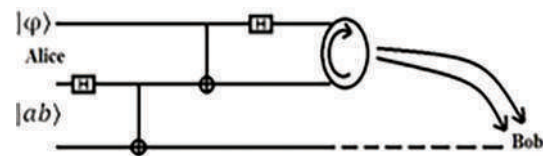
$$H = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

۳- پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی

در این بخش از مقاله ابتدا پروتکل اولیه مخابره از راه دور کوانتومی تشریح شده سپس سایر پروتکل‌های مشتق شده از این پروتکل بیان و ارزیابی می‌شوند.

۳-۱- پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی پایه

در سال ۱۹۹۳ چارلز بنت و همکاران^{۱۶}، نخستین پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی را پیشنهاد کردند [۱۱]. در مخابره از راه دور کوانتومی پیشنهادی، یک حالت ناشناخته و دلخواه کوانتومی تک کیوبیتی به نام $|\varphi\rangle$ از آلیس (فرستنده) به باب (گیرنده) بدون طی مسیر، منتقل می‌شود. برای تحقق این هدف، ارتباط کلاسیک و توزیع در هم‌تنیدگی مورد نیاز است. مدار مخابره از راه دور کوانتومی بدین صورت است که یکی از چهار حالت EPR انتخاب شده و بین آلیس و باب منتشر می‌شود. پس از آن آلیس گیت‌هایی را بر کیوبیت‌های خود اعمال کرده و سپس اندازه‌گیری می‌کند و نتایج اندازه‌گیری خود را با استفاده از کانال کلاسیک به باب می‌فرستد. باب با استفاده از اطلاعات کلاسیک ارسالی آلیس، با اعمال عملگر مناسب بر کیوبیت دست خود، حالت $|\varphi\rangle$ را بازسازی می‌کند. جزییات پروتکل مخابره از راه دور به شرح شکل (۱) است.



شکل ۱: مدار اصلی مخابره از راه دور کوانتومی

در شکل (۱)، فرض کنیم $|ab\rangle = |00\rangle$ است که بر طبق آن خروجی مدار (گیت هادامارد بر کیوبیت اول و سپس گیت CNOT) به صورت $|B_{00}\rangle_{ab} = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$ است. این حالت بین آلیس و باب به اشتراک گذاشته می‌شود به این صورت که کیوبیت نخست آن که با a نشان داده شده، دست آلیس و کیوبیت دوم آن که با b نشان داده شده دست باب قرار می‌گیرد (توزیع در هم‌تنیدگی). سپس آلیس و باب از یکدیگر دور می‌شوند.

حال فرض کنیم حالت نامعلوم تک کیوبیتی $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ قرار است به باب منتقل شود. در این مرحله، آلیس گیت‌های دیگر مدار مخابره از راه دور، گیت CNOT و در ادامه گیت هادامارد را بر کیوبیت اول اعمال می‌کند. در ادامه آلیس بر دو کیوبیت خود در پایه محاسباتی اندازه‌گیری کرده و نتیجه را بر روی کانال کلاسیک برای باب ارسال می‌کند. باب با توجه به جدول از پیش تعیین‌شده‌ای بر کیوبیت دست خود گیت پائولی مناسب را اعمال کرده و بدین ترتیب حالت در دست او به حالت $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ تغییر می‌یابد.

پس از ارائه نخستین طرح مخابره از راه دور کوانتومی، پروتکل‌های

فراوانی با کانال‌های مختلف و تعداد کیوبیت منتقل شده متفاوت ارائه گردید. در [۱۲، ۱۳] پروتکل مخابره از راه دور با کانال حالات W، در [۱۴، ۱۵] بر مبنای کانال سه کیوبیتی، در [۱۶-۱۸] بر مبنای حالات GHZ-Like و در [۱۹] بر مبنای حالات پنج کیوبیتی، ارائه گردید. سپس در [۲۰] و [۲۱] حالات دو کیوبیتی، در [۲۲] حالت دو کیوبیتی و در [۲۳] حالت GHZ منتقل گردید. در ادامه به بررسی انواعی از مخابره از راه دور کوانتومی، مخابره از راه دور کوانتومی کنترل و مخابره از راه دور کوانتومی دو طرفه می‌پردازیم.

۳-۲- پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی کنترلی

در این نوع از مخابره از راه دور علاوه بر فرستنده و گیرنده، کاربر یا کاربران دیگری به‌عنوان کنترلر وجود دارند که تحقق و با عدم تحقق پروتکل را کنترل می‌کنند. در سال ۱۹۹۸ نخستین طرح مخابره از راه دور کوانتومی کنترلی را با استفاده از حالت GHZ پیشنهاد شد [۱۵]. در طرح ارائه شده از سوی آنها، گیرنده تنها با اجازه کنترل‌کننده قادر به دریافت حالت مخابره شده است. در ادامه پروتکل‌های کنترلی دیگری با کانال‌های متفاوت در حوزه مخابره از راه دور کوانتومی ارائه گردید [۲۹-۲۴].

۳-۳- مخابره از راه دور کوانتومی دوطرفه

نخستین پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی کنترلی دوطرفه در سال ۲۰۱۰ توسط ژا و همکاران^{۱۷} ارائه شد. در این پروتکل آلیس و باب تحت نظارت چارلی با استفاده از کانال پنج کیوبیتی درهم‌تنیده می‌توانند به‌طور هم‌زمان تک کیوبیت ناشناخته خود را به یکدیگر ارسال کنند. در این پروتکل دو کیوبیت از کانال متعلق به آلیس و دو کیوبیت متعلق به باب است و یک کیوبیت نیز نزد چارلی می‌باشد. با توجه به درهم‌تنیده بودن کیوبیت‌های کانال، با اندازه‌گیری آلیس و باب روی کیوبیت‌های خود تغییرات بر روی کیوبیت‌های طرف مقابل اتفاق خواهد افتاد و همین تغییرات در نهایت باعث منتقل شدن کیوبیت‌های ناشناخته آلیس و باب به یکدیگر می‌شود [۳۰].

سپس در [۳۱-۳۴] با استفاده از حالت شش کیوبیت با بیشینه درهم‌تنیدگی، پروتکل‌های مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی جدیدی پیشنهاد شد. پس از آن با استفاده از کانال پنج کیوبیتی، پروتکل‌های کنترلی دو طرفه دیگری نیز ارائه شد [۳۵-۳۶].

در ادامه پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی دوطرفه‌ای با استفاده از جابجایی در هم‌تنیدگی^{۱۸} ارائه گردید [۳۷]. تفاوت دیگر این پروتکل با نمونه‌های پیشین، غیر کنترلی بودن آن است. وانگ و شو^{۱۹} نیز پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی با استفاده از حالت GHZ-Type ارائه کردند [۳۸].

نقطه مشترک تمامی پروتکل‌های قبلی این است که در همه آنها آلیس و باب هر کدام تنها قادر به ارسال یک کیوبیت ناشناخته به‌طور هم‌زمان هستند. در سال ۲۰۱۵ دو پروتکل متفاوت با پروتکل‌های قبلی ارائه شد که در آن طرفین می‌توانند بیش از یک کیوبیت را ارسال کنند. در این سال سنگ مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی با استفاده از هفت کیوبیت درهم‌تنیده ارائه کرد که در آن آلیس قادر به ارسال یک کیوبیت ناشناخته به باب است اما باب می‌تواند دو کیوبیت ناشناخته را به آلیس منتقل کند [۳۹]. پس از آن هونگ^{۲۰} مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی با استفاده از هفت کیوبیت با درهم‌تنیدگی بیشینه ارائه کرد [۴۰]. در این پروتکل پیشنهادی، که یک طرح مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی نامتقارن است، یکی از کاربران اندازه‌گیری بر پایه Bell و کاربر

دیگر اندازه‌گیری تک کیوبیتی انجام می‌دهد. علاوه بر آن آلیس قادر به ارسال یک کیوبیت ناشناخته به باب و باب قادر به ارسال دو کیوبیت ناشناخته به آلیس است.

در سال ۲۰۱۶ لی و همکاران^{۴۱} موفق به ارائه یک پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترل‌ی با استفاده از کانال شش کیوبیتی خوشه‌ای شدند [۴۱]. در این پروتکل آلیس می‌تواند دو کیوبیت ناشناخته را به باب و باب تک کیوبیت ناشناخته خود را به آلیس منتقل کند. پس از آن اولین پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترل‌ی با ارسال بیش از یک کیوبیت توسط آلیس و باب به طور همزمان را داشته باشند [۴۲]. این پروتکل با استفاده از یک کانال شش کیوبیتی ارائه شده‌است. در این پروتکل آلیس و باب می‌توانند به طور همزمان یک حالت دو کیوبیتی EPR را به یکدیگر ارسال کنند. پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترل‌ی با استفاده از یک کانال نه کیوبیتی ارائه گردید [۴۳]. در این کانال بدون محدودیت هر دو کاربر می‌توانند همزمان دو کیوبیت ناشناخته را به یکدیگر ارسال کنند.

در مرجع [۴۴] n حالت EPR بین آلیس و باب به اشتراک گذاشته می‌شود. باب، n گذرگاه خروجی دارد و با توجه به نتیجه اندازه‌گیری آلیس، باب تشخیص می‌دهد در کدام گذرگاه، حالت آلیس، قابل دست‌یابی است. در مقاله [۴۵]، دو پروتکل ارائه شده که در پروتکل نخست، یک حالت تک کیوبیتی که برای فرستنده آشکار است، توسط یک کانال چهار کیوبیتی، همزمان به دو گیرنده مخابره می‌گردد. در پروتکل دوم، توسط یک کانال چهار کیوبیتی، یک حالت تک کیوبیتی نامعلوم به آلیس و یک حالت تک کیوبیتی دیگر به چارلی مخابره می‌گردد. از آنجا که در مکانیک کوانتومی یک حالت نامعلوم کوانتومی را نمی‌توان کپی کرد در پروتکل دوم امکان ارسال یک حالت یکسان به دو گیرنده وجود ندارد. در مرجع [۴۶] پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه برای دسته خاصی از حالات کیوبیتی به کمک کانال $2n+2$ کیوبیتی ارائه می‌گردد و در مرجع [۴۷]، پروتکل برای هر حالت دلخواه n کیوبیتی در کانال نویزی توسعه می‌یابد. در مرجع [۴۸] پروتکلی برای امضای کوانتومی بر مبنای پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی ارائه می‌گردد سپس در [۴۹] پروتکلی برای مخابره از راه دور کوانتومی حالات دو کیوبیتی درهم‌تنیده به کمک کانال GHZ ارائه می‌گردد. در [۵۰]، پروتکلی برای مخابره از راه دور کوانتومی برای هر حالت دلخواه، بر مبنای تبدیل فوری به کوانتومی ارائه گردید. سپس در [۵۱، ۵۲] پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی بر مبنای کانال‌های دو GHZ و پنج کیوبیتی پیشنهاد می‌شود. در [۵۳] پروتکلی با چند گیرنده ارائه می‌گردد که فرستنده می‌تواند در هر بار ارسال حالت، گیرنده خود را انتخاب کند. در [۵۴] پروتکل مخابره از راه دور دو طرفه غیرممتقارن ارائه می‌شود که دو کار بر حالات دو و سه کیوبیتی به همدیگر مخابره می‌کنند.

۴- پروتکل‌های پیاده‌سازی شده مخابره از راه دور کوانتومی

در این بخش، مهم‌ترین چالش‌ها و دست‌آوردهای پیاده‌سازی مخابره از راه دور کوانتومی ارائه می‌شود. در پیاده‌سازی واقعی، آلیس و باب به منابع محدود دسترسی دارند و بنابراین حالت خروجی لزوماً مشابه حالت ورودی نیست. میزان شباهت حالت ورودی و حالت خروجی با کمیتی به اسم فیدلیتی (F) ارزیابی می‌شود [۵۵].

سوالاتی که اینجا مطرح می‌شود این است که اگر بخواهیم اطلاعات حالت را تنها با کانال کلاسیک منتقل کرد چه اتفاقی می‌افتد. برای مثال، در یک روش کاملاً کلاسیک آلیس می‌تواند حالت ورودی را در یک پایه اورتونرمال اندازه‌گیری کرده و نتایج را به باب منتقل کند. سپس باب حالت را با اطلاعات به دست آمده بازسازی کند. در مرجع [۵۵] ثابت می‌شود که با کانال کاملاً کلاسیک، در حالت متغیر گسسته بیشینه $F = \frac{2}{3}$ قابل حصول است و ناحیه $F \leq \frac{2}{3}$ به مخابره از راه دور کوانتومی اشاره دارد. به صورت ایده‌آل تحقق آزمایشگاهی مخابره از راه دور کوانتومی باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- ۱- حالت ورودی دلخواه باشد.
- ۲- فرد سوم (وکتور) حالت ورودی را برای آلیس تامین کرده و حالت خروجی باب را تایید کند (از طریق توموگرافی حالت کوانتومی^{۴۲} و یا تخمین فیدلیتی)
- ۳- آلیس بتواند اعضای حالات خانواده Bell را کامل از یکدیگر تمیز دهد.

۴- فیدلیتی مخابره از راه دور از میزان قابل قبولی که با روش‌های اندازه‌گیری-آماده‌سازی^{۴۳} کلاسیک قابل حصول است، بیشتر باشد.

در آزمایشگاه برخی از شرایط بالا ممکن است محقق نشود، به ویژه شرط سوم که منجر می‌شود مخابره از راه دور کوانتومی احتمالاتی داشته‌باشیم وقتی که فقط زیرمجموعه‌ای از حالات Bell قابل دسترسی است و کران بالایی برای احتمال موفقیت وجود دارد. در برابر، اگر شرط ۳ برآورده شود مخابره از راه دور قطعی کوانتومی و در غیر این صورت مخابره از راه دور احتمالاتی خواهیم داشت. کامل‌ترین آزمایش‌های مخابره از راه دور قطعی آنهایی هستند که با فیدفوروارد فعال^{۴۴} همراه هستند، بدین معنی که نتایج اندازه‌گیری آلیس در پایه Bell به صورت بلادرنگ به باب ارسال شده و یکانی‌های شرطی قبل از تایید وکتور بر حالت خروجی اعمال می‌شوند. در سایر آزمایش‌ها فیدفوروارد در پس پردازش^{۴۵} شبیه‌سازی می‌شود یعنی حالت خروجی مستقیماً با وکتور اندازه‌گیری شده و یکانی‌ها تنها پس از بازسازی توموگرافیک^{۴۶} حالت شبیه‌سازی می‌شود.

در [۶۵]، نخستین پیاده‌سازی عملی مخابره از راه دور کوانتومی با حالت‌های با قطبیت خطی و قطبیت بیضوی محقق گردید. این پیاده‌سازی، یک پیاده‌سازی احتمالاتی با بازدهی آشکارسازی حالات Bell برابر ۲۵٪ است.

سپس در [۵۷]، مخابره از راه دور کوانتومی فوتون‌ها، در فاصله ۶۰۰ متر بر روی رودخانه دانوب در وین با استفاده از فیبر نوری و بر مبنای کیوبیت فوتونی (time bin) محقق گردید. این پیاده‌سازی نیز یک پیاده‌سازی احتمالاتی، با احتمال ۵۰٪ است. کیوبیت‌های time bin در پیاده‌سازی‌های فیبر نوری بسیار استفاده شده‌اند زیرا آنها در برابر تاثیر ناهم‌دوسی در فیبر نوری بسیار پایدار هستند [۹۰].

پیاده‌سازی فضای آزاد از مخابره از راه دور کوانتومی در فاصله ۱۶ کیلومتر در [۵۸] محقق می‌شود. لینک فضای آزاد برای توسعه فاصله انتقال به دلیل جذب اتمسفری پایین آن برای بازه‌های معینی از طول موج به شدت مطلوب است. این پیاده‌سازی بر مبنای روش فیدفوروارد است. متوسط فیدلیتی ۸۹٪ محقق شده‌است. این پیاده‌سازی امکان آزمایش‌های فضای آزاد را تایید کرده و گام مهمی به سمت کاربردهای مخابرات کوانتومی در سطح

جهانی است. در این پروتکل، اندازه‌گیری قطعی در پایه Bell انجام می‌شود.

در [۵۹]، آزمایشی با استفاده از فید فوروارد فعال تحقق می‌پذیرد. در این آزمایش، از دو لینک اپتیکی در فضای آزاد (کوانتوم و کلاسیک) برای تحقق مخابره از راه دور کوانتومی به فاصله ۱۴۳ کیلومتر بین دو جزیره فناری استفاده می‌شود. در این پیاده‌سازی از روش‌های پیشرفته شامل جفت منبع فوتون قطبیت در هم تنیده، آشکارسازهای تک فوتون با نویز به شدت پایین^{۲۷} و همگام‌سازی ساعت بر مبنای درهم تنیدگی^{۲۸} استفاده می‌شود. متوسط فیدلیتی بیشتر از دو سوم است.

در [۶۰] مخابره از راه دور قطعی متغیر پیوسته بین بسته‌های اتمی ماکروسکوپی در دمای اتاق در فاصله ۰.۵ متر محقق می‌شود. در هم تنیدگی مورد نیاز برای مخابره از راه دور با نور منتشر شده از یک مجموعه به مجموعه دیگر توزیع می‌گردد.

مخابره از راه دور کوانتومی بر روی فیبر نوری چالشی است زیرا آشکارسازی چند فوتونی که جز اساسی در آزمایش‌های مخابره از راه دور کوانتومی است به دلیل ضریب پایین آشکارسازی آشکارسازهای تک فوتون telecom-band خیلی ناکارآمد است. در [۶۱]، یک پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی بر روی فیبر نوری با استفاده از چهار آشکارساز تک فوتون نانو-سیم ابررسانا^{۲۹} (SNSPD) با آشکارسازی-راندمن بالا است. این SNSPD ها امکان اندازه‌گیری چند فوتونی شدیداً کارآمد را فراهم می‌کنند که نشان می‌دهد فوتون‌ها بر روی فیبر به طول ۱۰۰ کیلومتر با فیدلیتی متوسط ۸۳٪ منتقل شده‌اند. برای سیستم‌های ماده‌ای رکورد برابر ۲۱ متر است [۶۲].

در [۶۳]، آزمایش‌گران گزارش دادند که آنها مخابره از راه دور پاکت‌های موج نور را تا عرض باند 10mhz محقق کردند در حالی که برهم‌نهی حالات کاملاً حفظ شده‌است.

برای تحقق اینترنت کوانتومی جهانی، بازه مخابره از راه دور کوانتومی بایستی افزایش یابد. یک روش کارآمد برای انجام این، استفاده از سکوهای ماهواره که می‌تواند دو نقطه دور بر روی زمین را با اتلاف کانال به شدت کاهش یافته، به هم متصل کند زیرا بیشتر مسیر انتشار در فضای باز است. در [۶۴] مخابره از راه دور کوانتومی از کیوبیت‌های تک فوتونی بین زمین و یک ماهواره با مدار نزدیک زمین با فاصله ۱۴۰۰ کیلومتر ارائه می‌شود. فیدلیتی برای این تحقق برابر ۸۰٪ و بازدهی برابر ۳۲٪ است.

در [۶۵] یک شبکه توزیع یافته مبتنی بر فیبر نوری ۳۰ کیلومتری در فضایی به طول ۱۲.۵ کیلومتر پیاده‌سازی می‌شود. این شبکه در برابر نویز با استراتژی‌های پایدارساز فعال^{۳۰} پایدار است. این پیاده‌سازی گامی حیاتی به سمت اینترنت کوانتومی جهانی در دنیای واقعی است.

در [۹۱] پیاده‌سازی مخابره از راه دور کوانتومی قطعی حالت همدوس اپتیکی از طریق کانال‌های فیبر ارائه می‌گردد. دو حالت EPR از طریق یک فیبر ۳ کیلومتری بین فرستنده و گیرنده به اشتراک گذاشته می‌شود. مخابره از راه دور قطعی مودهای اپتیکی بر روی کانال فیبر با طول ۶ کیلومتر محقق می‌گردد. فیدلیتی این طرح ۰.۶۲ است. در [۹۲] پیاده‌سازی مخابره از راه دور کوانتومی گیت CNOT با فیدلیتی ۷۹٪ محقق می‌شود.

۵- الزامات فناوری

روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی عملی مخابره از راه دور کوانتومی وجود دارد: کیوبیت فوتونی^{۳۱}، تشدید مغناطیسی

هسته‌ای^{۳۲}، مودهای اپتیکی^{۳۳}، مجموعه‌های اتمی^{۳۴}، کیوبیت‌های اتمی به دام افتاده^{۳۵} و سیستم‌های حالت جامد^{۳۶} که به بررسی آنها می‌پردازیم.

۵-۱- کیوبیت‌های فوتونی

پیاده‌سازی عملی یک اندازه‌گیری کامل پایه Bell هنوز چالشی اساسی برای کیوبیت‌های فوتونی است زیرا اپتیک خطی^{۳۷} و آشکارسازی فوتونی^{۳۸} تنها امکان تمایز بین دو حالت از چهار حالت Bell را دارد بنابراین بازدهی حداکثر برابر با ۵۰٪ است [۶۷] [۶۶]. همچنین با استفاده از اپتیک خطی و کیوبیت کمکی می‌توان یک کیوبیت را با بازدهی بهتر آشکارسازی Bell ارسال کرد که در حالتی که به سمت بی‌نهایت میل کند بازده ۱۰۰٪ خواهد شد. این امکان نظری، به وضوح سرباری از منابع کوانتومی ایجاد می‌کند که چالش‌های جدی آزمایشگاهی در پی دارد. از جمله پیاده‌سازی‌های مخابره از راه دور کوانتومی در این فضا می‌توان به [۶۸] و [۶۹] اشاره کرد.

۵-۲- تشدید مغناطیسی هسته‌ای

تمایز کامل بین حالات Bell با مخابره از راه دور NMR در جایی که کیوبیت‌ها اسپین‌های هسته هستند قابل تحقق است. در مرجع [۷۰] اسپین دو هسته کربن (C_1 , C_2) و هسته هیدروژن در نظر می‌گیرد. بعد از در هم تنیدگی بین C_1 و H تولید شده با بر هم کنش‌های اسپین-اسپین، مخابره از راه دور حالت C_2 بر H با استفاده از اندازه‌گیری کامل در پایه Bell بین دو هسته کربن ایجاد می‌شود. از آنجا که مخابره از راه دور NMR به فواصل زیراتمی محدود است، بنابراین مناسب مخابرات کوانتومی نبوده و تنها به عنوان زیرروالی در محاسبات کوانتومی NMR استفاده می‌شود.

۵-۳- حالات اپتیکی

اولین و ساده‌ترین روش تمایز بین حالات Bell به کمک متغیرهای پیوسته و مودهای اپتیکی به دست می‌آید. نسخه متغیر پیوسته از این اندازه‌گیری می‌تواند به سادگی در اپتیک خطی با استفاده از یک شکافنده ذره متوازن و دو آشکارساز homodyne conjugate در پورت‌های خروجی محقق شود. هر دو میدان دید شکافنده پرتو^{۳۹} و بازدهی کوانتومی هموداین می‌توانند به شدت بالا بوده بنابراین آشکارسازی نهایی می‌تواند به بازدهی ۱۰۰٪ برسد. مخابره از راه دور متغیر پیوسته تمامی شرایط چهارگانه غیر از حالت دلخواه کوانتومی را محقق می‌کند، زیرا در نتیجه فضای هیلبرت بی‌نهایت بعدی، بایستی حالت به الفبای خاصی متعلق باشد. اولین اندازه‌گیری با مودهایی اپتیکی، الفبایی با حالات همدوس^{۴۰} با انرژی ثابت مدوله شده با فاز^{۴۱} در نظر می‌گیرد که به فیدلیتی حدود ۵۸٪ می‌رسد [۴۹]. متأسفانه فیدلیتی مخابره از راه دورهای CV نمی‌تواند به ۱۰۰٪ برسد زیرا سیستم‌های CV امکان تولید حالت در هم تنیده ماکزیمم با منابع محدود را نمی‌دهد. حالت‌های واقعی EPR، با فشرده‌سازی خوب ولی محدود می‌توانند با تولید دو حالت فشرده تک حالتی از طریق down-conversion (برای مثال در اسیلاتورهای پارامتری اپتیکی) و تلفیق آنها بر روی یک شکافنده پرتو محقق می‌شود. رکورد فعلی برای فیدلیتی متغیرهای پیوسته، برابر با ۸۳٪ است [۷۱].

برای غلبه بر محدودیت‌های در نتیجه فشرده‌سازی محدود، مخابره از راه دور کوانتومی متغیر پیوسته از طریق فرمول‌بندی هایبرید^{۴۲} با متغیر گسسته ترکیب می‌شود. در مرجع [۷۲] مخابره از راه دور کوانتومی قطعی یک کیوبیت فوتونی با اعمال یک تله پورتر عریض‌بند^{۴۳} متغیر پیوسته به حالت‌های موقت یک کیوبیت bin-time محقق می‌شود. چنین رهیافتی به حل

همزمان آشکارسازی کامل حالات Bell (در نتیجه متغیرهای پیوسته) و همچنین رسیدن به فیدلیتی بالای مخابره از راه دور (در نتیجه متغیرهای گسسته) می‌پردازد. با استفاده از سطوح متوسط فشرده‌سازی می‌توان به فیدلیتی بالای ۸۰٪ رسید. مودهای اپتیکی گزینه‌های مناسبی برای فناوری‌های مخابرات به دلیل استفاده از آشکارسازهای هوموداین با عملکرد بالا و بخش‌هایی همانند مدولاتورهای الکترواپتیکی^{۴۴} (EOM) استفاده شده برای تولید ورودی و اندازه‌گیری خروجی، هستند.

۵-۴- مجموعه‌های اتمی

مخابره از راه دور کوانتومی ممکن است بین سیستم‌های کوانتومی با طبیعت مختلف برای مثال بین نور و ماده تحقق پذیرد. مرجع [۵۱] نخستین آزمایشی بود که این ویژگی را با مخابره از راه دور حالات همدوس یک مود اپتیکی به اسپین جمعی یک مجموعه اتم متشکل از حدود اتم کلسیم نشان داد. از آنجا که اجزای اسپین اتمی جمعی می‌تواند با عملگرهای quadrature توصیف شود این طرح، یک طرح مخابره از راه دور متغیر پیوسته است. این آزمایش در [۶۰]، به مخابره از راه دور قطعی ماده به ماده بین دو مجموعه از اتم کلسیم با استفاده از برهم کنش چهار موجی مخلوط توسعه می‌یابد. فیدلیتی این پروتکل بیشتر از ۵۵٪ است.

مخابره از راه دور نور به ماده در متغیرهای گسسته و با استفاده از مجموعه‌های اتمی سرد محقق شده است. این امر برد و فیدلیتی را افزایش می‌دهد اما پروتکل را به دلیل بازدهی آشکارسازی Bell که برابر با ۵۰٪ است احتمالاتی می‌کند. در [۷۳] یک کیوبیت قطبیت در فیبر به کیوبیت اتمی جمعی تولید شده از دو مجموعه سرد از اتم روبودیوم به فاصله ۷ متر مخابره می‌شود. فیدلیتی این مخابره برابر ۷۸٪ است.

۵-۵- کیوبیت‌های تله اتمی

مخابره از راه دور کیوبیت قطعی می‌تواند در فناوری یون‌های به تله افتاده با ارضا تمامی شرایط چهارگانه محقق گردد [۷۰]. حتی اگر این فواصل خیلی محدود باشد به دلیل برهم کنش‌های کولنی برد کوتاه، زمان‌های ذخیره‌سازی در این سیستم‌ها بسیار بلند است. این امر، آنها را حافظه‌ی کوانتومی خوب برای استفاده از مخابره از راه دور به عنوان زیرروال یک محاسبه کوانتومی می‌کند.

۵-۶- سیستم‌های حالت جامد

مخابره از راه دور احتمالاتی نور به ماده می‌تواند بین کیوبیت‌های فوتونی و حافظه‌های کوانتومی حالت جامد متشکل از نقاط کوانتومی^{۴۵} (QD) و یا کریستال‌های rare earth doped محقق شود. اولین آزمایش [۷۴] یک کیوبیت فرکانس فوتونی را به اسپین الکترون یک نقطه کوانتومی شارژ شده در فاصله ۵ متر با فیدلیتی ۷۸٪ مخابره کرد. نتایج سایر مخابره از راه دورها در سیستم‌های حالت جامد، از قبیل کیوبیت قطبیت به کریستال، کیوبیت‌های ابررسانا بر روی تراشه و مراکز خالی نیتروژن در الماس در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

۵-۷- مقایسه فناوری‌های مخابره از راه دور کوانتومی

واضح است که سیستم و یا فناوری کوانتومی ایده‌آلی وجود ندارد که بتواند در تمامی پارامترها برتری داشته باشد. بهترین نامزد با توجه به کاربرد خاص مشخص می‌شود. ترکیب‌سازی‌های مناسب این نامزدها با زیرساخت‌ها و روش‌های سازگار، ممکن است بهترین گزینه‌ها برای مخابره از راه دور آینده و کاربردهایشان باشد. سیستم‌های حالت جامد، با رهیافت مدار QED^{۴۶} برای مخابره از راه دور برد-کوتاه (کمتر از یک متر) به عنوان زیرروال برای محاسبات کوانتومی بهترین گزینه هستند. به‌ویژه کیوبیت‌های transom ابررسانا [۷۵] هر دو معیار قطعیت و فیدلیتی بالا را بر

روی یک تراشه محقق می‌کنند و همچنین پیاده‌سازی بی‌درنگ فیدفوروارد که در تراشه‌های فوتونی چالشی هستند را محقق می‌کنند. آنها همچنین ساختار مقیاس‌پذیرتر نسبت به فناوری موجود در مقایسه با رهیافت‌های قدیمی‌تر از قبیل یون‌های به دام افتاده ایجاد می‌کنند. [۷۶] در حال حاضر تنها نقطه ضعف این سیستم‌ها، زمان کوهرنس کوتاه آنها (کمتر از ۱۰۰ میکروثانیه) است. این مشکل با تجمیع مدار QED با حافظه‌های کوانتومی مجموعه اسپین که می‌تواند زمان ناهمدوسی بسیار طولانی ایجاد کنند حل می‌شود. مخابره از راه دور کوانتومی در فواصل حدود چند کیلومتر می‌تواند با مودهای اپتیکی محقق شود [۶۳] [۴۹]. آزمایش‌ها می‌توانند از ابعاد روی میز تا پیاده‌سازی‌های با برد متوسط در فیبر و یا فضای آزاد محقق شوند و پتانسیل ترکیب با حافظه‌های کوانتومی را نیز دارند. فواصل بلندتر ولی با نرخ پایین‌تر ممکن است با رهیافت ترکیبی [۷۲] یا با توسعه تکرارگرهای کوانتومی بر مبنای عملگرهای غیر گوسی محقق شوند. [۷۷] برای فواصل طولانی (بزرگتر از ۱۰۰ کیلومتر) کیوبیت‌های قطبیت (به دلیل اتلاف پایین و پایداری بیشتر در برابر ناهمدوسی کانال) بهترین حامل‌ها بر روی فیبرهای طولانی و یا لینک‌های فضای آزاد هستند اما به دلیل عدم امکان تمایز قطعی بین حالات Bell، مخابره از راه دور را احتمالاتی می‌کنند. در حالیکه مخابره از راه دور کوانتومی و جابجایی در هم تنیدگی برای مواردی از قبیل تغلیظ در هم تنیدگی و رمزنگاری کوانتومی قابل قبول هستند اما وضعیت برای مخابرات کوانتومی که اطلاعات کوانتومی لازم است کامل حفظ شود فرق می‌کند. با پذیرش طبیعت احتمالاتی، پیاده‌سازی‌های مبتنی بر ماهواره قابل تحقق در شرایط فعلی است [۶۴].

استفاده از مخابره کوانتومی به عنوان واحد سازنده یک شبکه کوانتومی مقیاس‌پذیر شدیداً به یکپارچگی آن با حافظه کوانتومی بستگی دارد. توسعه حافظه کوانتومی نه تنها منجر به توزیع در هم‌تنیدگی در یک شبکه و مخابره کوانتومی از طریق مخابره از راه دور کوانتومی می‌شود بلکه همچنین امکان پردازش همدوس اطلاعات کوانتومی ذخیره شده را نیز فراهم می‌کند.

از این زاویه دید، بسته‌های اتمی برای تبدیل کارآمد نور به ماده شان و زمان ذخیره‌سازی چند میلی ثانیه آنها جذاب هستند [۷۸]. زمان ذخیره‌سازی آنها، می‌تواند به ۱۰۰ میلی ثانیه ارسال نور که در ابعاد جهانی لازم است برسد. پیشرفت‌های نویدبخش امروزه مربوط به حالات جامد است که حافظه‌های کوانتومی مجموعه اسپین‌ها یکپارچگی مستقیم با ساختار مقیاس‌پذیر مدار QED دارد. اینترنت کوانتومی احتمالاً بر مبنای مخابرات اپتیکی کوانتومی فاصله بلند که با گره‌های حالت جامد برای پردازش اطلاعات کوانتومی ترکیب شده است خواهد بود. دست‌آوردهای قابل حصول با زیرساخت‌های و فناوری‌های موجود برای مخابره از راه دور کوانتومی در جدول (۱) خلاصه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی یکی از مهم‌ترین پروتکل‌های مخابرات کوانتومی است. در این پروتکل حالت یک ذره کوانتومی، بدون پیمایش فاصله فیزیکی به کمک در هم‌تنیدگی توزیع شده و مخابره اطلاعات کلاسیک منتقل می‌شود. پس از ارائه نخستین پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی که در آن حالت یک ذره تک کیوبیتی به کمک کانال دو کیوبیتی EPR مخابره می‌گردد پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی متنوعی بر مبنای کانال به اشتراک گذاشته شده، تعداد کیوبیت حالت منتقل شده، کنترلی

جدول ۱: انواع فناوری‌های کوانتومی برای تحقق مخابره از راه دور کوانتومی و ویژگی‌های آنها

فناوری کوانتومی	بازدهی	فیدلیتی	فاصله
کیوبیت‌های فوتونی	قطبیت [79] [57] [80]	۸۳٪	143 km
	قطبیت [64]	۸۰٪	1400km
	Time-bins [69] [81] [82]	۸۱٪	6km فیبر
	Dual-rails on chip [83]	۸۹٪	بر روی تراشه
	Spin-orbital qubits [84]	۵۷٪	بر روی میز
	[70]	۹۰٪	یک آنگستروم
مودهای نوری	متغیر پیوسته	۸۳٪	12m
	هایبرید [۷۲]	۸۰٪	بر روی میز
مجموعه‌های اتمی	نور به ماده متغیر پیوسته (داغ) [۵۱]	۵۸٪	بر روی میز
	ماده به ماده متغیر پیوسته (داغ) [۶۰]	۵۵٪	0.5m
	نور به ماده متغیر گسسته (سرد) [۸۵]	۷۸٪	7m فیبر
	ماده به ماده متغیر گسسته (سرد) [۸۶]	۸۸٪	150m فیبر
اتم‌های به تله افتاده	یون‌های به تله افتاده [۷۶]	۸۳٪	5μm
	یون‌های به تله افتاده و حامل‌های فوتونی [۸۷]	۹۰٪	1m
	اتم‌های خنثی در کاواک نوری [۶۱]	۸۸٪	21m فیبر
حالت جامد	فرکانس کیوبیت به نقطه کوانتومی [۷۴]	۷۸٪	5m
	کیوبیت قطبیت به کریستال [۸۸]	۸۹٪	24.8m فیبر
	کیوبیت‌های ابررسانا بر روی تراشه [۷۵]	۷۷٪	بر روی تراشه 6mm
	مراکز خالی نیتروژن در الماس [۸۹]	۸۸٪	3m
		۱۰۰٪	

4 Distributed Computation
5 Quantum teleportation
6 Entanglement Swapping
7 Entanglement Distillation
8 Repeater
9 Qubit
10 Superposition
11 Bennet et al.
12 Zha et al.
13 Entanglement Swapping
14 Wang and Shu

بودن یا نبودن، یک‌طرفه یا دوطرفه بودن پروتکل و ... پیشنهاد شده‌است. همچنین این پروتکل در فناوری‌های متفاوت از قبیل و محقق شده‌است. در پژوهش انجام شده مروری بر انواع پروتکل‌ها و پیاده‌سازی‌های آنها داشته و نقط ضعف و قوت هر کدام ارائه شده‌است.

پی‌نوشت‌ها

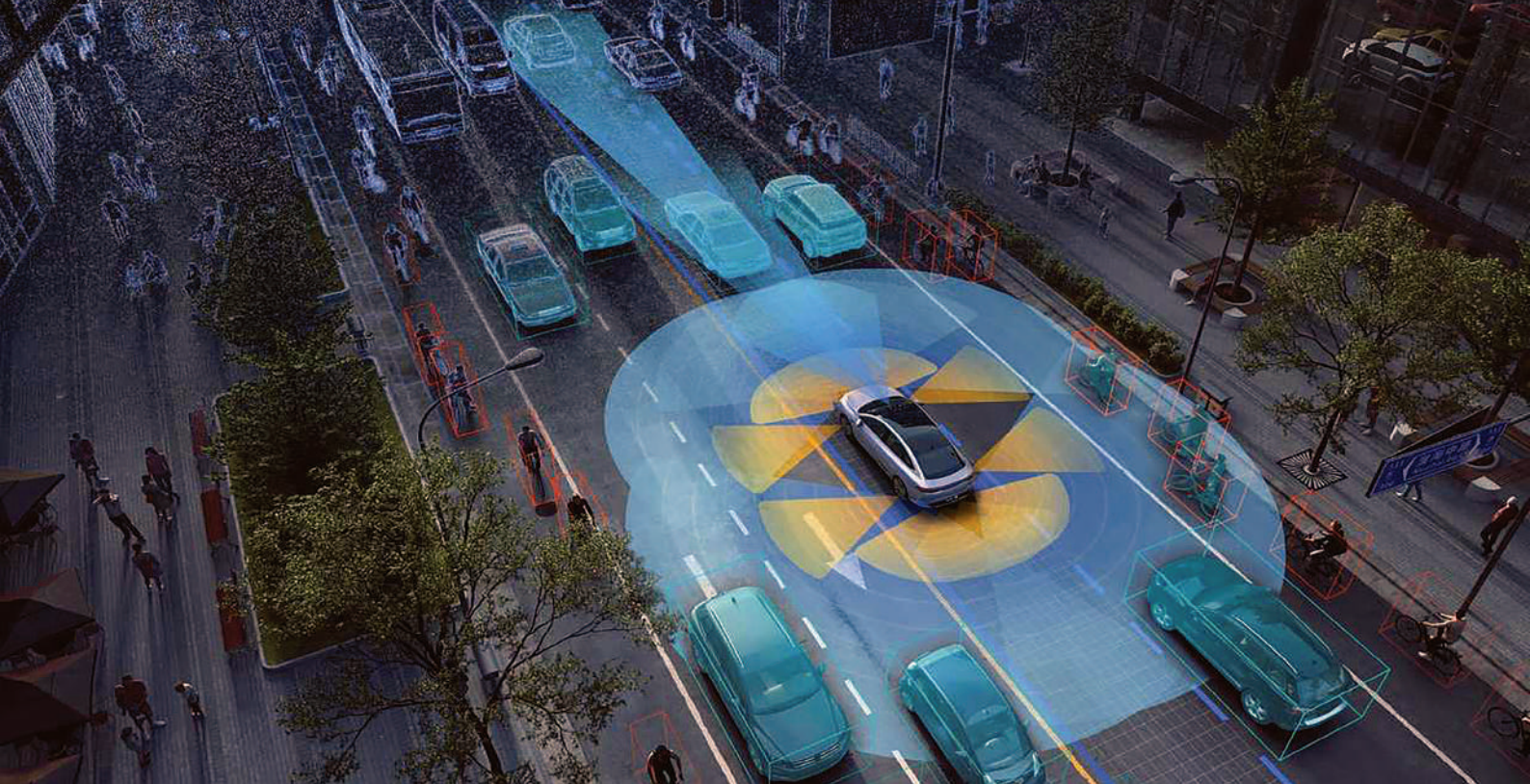
1 Gordon Moore
2 Richard Feynman
3 Entanglement

- Physics 50.10 (2011): 3225.
- [15] Karlsson, Anders, and Mohamed Bourennane. "Quantum teleportation using three-particle entanglement." *Physical Review A* 58.6 (1998): 4394.
- [16] Tsai, Chia-Wei, and Tzonelih Hwang. "Teleportation of a pure EPR state via GHZ-like state." *International Journal of Theoretical Physics* 49.8 (2010): 1969-1975.
- [17] Nandi, Kaushik, and Chandan Mazumdar. "Quantum teleportation of a two qubit state using GHZ-like state." *International Journal of Theoretical Physics* 53.4 (2014): 1322-1324.
- [18] K. Yang, L. Huang, W. Yang, F. Song, "Quantum teleportation via GHZ-like state" *Int. J. Theor. Phys.* 48 (2009) 516.
- [19] Muralidharan, Sreraman, and Prasanta K. Panigrahi. "Perfect teleportation, quantum-state sharing, and superdense coding through a genuinely entangled five-qubit state." *Physical Review A* 77.3 (2008): 032321.
- [20] G. Rigolin, "Quantum teleportation of an arbitrary two-qubit state and its relation to multipartite entanglement", *Phys. Rev.A* 71 (2005) 032303.
- [21] S. Q. Tang, C. J. Shan, X. X. Zhang, "Quantum teleportation of an unknown two-atom entangled state using four-atom cluster state" *Int. J. Theor. Phys.* 49 (2010) 1899.
- [22] D. Tian, Y. Tao, M. Qin, "Teleportation of an arbitrary two-qudit state based on the non-maximally four-qudit cluster state" *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*. 51 (2008) 1523.
- [23] W. B. Cardoso, "Teleportation of GHZ-states in QED-cavities without the explicit Bell-state measurement", *Int. J. Theor. Phys.* 47 (2008) 977.
- [24] Yang, Chui-Ping, and Siyuan Han. "A scheme for the teleportation of multiqubit quantum information via the control of many agents in a network." *Physics Letters A* 343.4 (2005): 267-273.
- [25] Deng, Fu-Guo, et al. "Symmetric multiparty-controlled teleportation of an arbitrary two-particle entanglement." *Physical Review A* 72.2 (2005): 022338.
- [26] Wang, Ya-Hong, and He-Shan Song. "Preparation of partially entangled W state and deterministic multi-controlled teleportation." *Optics Communications* 281.3 (2008): 489-493.
- [27] Wang, Xin-Wen, Yu-Huan Su, and Guo-Jian Yang. "Controlled teleportation against uncooperation of part of supervisors." *Quantum Information Processing* 8.4 (2009): 319-330.
- [28] Tian-Yin, Wang, and Wen Qiao-Yan. "Controlled quantum teleportation with Bell states." *Chinese Physics B* 20.4 (2011): 040307.
- [29] Song-Song, Li, et al. "Controlled teleportation using four-particle cluster state." *Communications in Theoretical Physics* 50.3 (2008): 633.
- [30] Xin-Wei, Zha, Song Hai-Yang, and Ma Gang-Long. "Bidirectional swapping quantum controlled teleportation based on maximally entangled five-qubit state." *arXiv preprint arXiv:1006.0052* (2010).
- [31] Yan, An. "Bidirectional controlled teleportation via six-qubit cluster state." *International Journal of Theoretical Physics* 52.11 (2013): 3870-3873.
- [32] Sun, X. M., and X. W. Zha. "A scheme of bidirectional quantum controlled teleportation via six-qubit maximally entangled state." *Acta Photonica Sin* 48 (2013): 1052-1056.
- [33] Duan, Ya-Jun, and Xin-Wei Zha. "Bidirectional quantum controlled teleportation via a six-qubit entangled state." *International Journal of Theoretical Physics* 53.11 (2014): 3780-3786.
- [34] Chen, Yan. "Bidirectional quantum controlled teleportation by using a genuine six-qubit entangled state." *International Journal of Theoretical Physics* 54.1 (2015): 269-272.
- [33] Zha, Xin-Wei, et al. "Bidirectional quantum controlled teleportation via five-qubit cluster state." *International Journal of Theoretical Physics* 52.6 (2013): 1740-1744.
- [34] Li, Yuan-hua, and Li-ping Nie. "Bidirectional controlled teleportation by using a five-qubit composite GHZ-Bell state." *International Journal of Theoretical Physics* 52.5 (2013): 1630-1634.
- [35] Shukla, Chitra, Anindita Banerjee, and Anirban Pathak. "Bidirectional controlled teleportation by using 5-qubit states: a generalized view." *International Journal of Theoretical Physics* 52.10 (2013): 3790-3796.
- [36] Li, Yuan-Hua, et al. "Bidirectional controlled quantum teleportation and secure direct communication using five-qubit entangled state." *Quantum information processing* 12.12 (2013): 3835-3844.
- [37] Sh. Hassanpour, M. Houshmand, "Bidirectional quantum controlled teleportation by using EPR states and entanglement swapping", In 23th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), (2015).
- 15 Sang
- 16 Hong
- 17 Zha et al.
- 18 Entanglement Swapping
- 19 Wang and Shu
- 20 Sang
- 21 Li et al.
- 22 Quantum State Tomography
- 23 Measure-prepare
- 24 Active Feed-Forward
- 25 Post Processing
- 26 Tomographic
- 27 Ultra-low-noise Single-photon Detector
- 28 Entanglement-assisted Clock Synchronization
- 29 Superconducting Nanowire Single-photon Detectors
- 30 Active Stabilization
- 31 Photonic Qubit
- 32 Nuclear Magnetic Field
- 33 Optical Modes
- 34 Atomic Ensembles
- 35 Trapped Atomic Qubit
- 36 Solid State System
- 37 Linear Optics
- 38 Photonic Detection
- 39 Beam Splitter
- 40 Coherent
- 41 Fixed Energy Phase-modulated Coherent States
- 42 Hybrid Formulation
- 43 Broad-Band
- 44 Electro-optical Modulator
- 45 Quantum Dot
- 46 Quantum Electrodynamics

مرجع

- [1] Nielsen, Michael A., and Isaac Chuang. "Quantum computation and quantum information." 558-559. (2002).
- [2] Spiller, Timothy P., et al. "An introduction to quantum information processing: applications and realizations." *Contemporary Physics*. 407-436. (2005) 46.6
- [3] Yurke, Bernard, and John S. Denker. "Quantum network theory." *Physical Review A*. 1419. (1984) 29.3
- [4] Kimble, H. Jeff. "The quantum internet." *Nature*. (2008) 453.7198.1023
- [5] Wootters, William K., and Wojciech H. Zurek. "A single quantum cannot be cloned." *Nature*. 802-803. (1982) 299.5886
- [6] Gisin, Nicolas, et al. "Quantum cryptography." *Reviews of modern physics*. 145. (2002) 74.1
- [7] Yurke, Bernard, Marek, et al. "Event-ready-detectors 'Bell experiment via entanglement swapping'." *Physical Review Letters*. (1993) 71.4287-4290
- [8] Briegel, H-J, et al. "Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication." *Physical Review Letters*. 5932. (1998) 81.26
- [9] Pirandola, Stefano, et al. "Advances in quantum teleportation." *Nature photonics*. 641. (2015) 9.10
- [10] Deutsch, David; Hayden, Patrick 16) March. (2017) *How Quantum Teleportation Actually Works*. "Proceedings of the Royal Society of London, Series A." 1759. (1999) 456.
- [11] C. H. Bennet, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, W. K. Wootters, "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels" *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993) 1895.
- [12] Agrawal, Pankaj, and Arun Pati. "Perfect teleportation and superdense coding with W states." *Physical Review A* 74.6 (2006): 062320.
- [13] B. S. Shi, A. Tomita, "Teleportation of an unknown state by W state" *Phys. Lett. A* 296 (2002).
- [14] Nie, Yi-you, et al. "Perfect teleportation of an arbitrary three-qubit state by using W-class states." *International Journal of Theoretical*

- tion." *Nature* 549.7670 (2017): 70.
- [65] Sun, Qi-Chao, et al. "Quantum teleportation with independent sources and prior entanglement distribution over a network." *Nature Photonics* 10.10 (2016): 671.
- [66] Braunstein, Samuel L., and A. Mann. "Measurement of the Bell operator and quantum teleportation." *Physical Review A* 51.3 (1995): R1727.
- [67] Weinfurter, Harald. "Experimental Bell-state analysis." *EPL (Europhysics Letters)* 25.8 (1994): 559.
- [68] Calsamiglia, John, and Norbert Lütkenhaus. "Maximum efficiency of a linear-optical Bell-state analyzer." *Applied Physics B* 72.1 (2001): 67-71.
- [69] Marcikic, I., De Riedmatten, H., Tittel, W., Zbinden, H. & Gisin, N. Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths. *Nature* 421, 509–513 (2003).
- [70] Nielsen, Michael A., Emanuel Knill, and Raymond Laflamme. "Complete quantum teleportation using nuclear magnetic resonance." *Nature* 396.6706 (1998): 52.
- [71] Yukawa, M., Benichi, H. & Furusawa, A. High-fidelity continuous-variable quantum teleportation toward multistep quantum operations. *Phys. Rev. A* 77, 022314 (2008).
- [72] Takeda, Shuntaro, et al. "Deterministic quantum teleportation of photonic quantum bits by a hybrid technique." *Nature* 500.7462 (2013): 315.
- [73] Chen, Yu-Ao, et al. "Memory-built-in quantum teleportation with photonic and atomic qubits." *Nature Physics* 4.2 (2008): 103.
- [74] Gao, W. B., et al. Quantum teleportation from a propagating photon to a solid-state spin qubit. *Nature Comm.* 4, 1 (2013).
- [75] L. Steffen, L., et al. Deterministic quantum teleportation with feed-forward in a solid state system. *Nature* 500, 319 (2013).
- [76] Barrett, M. D., et al. Deterministic quantum teleportation of atomic qubits. *Nature* (2004) 737, 429
- [77] Eisert, J., Browne, D. E., Scheel, S & Plenio, M. B. Distillation of continuous-variable entanglement with optical means. *Annals of Physics* (2004) 431-458, 311
- [78] Simon, C., et al. Quantum memories. A review based on the European Integrated Project "Qubit Applications" QAP. (*Eur. Phys. J. D* (2010) 1, 58
- [79] Bouwmeester, Dik, et al. Experimental quantum teleportation. *Nature* 575 (1997) 390.6660
- [80] Yin, Juan, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over-100 kilometre free-space channels. *Nature* 488.7410, 185 (2012)
- [81] De Riedmatten, Hugues, et al. Long distance quantum teleportation in a quantum relay configuration. *Physical Review Letters* 92.4, 047904 (2004)
- [82] Landry, Olivier, et al. Quantum teleportation over the Swisscom telecommunication network. *JOSA B* 398-403 (2007) 24.2
- [83] Metcalf, Benjamin J., et al. Quantum teleportation on a photonic chip. *Nature Photonics* 770 (2014) 8.10
- [84] Wang, Xi-Lin, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon. *Nature* 518.7540 (2015): 516.
- [85] Chen, Y.-A., et al. Memory-built-in quantum teleportation with photonic and atomic qubits. *Nature Phys.* 4, 103 (2008).
- [86] Bao, Xiao-Hui, et al. "Quantum teleportation between remote atomic-ensemble quantum memories." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109.50 (2012): 20347-20351.
- [87] Olmschenk, S., et al. Quantum teleportation between distant matter qubits. *Science* 323, 486 (2009).
- [88] Bussi'eres, F., et al. Quantum teleportation from a telecomwavelength photon to a solid-state quantum memory. *Nature Photonics* 8, 775–778 (2014).
- [89] Pfaff, W., et al. Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits. *Science* 345, 532 (2014).
- [90] Xia, Xiu-Xiu, et al. "Long distance quantum teleportation." *Quantum Sci. Technol* 3 (2018): 014012.
- [91] Huo, Meiru, et al. "Deterministic quantum teleportation through fiber channels." *Science Advances* 4.10 (2018): eaas9401.
- [92] Chou, Kevin S., et al. "Deterministic teleportation of a quantum gate between two logical qubits." *Nature* 561.7723 (2018): 368.
- [38] Wang, Jin-Wei, and Lan Shu. "Bidirectional quantum controlled teleportation of qudit state via partially entangled GHZ-type states." *International Journal of Modern Physics B* 29.18 (2015): 1550122
- [39] Zhang, Da, et al. "Bidirectional and asymmetric quantum controlled teleportation via maximally eight-qubit entangled state." *Quantum Information Processing* 14.10 (2015): 3835-3844.
- [40] Sang, Ming-huang. "Bidirectional quantum controlled teleportation by using a seven-qubit entangled state." *International Journal of Theoretical Physics* 55.1 (2016): 380-383.
- [41] Li, Yuan-hua, et al. "Asymmetric bidirectional controlled teleportation by using six-qubit cluster state." *International Journal of Theoretical Physics* 55.6 (2016): 3008-3016.
- [42] Hassanpour, Shima, and Monireh Houshmand. "Bidirectional teleportation of a pure EPR state by using GHZ states." *Quantum Information Processing* 15.2 (2016): 905-912.
- [43] Li, Yuan-Hua, and Xian-Min Jin. "Bidirectional controlled teleportation by using nine-qubit entangled state in noisy environments." *Quantum Information Processing* 15.2 (2016): 929-945.
- [44] Ishizaka, Satoshi, and Tohya Hiroshima. "Quantum teleportation scheme by selecting one of multiple output ports." *Physical Review A* 79.4 (2009): 042306.
- [45] Yu, Yan, Xin Wei Zha, and Wei Li. "Quantum broadcast scheme and multi-output quantum teleportation via four-qubit cluster state." *Quantum Information Processing* 16.2 (2017): 41.
- [46] Zadeh, Mohammad Sadegh Sadeghi, Monireh Houshmand, and Hossein Aghababa. "Bidirectional Quantum Teleportation of a Class of n-Qubit States by Using (2 n+ 2)-Qubit Entangled States as Quantum Channel." *International Journal of Theoretical Physics* 57.1 (2018): 175-183.
- [47] Sadeghi-Zadeh, Mohammad Sadegh, et al. "Bidirectional quantum teleportation of an arbitrary number of qubits over noisy channel." *Quantum Information Processing* 18.11 (2019): 1-19.
- [48] Zheng, Tao, Yan Chang, and Shi-Bin Zhang. "Arbitrated quantum signature scheme with quantum teleportation by using two three-qubit GHZ states." *Quantum Information Processing* 19.5 (2020): 1-15.
- [49] Verma, Vikram. "Bidirectional quantum teleportation of two-qubit entangled state by using G-state as a quantum channel." *Physica Scripta* 95.11 (2020): 115101.
- [50] Cao, Zhengwen, et al. "Quantum teleportation protocol of arbitrary quantum states by using quantum Fourier transform." *International Journal of Theoretical Physics* 59.10 (2020): 3174-3183.
- [51] Verma, Vikram. "Bidirectional quantum teleportation by using two GHZ-states as the quantum channel." *IEEE Communications Letters* 25.3 (2020): 936-939.
- [52] Yuan, Hao, and Zhanjun Zhang. "Optimizing the scheme of bidirectional controlled quantum teleportation with a genuine five-qubit entangled state." *Modern Physics Letters A* 35.36 (2020): 2050301.
- [53] Bolokian, Mohammad, et al. "Multi-Party Quantum Teleportation with Selective Receiver." *International Journal of Theoretical Physics* 60.3 (2021): 828-837.
- [54] Huo, Guangwen, et al. "Controlled asymmetric bidirectional quantum teleportation of two-and three-qubit states." *Quantum Information Processing* 20.1 (2021): 1-11.
- [55] Popescu, Sandu. "Bell's inequalities versus teleportation: What is nonlocality?" *Physical review letters* 72.6 (1994): 797.
- [56] Boschi, Danilo, et al. "Experimental realization of teleporting an unknown pure quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels." *Physical Review Letters* (1998).
- [57] Ursin, Rupert, et al. "Communications: Quantum teleportation across the Danube." *Nature* 430.7002 (2004): 849.
- [58] Jin, Xian-Min, et al. "Experimental free-space quantum teleportation." *Nature Photonics* 4.6 (2010): 376.
- [59] Ma, Xiao-Song, et al. "Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward." *Nature* 489.7415 (2012): 269.
- [60] Krauter, H., et al. "Deterministic quantum teleportation between distant atomic objects." *Nature Physics* 9.7 (2013): 400.
- [61] Takesue, Hiroki, et al. "Quantum teleportation over 100 km of fiber using highly efficient superconducting nanowire single-photon detectors." *Optica* 2.10 (2015): 832-835.
- [62] Nölleke, Christian, et al. "Efficient teleportation between remote single-atom quantum memories." *Physical review letters* 110.14 (2013): 140403.
- [63] Lee, Noriyuki, et al. "Teleportation of nonclassical wave packets of light." *Science* 332.6027 (2011): 330-333.
- [64] Ren, Ji-Gang, et al. "Ground-to-satellite quantum teleporta-



مقاله علمی-ترویجی

بررسی الگوهای طراحی مجموعه حسگر در خودروهای خودران

■ مهدی قاضی‌زاده^{*}، آزمایشگاه واقعیت مجازی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، mahdilind59@gmail.com

■ بهنام بهادری، آزمایشگاه واقعیت مجازی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، b.bahadori@gmail.com
^{*}نویسنده مسئول

چکیده

خودروهای خودران در چند سال گذشته توسعه زیادی داشته‌اند. این خودروها، انواع حسگر را، مانند رادار، لیدار، سونار و دوربین، برای درک محیط اطراف خود ترکیب می‌کنند. هر خودروی خودران از حسگرها و موقعیت‌های نصب مختلفی استفاده می‌کند. اگرچه تنوع زیادی در مجموعه حسگرها و موقعیت‌های نصب آنها وجود دارد، برخی الگوهای تکراری در میان خودروهای خودران قابل مشاهده است. در این مقاله، این الگوها بررسی شده و رویکردهای مختلف آنها توضیح داده می‌شود. ابتدا الگوهای به کار رفته در برخی از خودروهای خودران موجود ارائه می‌شود. سپس ملاحظات عمومی در طراحی الگوهای حسگر بیان می‌شود. پس از آن مزایا و معایب هر الگو بررسی می‌شود. سرانجام نتایج حاصل از این بررسی جمع‌بندی می‌شود.

کلمات کلیدی: الگوی حسگر، خودروی خودران، خودروی خودگردان، میدان دید.

Investigating the design patterns of sensor sets in self-driving cars

■ Mahdi Ghazizadeh^{*}, Virtual Reality Lab., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, mahdilind59@gmail.com

■ Behnam Bahadori, Virtual Reality Lab., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, mahdilind59@gmail.com

^{*}Corresponding Author

Abstract

Self-driving cars have been under intensive development in the last few years. These vehicles combine a variety of sensors, such as radar, lidar, sonar, and camera, to understand their surroundings. Each vehicle uses different sensors and installation locations. Although there is a great deal of variation in the set of sensors and their installation locations, some repetitive patterns can be seen among self-driving cars. In this paper, these patterns are examined and their different approaches are explained. First, the patterns used in some of the existing vehicles are presented. Then, general considerations in the design of sensor patterns are expressed. Next, the advantages and disadvantages of each pattern are examined. Finally, the results of this study are summarized.

Keywords: Sensor pattern, Self-driving car, Autonomous vehicle, Field of view

۱- مقدمه

خودروی خودران، خودرویی است که قادر است محیط خود را حس کند و با کمترین ورودی انسانی یا بدون آن، به طور ایمن حرکت کند [۱].

خودروهای خودران، انواع حسگر را، مانند رادار، لیدار، سونار، دوربین، سامانه موقعیت‌یاب جهانی، کیلومترشمار و دستگاه‌های سنش لختی^۱، برای درک محیط اطراف خود ترکیب می‌کند [۲]. سامانه‌های کنترل پیشرفته، اطلاعات حسی را برای شناسایی مسیرهای پیمایش مناسب و همچنین موانع و علائم مربوطه تفسیر می‌کنند [۱].

پیاده‌سازی‌های احتمالی این فناوری شامل خودروهای خودران شخصی، روبات‌کسی‌های اشتراکی، دسته‌های خودروی متصل^۲ و حمل و نقل کالا در مسافت طولانی است [۱]. چندین پروژه برای تولید یک خودروی تجاری کاملاً خودران در مراحل مختلف توسعه قرار دارند. ویمو نخستین ارائه دهنده خدمات بود که در سال ۲۰۲۰ سفرهای روبات‌کسی را به عموم مردم در فونیکس آریزونا ارائه کرد [۳]. تسلا گفته است که «رانندگی خودران کامل» مبتنی بر اشتراک را به صاحبان خودروی شخصی در سال ۲۰۲۱ ارائه می‌دهد [۴]. به نورو اجازه داده شده است که در سال ۲۰۲۱ عملیات تحویل تجاری خودران را در کالیفرنیا آغاز کند [۵]. در سال ۲۰۲۱، مرسدس بنز دومین سازنده‌ای شد که مجوز قانونی را برای سطح سه رانندگی خودکار مطابق با الزامات قانونی دریافت کرد [۶].

یکی از چالش‌های طراحان خودروهای خودران، یافتن بهترین مجموعه حسگر و موقعیت نصب آنها برای داشتن بهترین عملکرد ادراک محیط است. هر خودروی خودران از حسگرها و موقعیت‌های نصب مختلفی استفاده می‌کند. اگر چه تنوع زیادی در مجموعه حسگرها وجود دارد، برخی الگوهای تکراری در میان خودروهای خودران قابل مشاهده است. در این مقاله، این الگوها بررسی شده و توضیحی در مورد رویکردهای مختلف ارائه می‌شود. این مقاله بر موقعیت حسگر و تأثیر میدان دید حسگرها روی سناریوهایی که خودروهای خودران می‌توانند مدیریت کنند، متمرکز است. برای جزئیات مربوط به حسگرها و فناوری حسگر می‌توان به مقاله [۷] مراجعه کرد. این مقاله بیشتر بر دوربین، لیدار و رادار تمرکز دارد. حسگرهای دیگری مانند حسگرهای فراصوت یا حرارتی موضوع اصلی این مقاله نیستند.

این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است: بخش دوم الگوهای به کار رفته در برخی از خودروهای خودران موجود را ارائه می‌کند. بخش سوم ملاحظات عمومی را در طراحی الگوهای حسگر معرفی می‌کند. بخش چهارم حسگرهای مختلف، موقعیت نصب آنها و مزایا و معایب هر کدام را ارائه می‌دهد. بخش پنجم نیز به جمع‌بندی مطالب اختصاص داده شده است.

۲- الگوهای به کار رفته در خودروهای خودران

درک محیط، از جمله کسب اطلاعات محیط خارجی و برآورد وضعیت خودرو، یکی از مهم‌ترین کارها در خودروهای خودران است. علاوه بر این، الگوریتم‌های ادراک محیط نیاز به حسگر دارند. یک خودروی خودران کامل باید مجهز به حسگرهای مختلف باشد تا عملکرد ایمن و پایدار آن را تضمین کند. بنابراین، حسگرهای دقیق و با اطمینان بالا برای انجام وظیفه برنامه‌ریزی شده، بسیار مهم هستند. علاوه بر این، انواع حسگرهای به کار

رفته، تعداد آنها و موقعیت نصب آنها بر عملکرد درک محیط تأثیر زیادی دارد.

در این بخش، مروری کوتاه بر الگوهای به کار رفته در خودروهای خودران موجود ارائه می‌شود. جدول (۱)، الگوهای به کار رفته در این خودروها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، تنوع زیادی در الگوهای به کار رفته وجود دارد. در این میان، دوربین جلو، رادار جلو و پوشش ۳۶۰ درجه رادار در اطراف خودرو در اکثر خودروهای خودران موجود، استفاده شده است. از طرفی، دوربین زاویه باز در جلو که برای تشخیص چراغ راهنمایی استفاده می‌شود، در خودروهای خودران موجود، کمتر به کار رفته است.

۳- ملاحظات عمومی

با توجه به ویژگی‌های هر نوع حسگر، حسگرهای یک خودروی خودران، دامنه طراحی عملیاتی^۳ آن را، یعنی محیط‌هایی که خودرو می‌تواند بدون خطر در آن‌ها مستقر شود، تعیین می‌کنند. شناسایی حسگرهای مورد نیاز برای «حل» دامنه طراحی عملیاتی، کار پیچیده‌ای است زیرا موارد زیادی وجود دارند که باید مورد بررسی قرار گیرند. در حالی که همه حسگرها دارای ویژگی‌ها و محدودیت‌های منحصر به فرد هستند، هر حسگر به صورت یک مصالحه بین دقت، برد، نرخ نمونه‌گیری، میدان دید، هزینه و پیچیدگی کلی سیستم انتخاب می‌شود.

یک روش معمول برای شناسایی مجموعه حسگرهای مورد نیاز برای حل یک دامنه طراحی عملیاتی، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و بررسی عملکرد مجموعه‌های حسگر در تشخیص اشیاء است. عملکرد مجموعه‌های مختلف، مقایسه شده و پیکربندی‌های مورد نظر به صورت تکراری بهبود می‌یابند. این رویکرد داده‌محور، امکان استفاده از یادگیری ماشین را برای شناسایی پیکربندی بهینه، فراهم می‌کند. سناریوها را می‌توان به‌طور خودکار از خودروهای موجود در میدان جمع‌آوری کرد یا به‌صورت دستی طراحی کرد. در ادامه، مجموعه‌ای از سناریوهای چالش‌برانگیز و موارد برجسته ارائه می‌شوند.

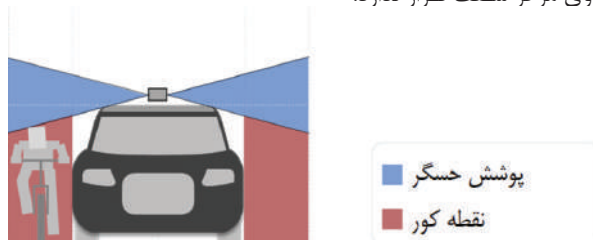
۳-۱- موانع هوایی و سقفی

موانع مسدود کننده مسیر خودرو که به زمین متصل نیستند، به‌عنوان مثال درهای باز کامیون، بارهای بیرون زده کامیون، شاخه‌های درخت، دروازه‌های بازویی و پل‌های کم‌ارتفاع، توسط لیدارهایی با میدان دید کم یا ارتفاع کم، از دست می‌روند، برای دوربین‌ها بسیار چالش‌برانگیز هستند و حتی شناسایی صحیح آن‌ها برای رادارها نیز دشوار است. در شکل (۱)، حسگر لیدار با میدان دید عمودی کم، خیلی پایین نصب شده است و هیچ یک از پرتوهای لیدار ساطع شده با مانع بیرون زده، برخورد نمی‌کنند. همچنین در شکل (۲)، وضوح عمودی حسگر لیدار خیلی کم است و هیچ پرتوی به مانع برخورد نمی‌کند، در نتیجه مانع بیرون زده تشخیص داده نمی‌شود.

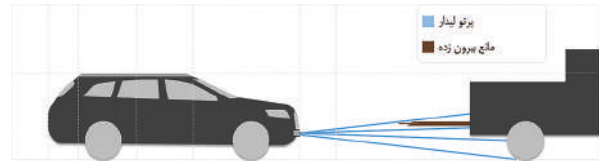


شکل ۱: عدم برخورد پرتوهای لیدار با مانع بیرون زده [۸]

روی مرکز سقف قرار ندارد.



شکل ۳: عدم قرارگیری دوچرخه‌سوار در میدان دید حسگر لیدار نصب شده در مرکز سقف [۸]



شکل ۲: عدم تشخیص مانع بیرون زده توسط لیدار با وضوح عمودی خیلی کم [۸]

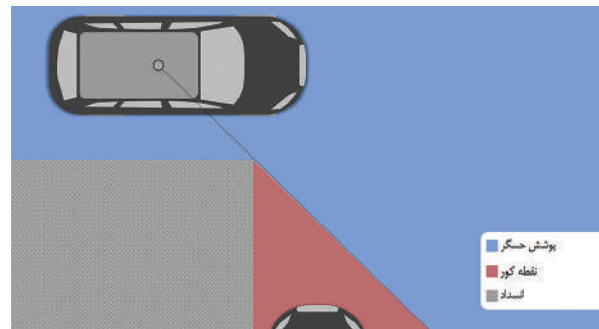
۳-۲- عبور دوچرخه‌سوار

در هنگام گردش به راست، برای عوامل ترافیک که ممکن است با گردش، به آن‌ها برخورد شود باید احتیاط ویژه‌ای انجام شود. در حالی که تشخیص خودروهای بزرگ، به نسبت آسان است (از طریق رادار، به عنوان مثال برای کمک در تغییر خط عبور)، تشخیص مشارکت‌کنندگان سبک در ترافیک مانند دوچرخه‌سواران، برای حسگرهایی که در مرکز سقف نصب می‌شوند، به طور قابل توجهی دشوارتر است [۹]. در شکل (۳)، دوچرخه‌سواری که در کنار خودرو در حال سواری کردن است در میدان دید حسگر لیدار نصب شده

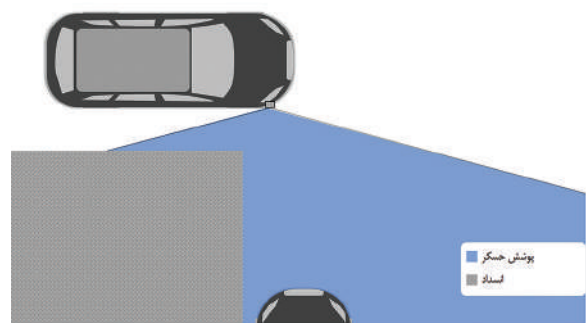
جدول ۱: الگوهای به کار رفته در خودروهای خودران موجود

نام	لیدار تک در سقف	لیدارهای متعدد در سقف	لیدار جلو	لیدار عقب	لیدارهای جانبی	دوربین‌ها در ضلع‌های سقف	دوربین‌ها در گوشه‌های سقف	برج دوربین مرکزی	دوربین جلو	دوربین زاویه باز در جلو	پوشش ۳۶۰ درجه رادار	رادار جلو	رادار عقب
Waymo [3]	✓		✓	✓	✓			✓			✓		
BMW [10]			✓						✓		✓	✓	
Nissan [11]									✓		✓	✓	
Ford [12]	✓							✓			✓	✓	
General Motors [13]		✓			✓			✓	✓		✓	✓	✓
Aptiv [14]			✓	✓	✓				✓		✓	✓	✓
Tesla [4]									✓	✓		✓	
Mercedes-Benz [15]		✓					✓		✓		✓	✓	
Bosch [16]			✓			✓			✓		✓	✓	
Zoox [17]		✓					✓		✓		✓		✓
Nuro [5]	✓							✓	✓		✓	✓	✓
Pony.ai [18]	✓		✓			✓			✓	✓	✓	✓	✓
Baidu [19]	✓		✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓
Aurora [20]	✓	✓		✓	✓	✓			✓		✓		
Apple [21]		✓				✓	✓		✓		✓	✓	
Uber [22]	✓					✓			✓			✓	

کند اما در شکل (۵) حسگر رو به جانب و نزدیک به جلوی خودرو می‌تواند به خط عبور متقاطع نگاه کند و ترافیک عبوری را تشخیص دهد.



شکل ۴: عدم درک ترافیک آمده از خط عبور متقاطع مسدود توسط حسگر نصب شده در مرکز [۸]



شکل ۵: تشخیص ترافیک عبوری توسط حسگر رو به جانب و نزدیک به جلو [۸]
۳-۴- مانع کم ارتفاع در کنار خودرو

موانع کم ارتفاع هنگام استفاده از حسگرهایی با میدان دید عمودی کم، یک چالش هستند زیرا یا نادیده گرفته می‌شوند یا روی عوامل ترافیک پشت خود سایه می‌اندازند [۲۴]. در شکل (۶)، یک مانع کم ارتفاع توسط حسگر نادیده گرفته شده است زیرا ارتفاع آن بسیار کوتاه است. همچنین در شکل (۷)، یک مانع نزدیک و کم ارتفاع، ترافیک پشت خود را به طور کامل مسدود کرده است.



شکل ۶: نادیده گرفته شدن مانع کم ارتفاع توسط حسگر [۸]

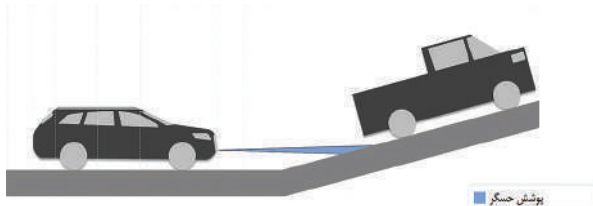


شکل ۷: مسدود شدن ترافیک توسط مانع نزدیک و کم ارتفاع [۸]

۳-۵- شیب

شیب تأثیر عمده‌ای در الزامات میدان دید عمودی حسگرها دارد. هنگام نزدیک شدن به سطوح شیب‌دار یا زیرگذرها، پوشش سایر

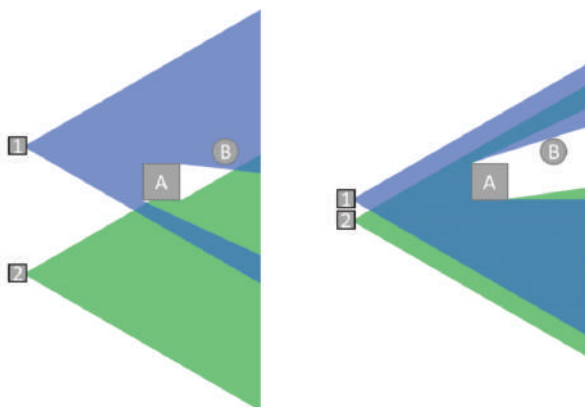
عوامل ترافیک کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هندسه سطح جاده نیز باید برای تشخیص اشیاء، جبران شود. در غیر این صورت رمپ‌ها به عنوان موانع طبقه‌بندی می‌شوند و موانع واقعی خارج از میدان دید، از دست می‌روند [۲۵]. تقاطع‌هایی با خطوط عبور صعودی یا نزولی به طور ویژه چالش برانگیز هستند. در شکل (۸)، سطح شیب‌دار در جلوی خودرو به اشتباه به عنوان یک مانع تفسیر می‌شود، در حالی که خودروی دوم به هیچ وجه تحت پوشش حسگر نیست.



شکل ۸: تفسیر سطح شیب‌دار در جلوی خودرو به عنوان مانع [۸]

۳-۶- تجمیع حسگرها

وقتی حسگرها جدا از یکدیگر نصب شوند، دید متفاوتی نسبت به محیط خودرو خواهند داشت (اختلاف منظر) که ممکن است منجر به وضعیتی شود که در آن یک حسگر، یک شیء را درک کند، در حالی که این شیء برای حسگر دیگر مسدود باشد. این موضوع یک چالش برای حسگرآمیزی^۵ است: برای آمیزش سطح بالا (آمیزش داده‌های پردازش شده)، تشخیص‌های متناقضی از حسگرها وجود خواهد داشت. برای آمیزش سطح پایین (آمیزش داده‌های حسگر خام)، اختلاف منظر در مناطقی ایجاد می‌شود که نمی‌توانند بین حسگرها مطابقت داشته باشند و در نتیجه «حفره‌هایی» در داده‌های حسگر آمیخته شده، به وجود می‌آیند. این تأثیرات به طور ویژه برای محیط نزدیک، بسیار شدید است. برای کاهش این مسائل، انواع مختلف حسگر، به ویژه دوربین و لیدار، معمولاً با هم تجمیع می‌شوند و حسگرها تا حد ممکن به یکدیگر نزدیک می‌شوند تا میدان دید آن‌ها با هم هم‌پوشانی داشته باشد [۲۶]. در شکل (۹) سمت چپ، مانع B توسط حسگر ۱ درک می‌شود اما این مانع برای حسگر ۲ مسدود است. در شکل سمت راست، با نزدیک شدن حسگرها به یکدیگر، اختلاف منظر آنها نیز از بین می‌رود.



شکل ۹: جمع کردن حسگر [۸]

۳-۷- پوشش و افزونگی^۶

بسته به درجه خودرانی در نظر گرفته شده برای خودرو و دامنه طراحی عملیاتی آن، الزامات نسبت به مجموعه حسگر بسیار

متفاوت است. برای ویژگی حفظ خط عبور بزرگراه با نظارت راننده، یک رادار و دوربین رو به جلو می‌تواند کافی باشد. برای رانندگی خودکار در محیط‌های شهری، پوشش افقی ۳۶۰ درجه در هر سه نوع اصلی حسگر (دوربین، لیدار و رادار) مورد نیاز است تا بتوان در سناریوهای مربوطه، در عین استفاده از حالت‌های مختلف، برای جبران نقاط ضعف مربوطه، به طور قابل اعتمادی، عوامل ترافیک را تشخیص داد [۲۷]. در واقع، پوشش ۳۶۰ درجه لازم است، اما کافی نیست. یک لیدار چرخشی ۳۶۰ درجه در بالای خودرو برای تشخیص موانع در بسیاری از موارد کافی نیست و باید با لیدارهای بیشتری تکمیل شود.

۳-۸- ملاحظات تجاری

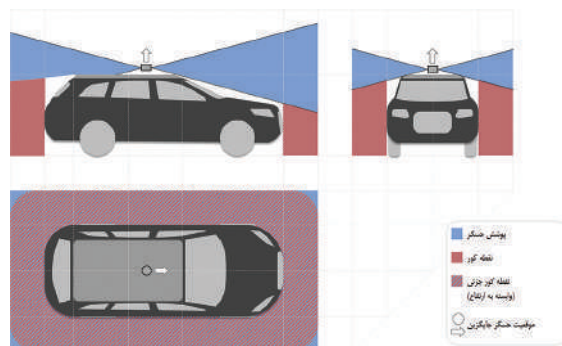
حل یک دامنه طراحی عملیاتی، امکان ارائه یک محصول را فراهم می‌کند. این که مورد تجاری مثبتی برای این محصول وجود داشته باشد یا خیر، به بسیاری از عوامل بستگی دارد، مانند ماهیت خدمات ارائه شده توسط خودروی خودران، منطقه ارائه خدمات و ... در این مقاله به بررسی ملاحظات تجاری پرداخته نمی‌شود، اما برای طراحی مجموعه حسگر، این موضوع بسیار مهم است. جدا از مشارکت حسگرها در حل دامنه طراحی عملیاتی؛ هزینه، قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری تولید از عوامل تعیین کننده برای استفاده و استقرار در ناوگان بزرگ هستند [۲۸].

۴- لیدار

لیدارها فناوری به نسبت جدیدی در صنعت خودرو هستند. این حسگرها قبلاً بیشتر در رباتیک متداول بودند. با پیشرفت سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده^۷ و رانندگی خودکار، این مورد در حال تغییر است. در حالی که خودروهای خودران اولیه از لیدارهایی با وضوح پایین استفاده می‌کردند، لیدارهایی با وضوح بالا و امکان شناسایی در برد و حتی طبقه‌بندی موارد شناسایی شده، در حال حاضر برای خودروهای خودران با بودجه حسگر زیاد، اختصاص داده شده‌اند [۲۹]. یک مساله مهم در مورد لیدار، مشکل در بازسازی داده‌های ابر نقاط^۸ در شرایط آب و هوایی نامناسب و گرد و غبار و مساله دیگر حجم و گران بودن آن است [۳۰]. در ادامه موقعیت‌های مختلف نصب لیدار و مزایا و معایب هر کدام توضیح داده شده می‌شود.

۴-۱- لیدار تک در مرکز سقف

در شکل (۱۰)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۰: لیدار تک در مرکز سقف [۸]

حالت‌های جایگزین

- حسگر را می‌توان بالا برد تا نقطه کور ناشی از انسداد سقف را کاهش داد.

- حسگر را می‌توان از مرکز سقف به لبه جلوی سقف منتقل کرد که باعث بهبود درک جلو و در عین حال کاهش درک عقب می‌شود.

مزایا

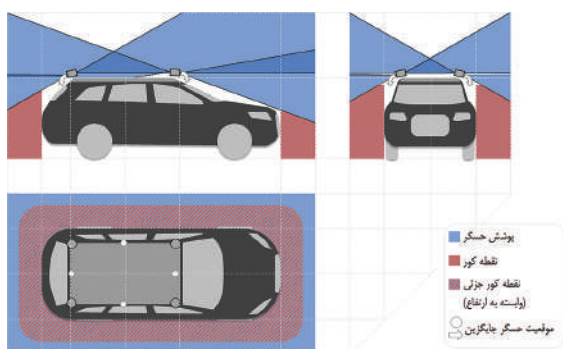
- نصب ساده، هیچ تلاشی برای همگام‌سازی و تراز کردن ابر نقاط لازم ندارد.
- پوشش ۳۶۰ درجه با یک حسگر.
- نمای کلی خوب، توانایی جستجوی سایر عوامل ترافیک.

معایب

- نقاط کور برای اشیاء با ارتفاع کم در همه جهات، به خصوص در عقب.
- حسگر برای ارتقاء میدان دید عمودی باید از سقف بالاتر برود. موقعیت بالا باعث ایجاد چالش‌های مکانیکی در صورت کاهش ناگهانی سرعت می‌شود و ورود به مناطقی با ارتفاع کم را غیر ممکن می‌کند.

۴-۲- لیدارهای متعدد در سقف

در شکل (۱۱)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۱: لیدارهای متعدد در سقف [۸]

حالت‌های جایگزین

- حسگرها می‌توانند کج شوند تا نقاط کور کاهش یابند.
- حسگرها را می‌توان روی لبه‌های سقف خودرو نصب کرد یا با حسگرهای اضافی روی سقف تکمیل کرد.

مزایا

- عدم انسداد توسط سقف خودرو.
- حسگرهای کج در بین پیکربندی‌های نصب شده روی سقف به پوشش بهینه می‌رسند [۳۱].

معایب

- پیچیدگی بیشتر از نظر یکپارچگی و آمیزش نقاط ابری در مقایسه با حسگر تک.
- کج کردن حسگرها توسط میدان دید عمودی آن‌ها محدود می‌شود. کجی کم منجر به ایجاد نقاط کور در نزدیکی خودرو می‌شود در حالی که کجی زیاد، پوشش روی اشیاء بلند را محدود می‌کند.

۴-۳- لیدار در جلو

در شکل (۱۲)، این حالت نشان داده شده است.

حالت‌های جایگزین

- لیدارهایی با میدان دید عمودی بزرگتر، عمل در شیب‌های تندتر را امکان‌پذیر می‌کنند.
- نقاط نصب بالاتر در پشت شیشه جلوی خودرو یا مرکز لبه

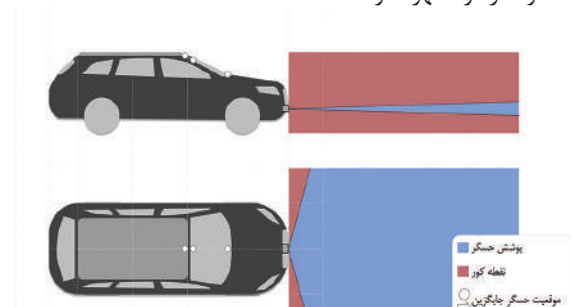
سقف جلو، امکان مشاهده بر فراز سایر عوامل ترافیک و موانع کم ارتفاع را با هزینه از دست دادن موانع کم ارتفاع نزدیک فراهم می‌کند.

مزایا

- نصب ساده و یکپارچگی خوب در خودرو.
- روی سطح صاف: پرتوهای لیدار تقریباً موازی با سطح جاده هستند. از این رو هیچ بازتابی از سطح جاده بر نمی‌گردد. این موضوع امکان تفسیر مقدار بازگردانده شده را به طور مستقیم به عنوان فاصله فراهم می‌کند.
- برای تشخیص خودروهای روبه‌رو در بزرگراه‌ها مناسب است.

معایب

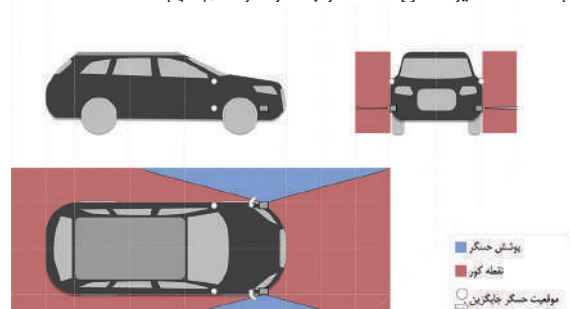
- در شیب‌ها؛ حسگر، صفحه زمین را به عنوان مانع برای جاده‌های صعودی و هیچی را برای جاده‌های نزولی باز می‌گرداند.
- اگر با حسگرهای دیگر ترکیب نشود، پوشش کافی برای رانندگی خودکار در شهر ندارد.



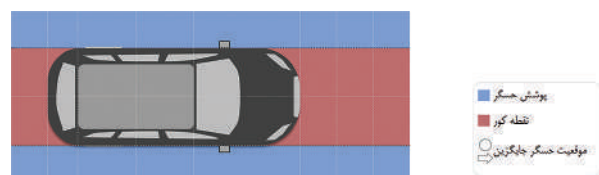
شکل ۱۲: لیدار در جلو [۸]

۴-۴- لیدارهای جانبی

در شکل (۱۳)، این حالت نشان داده شده است. شکل (۱۴) نیز لیدارهای ۳۶۰ درجه بیرون زده در کناره‌های خودرو را نشان می‌دهد که پوشش ۱۸۰ درجه را فراهم می‌کنند.



شکل ۱۳: لیدارهای جانبی [۸]



شکل ۱۴: لیدارهای ۳۶۰ درجه بیرون زده [۸]

حالت‌های جایگزین

- لیدارهایی با میدان دید افقی و عمودی بیشتر، امکان پوشش کامل کناره‌های خودرو را فراهم می‌کنند.
- موقعیت‌های مختلف: موقعیت پشت چرخ جلو می‌تواند یکپارچگی را ساده کند. موقعیت زیر آینه جانبی امکان مشاهده بر فراز موانع کم ارتفاع را فراهم می‌کند.

مزایا

- سناریوی عبور با انسداد را امکان‌پذیر می‌کند: خودرو می‌تواند ترافیک متقاطع را در تقاطع‌ها، بدون ورود و مسدود کردن ترافیک، شناسایی کند.

معایب

- حسگر با میدان دید عمودی کم دارای مشکلاتی در ارتباط با شیب است.

۵-۵- دوربین

دوربین‌ها، برخلاف لیدارها، رادارها و حسگرهای فراصوت، حسگرهایی غیرفعال هستند که نور منعکس شده از محیط را جمع می‌کنند. در حالی که دوربین‌ها وضوح نسبی بالایی دارند، داده‌های آن‌ها تحت تأثیرات مختلف محیطی (تاریکی، باران، مه، آفتاب کم، اسپری، برف، گرد و غبار و ...) قرار دارند. داده‌های دوربین باید توسط الگوریتم‌های بینایی رایانه‌ای گران‌قیمت یا یادگیری عمیق، تفسیر شوند تا اطلاعات مفیدی برای سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده و رانندگی خودکار فراهم شود، در حالی که داده‌های حسگرهای اندازه‌گیری فاصله مانند لیدار می‌توانند (تقریباً) همان طوری که هستند برای جلوگیری از برخورد استفاده شوند. از جنبه مثبت، داده‌های دوربین (پس از تفسیر) غنی‌ترین نمایش معنایی را از محیط خودرو ارائه می‌دهند [۳۲]، اما از جنبه منفی، دوربین‌ها دارای محدودیت در تشخیص اشیاء در فاصله زیاد و همچنین دقت کم در برآورد فاصله و سرعت طولی آن‌ها هستند [۳۳].

دوربین‌هایی با زاویه دید عریض (چشم‌ماهی) میدان دید بزرگی دارند، اما تصاویر آن‌ها تحت اعوجاج^{۱۰} لنز قرار می‌گیرند که باید قبل از پردازش بیشتر، اصلاح شوند. اصلاح اعوجاج لنز، قسمت‌هایی از تصویر را از بین می‌برد و در نتیجه میدان دید را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ممکن است نواحی نزدیک به لبه‌های تصویر، تار شوند و برای کارهای تشخیص تصویر، از اطمینان کمتری برخوردار شوند [۳۴].

۵-۱- دوربین‌های زاویه باز روی سقف

بسیاری از خودروها مجهز به مجموعه‌ای از دوربین‌های زاویه دید عریض هستند تا بتوانند دید پرنده‌ای^{۱۱} از محیط نزدیک خودرو ایجاد کنند که پارک کردن را آسان‌تر می‌کند. به طور معمول، با نصب چندین دوربین ۱۸۰ درجه روی خودرو، به پوشش ۳۶۰ درجه با دوربین می‌رسیم. برای سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده، دوربین‌ها در اطراف بدنه خودرو (سپر جلو، آینه‌ها، درب صندوق عقب) نصب می‌شوند، در حالی که برای رانندگی خودکار، آن‌ها روی سقف خودرو، به عنوان مثال در مراکز لبه سقف، نصب می‌شوند [۳۵]. شکل (۱۵)، پوشش ۳۶۰ درجه این دوربین‌ها را نشان می‌دهد.

حالت‌های جایگزین

- دوربین‌ها می‌توانند کج شوند تا محیط نزدیک اطراف خودرو را بهتر ببینانند.
- دوربین‌ها را می‌توان به جای مراکز لبه سقف، در گوشه‌های خودرو، یا به صورت «برج دوربین» مرکزی، مانند شکل (۱۷) نصب کرد.

مزایا

- پوشش ۳۶۰ درجه.
- برای پشتیبانی از پارک کردن، نمای از بالا را امکان‌پذیر می‌کند.

معایب

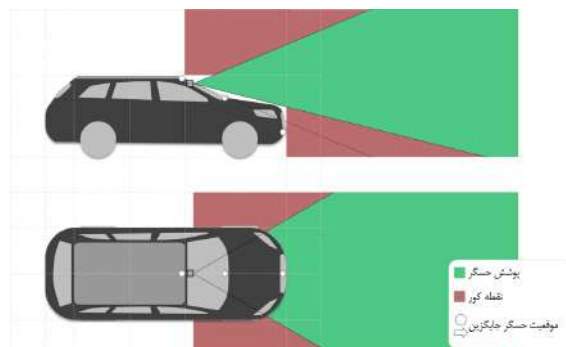
- دوربین‌های ۱۸۰ درجه تحت اعوجاج شدید لنز قرار می‌گیرند.
- وضوح دوربین‌ها در یک منطقه بزرگ پخش می‌شود و وضوح به نسبت کمی را در هر درجه به دست می‌آورد که دامنه تشخیص جسم را به طور مؤثر محدود می‌کند.
- دوربین‌های استریو^{۱۲} می‌توانند تخمین فاصله را ارائه دهند.

مزایا

- دوربین‌های جلو از چراغ‌های جلوی خودرو در شب بهره می‌برند.
- ویژگی‌های سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را مانند هشدار خروج از خط عبور، امکان پذیر می‌کند.
- اگر پشت شیشه جلو نصب شود در برابر باران و خاک محافظت می‌شود.

معایب

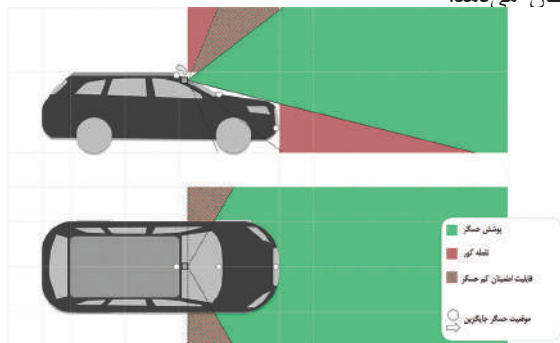
- میدان دید عمودی توسط کاپوت خودرو محدود می‌شود، از این رو اجسام کوچک جلوی خودرو مسدود می‌شوند (مگر این که دوربین روی سپر جلو نصب شده باشد).
- اگر با حسگرهای دیگر ترکیب نشود، پوشش کلی برای رانندگی خودکار شهری فراهم نمی‌شود.



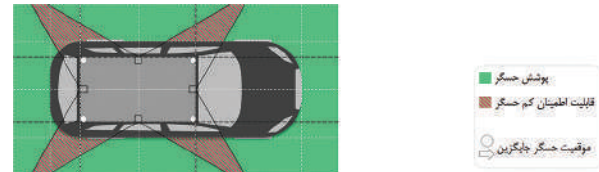
شکل ۱۸: دوربین جلو [۸]

۵-۵- دوربین زاویه باز

سامانه‌های دوربین جلو و دوربین دید فراگیر به طور معمول به دلیل محدود بودن میدان دید عمودی قادر به تشخیص اجسام نزدیک و مرتفع مانند چراغ‌های راهنمایی و رانندگی نیستند. با افزودن یک دوربین زاویه باز نصب شده در مرکز لبه جلوی سقف، این مسئله قابل حل است. بسته به موقعیت چراغ‌های راهنمایی و رانندگی در محیط هدف، ممکن است لازم باشد که این دوربین‌ها به سمت بالا متمایل شوند [۳۶]. شکل (۱۹)، دوربین زاویه باز را نشان می‌دهد.



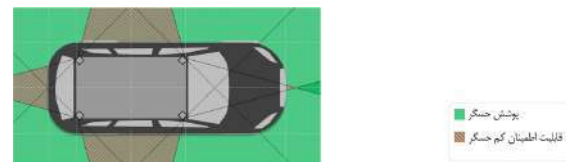
شکل ۱۹: دوربین زاویه باز برای تشخیص چراغ راهنمایی [۸]



شکل ۱۵: پوشش ۳۶۰ درجه دوربین‌های روی سقف [۸]

۵-۲- دوربین‌ها در گوشه‌های سقف

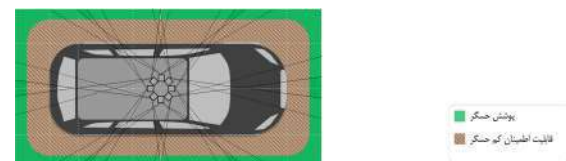
دوربین‌های موجود در گوشه‌های سقف در مقایسه با دوربین‌های موجود در مراکز لبه سقف، مناطق بزرگتری را با قابلیت اطمینان حسگر پایین نشان می‌دهند (بستگی زیادی به ابعاد خودرو دارد). علاوه بر این، نمای بسیار مهم جلوی خودرو توسط قسمت‌های بیرونی میدان دید دوربین پوشانده می‌شود. برای حداقل اعوجاج، نمای جلو باید در محور نوری^{۱۱} دوربین قرار بگیرد [۳۴]. شکل (۱۶)، دوربین‌ها را در گوشه‌های سقف نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: دوربین‌ها در گوشه‌های سقف [۸]

۵-۳- برج دوربین مرکزی

به جای دوربین‌های ۱۸۰ درجه، دوربین‌های ۱۲۰ درجه‌ای که کمتر تحت تأثیر اعوجاج لنز قرار می‌گیرند، می‌توانند به صورت «برج دوربین» روی مرکز سقف نصب شوند. این کار می‌تواند با یک لیدار ۳۶۰ درجه مرکزی ترکیب شود تا یک مازول حسگر جمع و جور تشکیل شود. همان طور که برای لیدارها توضیح داده شد، حسگرهای نصب شده در این پیکربندی نمی‌توانند اجسام مسدود شده توسط سقف را مشاهده کنند. شکل (۱۷)، برج دوربین مرکزی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: برج دوربین مرکزی [۸]

۵-۴- دوربین جلو

دوربین‌های جلو، حسگر اصلی (و اغلب تنها حسگر) تشخیص محیط در خودروهای فعلی هستند. این حسگرها به نسبت ارزان هستند اما انواع مختلفی از سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را امکان‌پذیر می‌کنند - اگر چه به دلیل حساسیت نسبت به شرایط محیطی، مانند همه دوربین‌ها، محدود هستند. شکل (۱۸)، دوربین جلو را نشان می‌دهد.

۵-۶- حسگرهای بینایی جایگزین

جدا از پیکربندی‌های مبتنی بر دوربین‌های تک‌چشمی که در بالا بحث شد، چندین حسگر جالب دیگر نیز برای درک بینایی وجود دارند:

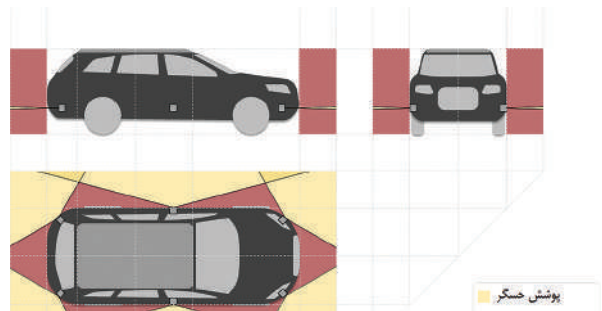
- دوربین‌های استریو، تخمین مسافت را از طریق بازسازی سه بعدی ارائه می‌دهند [۳۷].
- دوربین‌های حرارتی در شب و تحت شرایط چالش‌برانگیز، دقت تشخیص بهتری را امکان‌پذیر می‌کنند [۳۸].
- دوربین‌های با نرخ فریم بالا، ردیابی و تشخیص اشیاء در حال حرکت را به شدت ساده می‌کنند [۳۹].
- دوربین‌های رویدادی^{۱۳}، پهنای باند مورد نیاز برای انتقال داده را کاهش می‌دهند و مسیر واکنشی با تأخیر کمی را برای جلوگیری از برخورد فراهم می‌کنند [۴۰].

۶- رادار

رادارها در حال حاضر در صنعت خودرو استفاده می‌شوند. این حسگرها از سال‌ها قبل در خودروها به کار گرفته می‌شدند تا ویژگی‌های سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را، مانند کروز کنترل تطبیقی و ترمزگیری اضطراری پیشرفته، فراهم کنند. رادارها فاصله و سرعت شعاعی را به طور دقیق اندازه‌گیری می‌کنند. این حسگرها به ویژه در تشخیص اشیاء فلزی خوب هستند و همچنین قادر به شناسایی اجسام غیر فلزی مانند عابران پیاده با برد کمتر هستند [۴۱]، اما دارای دقت کم در برآورد زاویه هدف و در نتیجه موقعیت و سرعت عمود بر بُعد برد خود هستند و برای دستیابی به وضوح زاویه‌ای بیشتر، باید از روش‌های مختلف پردازش سیگنال استفاده شود [۴۲].

۶-۱- پوشش ۳۶۰ درجه رادارهای میان‌برد و کوتاه‌برد

در شکل (۲۰)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۲۰: پوشش ۳۶۰ درجه با رادارهای میان‌برد و کوتاه‌برد [۸]

مزایا

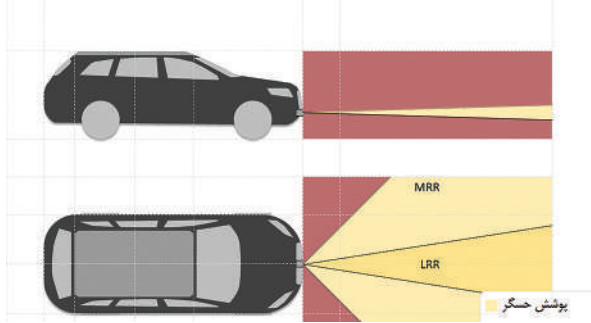
- مجموعه‌ای از ۴ تا ۶ رادار کوتاه‌برد (برد تقریبی ۳۰ متر) و میان‌برد (برد تقریبی ۱۰۰ متر) برای رسیدن به ۳۶۰ درجه پوشش افقی و حل بسیاری از سناریوهای معمول در دامنه‌های طراحی عملیاتی شهری کافی است.
- این حالت، افزونگی برای لیدار و دوربین فراهم می‌کند و در برابر شرایط چالش‌برانگیز محیط مقاوم‌تر است [۴۳].

معایب

- میدان دید عمودی باریک رادارهای معمولی خودرو هنگام مواجهه با زمین‌های غیر مسطح، چالش‌های شدیدی ایجاد می‌کند.

۶-۱- رادار جلو

در شکل (۲۱)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۲۱: رادار جلو [۸]

مزایا

- رادارهای میان‌برد (برد تقریبی ۱۰۰ متر) و دوربرد (برد تقریبی ۲۵۰ متر) ویژگی‌های سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را، مانند کروز کنترل تطبیقی و ترمزگیری اضطراری مستقل امکان‌پذیر می‌کنند.
- نسبت به لیدار و دوربین در برابر شرایط محیطی چالش‌برانگیز مانند باران، مه و برف مقاوم‌تر است [۴۳].

معایب

- اگر با حسگرهای دیگر ترکیب نشود، پوشش کلی کافی برای رانندگی خودکار شهری ندارد.

۷- نتیجه‌گیری

حس کردن برای خودروهای خودران مانند حس کردن برای موجودات زنده است - هیچ پیکربندی حسگر کاملی وجود ندارد که در همه محیط‌ها غالب باشد و متناسب با همه بودجه‌ها باشد. دامنه محصولات حسگر موجود به سرعت در حال افزایش است و پیکربندی‌های متعددی وجود دارند که کار حس کردن را با مزایا و معایب مربوطه انجام می‌دهند.

فراهم آوردن پیش‌زمینه در مورد طراحی مجموعه حسگر و بررسی الگوهای تکراری برای حالت‌های مختلف حسگر در این مقاله، برای ارائه یک پاسخ مطلق مورد نظر نبود. در عوض قرار بود که روند تفکر طراحی مجموعه حسگر انتقال یابد و درک منطق در پشت پرده انتخاب حسگر را امکان‌پذیر کند. گام بعدی برای آشنایی بیشتر با حسگرهای رانندگی خودکار، نگاه عمیق‌تری به فناوری حسگر و محصولات حسگری است که در حال حاضر در بازار وجود دارد.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Inertial Measurement Unit
- 2 Connected Vehicle
- 3 Operational Design Domain
- 4 Colocation
- 5 Sensor Fusion
- 6 Redundancy
- 7 Advanced Driver Assistance Systems
- 8 Point Cloud
- 9 Distortion
- 10 Bird View
- 11 Optical Axis
- 12 Stereo Cameras
- 13 Event Cameras

Sensor Placement Considering Redundancy, Range and Field of View," 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2020, pp. 1484-1489, doi: 10.1109/ICIEA48937.2020.9248170.

- [28] Skrickij, V., Šabanović, E. and Žuraulis, V., 2020. Autonomous road vehicles: recent issues and expectations. IET Intelligent Transport Systems, 14(6), pp.471-479.
- [29] T. -H. Kim and T. -H. Park, "Placement Optimization of Multiple Lidar Sensors for Autonomous Vehicles," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 5, pp. 2139-2145, May 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2915087.
- [30] C. -P. Hsu et al., "A Review and Perspective on Optical Phased Array for Automotive LiDAR," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 27, no. 1, pp. 1-16, Jan.-Feb. 2021, Art no. 8300416, doi: 10.1109/JSTQE.2020.3022948.
- [31] F. Berens, S. Elser and M. Reischl, "Genetic Algorithm for the Optimal LiDAR Sensor Configuration on a Vehicle," in IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 3, pp. 2735-2743, 1 Feb.1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2021.3136362.
- [32] Vijay, R., Cherian, J., Riah, R., De Boer, N. and Choudhury, A., 2021, September. Optimal Placement of Roadside Infrastructure Sensors towards Safer Autonomous Vehicle Deployments. In 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC) (pp. 2589-2595). IEEE.
- [33] B. Miethig, Y. Huangfu, J. Dong, J. Tjong, M. Von Mohrenschildt and S. Habibi, "A Novel Method for Approximating Object Location Error in Bounding Box Detection Algorithms Using a Monocular Camera," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 9, pp. 8682-8691, Sept. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3097589.
- [34] V. Ravi Kumar et al., "OmniDet: Surround View Cameras Based Multi-Task Visual Perception Network for Autonomous Driving," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 2830-2837, April 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3062324.
- [35] E. Marti, M. A. de Miguel, F. Garcia and J. Perez, "A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving," in IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 11, no. 4, pp. 94-108, winter 2019, doi: 10.1109/MITS.2019.2907630.
- [36] J. Müller, A. Fregin and K. Dietmayer, "Multi-camera system for traffic light detection: About camera setup and mapping of detections," 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017, pp. 165-172, doi: 10.1109/ITSC.2017.8317946.
- [37] H. Zhang, H. Shishido and I. Kitahara, "Superimposition of 3D Dynamic Objects on a Static Environment for Driver Assistance System," 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2021, pp. 479-483, doi: 10.1109/GCCE53005.2021.9622079.
- [38] Z. Chen and X. Huang, "Pedestrian Detection for Autonomous Vehicle Using Multi-Spectral Cameras," in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 4, no. 2, pp. 211-219, June 2019, doi: 10.1109/TIV.2019.2904389.
- [39] H. Rebecq, R. Ranfil, V. Koltun and D. Scaramuzza, "High Speed and High Dynamic Range Video with an Event Camera," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 43, no. 6, pp. 1964-1980, 1 June 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2019.2963386.
- [40] H. Cao, G. Chen, J. Xia, G. Zhuang and A. Knoll, "Fusion-Based Feature Attention Gate Component for Vehicle Detection Based on Event Camera," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 21, pp. 24540-24548, 1 Nov.1, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3115016.
- [41] J. Nidamanuri, C. Nibhanupudi, R. Assfalg and H. Venkataraman, "A Progressive Review - Emerging Technologies for ADAS Driven Solutions," in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, doi: 10.1109/TIV.2021.3122898.
- [42] A. P. Sligar, "Machine Learning-Based Radar Perception for Autonomous Vehicles Using Full Physics Simulation," in IEEE Access, vol. 8, pp. 51470-51476, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977922.
- [43] O. Bialer, A. Jonas and T. Tirer, "Super Resolution Wide Aperture Automotive Radar," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 16, pp. 17846-17858, 15 Aug.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3085677.
- [44] T. Lee, V. Skvortsov, M. Kim, S. Han and M. Ka, "Application of \$W\$-Band FMCW Radar for Road Curvature Estimation in Poor Visibility Conditions," in IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 13, pp. 5300-5312, 1 July1, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2837875.

مراجع

- [1] J. Hu, P. Bhowmick, F. Arvin, A. Lanzon and B. Lennox, "Cooperative Control of Heterogeneous Connected Vehicle Platoons: An Adaptive Leader-Following Approach," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 977-984, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2966412.
- [2] Taeihagh, Araz; Lim, Hazel Si Min (2 January 2019). "Governing autonomous vehicles: emerging responses for safety, liability, privacy, cybersecurity, and industry risks". Transport Reviews. 39 (1): 103–128.
- [3] Waymo, L. L. C. "On the road to fully self-driving." Waymo Safety Report (2020): 1-48.
- [4] Tesla Inc. "Tesla Vehicle Safety Report." Tesla Vehicle Safety Report.
- [5] Nuro. "Delivering Safety: Nuro's Approach." Nuro Safety Report: 1-33.
- [6] Gupta, S. and Snigdha, I., 2022. Multi-sensor fusion in autonomous heavy vehicles. In Autonomous and Connected Heavy Vehicle Technology (pp. 375-389). Academic Press.
- [7] Chen, Qiping, et al. "Sensing System of Environmental Perception Technologies for Driverless Vehicle: A Review of State of the Art and Challenges." Sensors and Actuators A: Physical (2021): 112566.
- [8] مهدی قاضی‌زاده، بهنام بهادری، «کاربرد حسگرها در خودروهای خودران»، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران، ۱۳۹۹
- [9] Q. Deng, X. Li, P. Ni, H. Li and Z. Zheng, "Enet-CRF-Lidar: Lidar and Camera Fusion for Multi-Scale Object Recognition," in IEEE Access, vol. 7, pp. 174335-174344, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2956492.
- [10] Autonomous Driving, Accessed on 1 January 2021; <https://www.bmwgroup.com/en/innovation/technologies-and-mobility/autonomes-fahren.html>.
- [11] Nissan's Self-Driving Car, Accessed on 1 January 2021; <https://www.nissanusa.com/experience-nissan/news-and-events/self-driving-autonomous-car.html>.
- [12] Autonomous Vehicles, Accessed on 1 January 2021; <https://corporate.ford.com/operations/autonomous-vehicles.html>.
- [13] Putting Self-Driving Cars On The Roads, Accessed on 1 January 2021; <https://www.gm.com/our-stories/self-driving-cars.html>.
- [14] The Autonomous Driving Platform, Accessed on 1 January 2021; <https://www.aprive.com/en/insights/autonomous-driving>.
- [15] Autonomous, Accessed on 1 January 2021; <https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/autonomous/>.
- [16] Self-driving car technology – Between man and machine, Accessed on 1 January 2021; <https://www.bosch.com/stories/autonomous-driving-interview-with-moritz-dechant/>.
- [17] Zoox, inc., Accessed on 1 January 2021; <https://www.zoox.com/>.
- [18] Pony.ai, Accessed on 1 January 2021; <https://www.pony.ai/>.
- [19] Apollo, Accessed on 1 January 2021; <https://www.apollo.auto/>.
- [20] Aurora, Accessed on 1 January 2021; <https://www.aurora.tech/>.
- [21] Harris, Mark (14 August 2015). Documents Confirm Apple Is Building Self-Driving Car. The Guardian. Accessed on 1 January 2021, <https://www.theguardian.com/technology/2015/aug/14/apple-self-driving-car-project-titan-sooner-than-expected>.
- [22] Griswold, Alison (19 April 19 2019), Uber raised \$1 billion for self-driving cars because it desperately needs the money, Quartz. Accessed on 1 January 2021, <https://qz.com/1599134/uber-secures-much-needed-1-billion-investment-for-self-driving-cars-unit/>.
- [23] Y. Zhang, X. Sun, H. Xu and E. Yao, "Tracking Multi-Vehicles With Reference Points Switches at the Intersection Using a Roadside LiDAR Sensor," in IEEE Access, vol. 7, pp. 174072-174082, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953747.
- [24] Li, J., Li, R., Wang, J. and Yan, M., 2019. Obstacle information detection method based on multiframe three-dimensional lidar point cloud fusion. Optical Engineering, 58(11), p.116102.
- [25] Y. Sun, W. Zuo, H. Huang, P. Cai and M. Liu, "PointMoSeg: Sparse Tensor-Based End-to-End Moving-Obstacle Segmentation in 3-D Lidar Point Clouds for Autonomous Driving," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 510-517, April 2021, doi: 10.1109/LRA.2020.3047783.
- [26] Zhao, Y., Bai, L., Zhang, Z. and Huang, X., 2021. A surface geometry model for LiDAR depth completion. IEEE Robotics and Automation Letters, 6(3), pp.4457-4464.
- [27] J. Dybedal and G. Hovland, "GPU-Based Optimisation of 3D



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای با قابلیت هماهنگی با توابع پیشرفته حمایت شبکه بر روی مولدهای فتوولتائیک

■ علی عمادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، emadi@mail.um.ac.ir

■ جواد ساده،* دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، sadeh@um.ac.ir

■ رضا بخشی جعفرآبادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، r.bakhshi@mail.um.ac.ir

*نویسنده مسئول

چکیده

با توجه به مزایای فراوان بکارگیری واحدهای تولید پراکنده به‌ویژه آنهایی که از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک استفاده می‌نمایند، اتصال آن‌ها به شبکه توزیع به‌طور فزاینده‌ای در حال گسترش است. در بین انواع مولدهای تجدیدپذیر، نیروگاه‌های فتوولتائیک به دلیل تولید انرژی پاک، بهره‌برداری و نگهداری ساده و دسترسی پذیری در اکثر مناطق، بیشتر از سایر فن‌آوری‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. علیرغم مزایای اشاره شده، اتصال مولدهای فتوولتائیک به شبکه توزیع، مسائلی در زمینه حفاظت شبکه ایجاد خواهد کرد. امکان تداخل عملکرد رله‌ها و ناهماهنگی آن‌ها، دوسو تغذیه شدن شبکه و وقوع حالت جزیره‌ای از جمله آن‌ها هستند. از سوی دیگر، با افزایش نفوذ این مولدها، فعال بودن توابع پیشرفته حمایت شبکه از جمله تنظیم‌های توان اکتیو و راکتیو، قابلیت گذر از افت ولتاژ (LVRT) و جابجایی بدون وقفه به حالت عملکرد مستقل به منظور جبران تولید غیرقابل پیش‌بینی آن‌ها در دستورالعمل‌های کنونی شبکه (Grid Code) لحاظ شده است. از آنجاکه این خدمات جانبی می‌تواند عملکرد روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای را مختل نماید، ارائه روش آشکارسازی حالت جزیره‌ای با در نظر گرفتن خدمات جانبی، ضروری می‌باشد. در این مقاله برخی از روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای با قابلیت هماهنگی با توابع پیشرفته حمایت شبکه از جمله تنظیم‌های توان، گذر از افت ولتاژ و جابجایی بدون وقفه به حالت مستقل از شبکه مرور شده است.

کلمات کلیدی: مولد فتوولتائیک، آشکارسازی حالت جزیره‌ای، تنظیم توان، قابلیت گذر از افت ولتاژ، جابجایی بدون وقفه

A review on islanding detection methods compatible with advanced grid support functionalities on photovoltaic system methods

■ Ali Emadi, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Electrical Engineering department, emadi@mail.um.ac.ir

■ Javad Sadeh*, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Electrical Engineering department, sadeh@um.ac.ir

■ Reza Bakhshi-Jafarabadi, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Electrical Engineering department, r.bakhshi@mail.um.ac.ir

*Corresponding Author

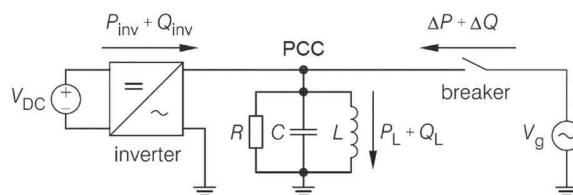
Abstract

According to wide variety of advantages of distributed generation units, especially those using clean and renewable energies, their installation are dramatically increasing in distribution networks. Among renewable energy

generators, photovoltaic generation units have been paid more attention compared to other technologies because of clean energy generation, simple operation and maintenance, and availability in most areas. Despite the mentioned advantages, connecting the photovoltaic generation units to the distribution network will cause problems in the field of network protection. These include the possibility of overlapping relays and their non-coordination, bidirectional feeding network, and the occurrence of an islanding state. On the other hand, by increasing the penetration of these generators, the activation of advanced grid support functionalities such as active and reactive power regulations, low voltage ride through capability (LVRT) and seamless transition to islanded operation mode are included in current grid codes to compensate for their unpredictable energy production. Since these ancillary services can disrupt the operation of islanding detection methods, it is necessary to provide islanding detection method compatible with mentioned ancillary services. In this paper, islanding detection methods compatible with the advanced grid support functionalities such as power regulations, low voltage ride through, and seamless transition to islanded mode are reviewed.

Keywords: Photovoltaic generator, islanding detection, Power regulation, Low voltage ride through capability, Seamless transition

ضروری است. در این خصوص، کلید قدرت DG، جهت جداسازی آن از شبکه می‌بایست باز گردد [۴]. در بسیاری از موارد این مساله با به کارگیری یک طرح حفاظتی به صورت مستقیم در سطح DG برطرف می‌شود. [۵].



شکل ۱: تعریف حالت جزیره‌ای [۶]

با ظهور ریزشبه، امکان تامین بارهای محلی در حالت مستقل (جزیره‌ای) توسط نیروگاه‌های مبتنی بر اینورتر با دینامیک سریع نظیر فتوولتائیک وجود دارد. در این حالت، آشکارسازی حالت جزیره‌ای جهت جابه‌جایی بدون وقفه به حالت مستقل از شبکه ضروری می‌باشد. پس از شناسایی شرایط جزیره و بدون قطع توان تولیدی اینورتر، ریزشبه در حالت مستقل به عملکرد خود ادامه می‌دهد [۷]. صرف نظر از نوع عملکرد حفاظت ضد جزیره‌ای، قطع توان تولیدی یا تغییر وضعیت به حالت مستقل، شرایط جزیره‌ای باید در مدت زمان حداکثر ۵ ثانیه در استاندارد شبکه ولتاژ پایین آلمان (استاندارد 4105VDE-AR-N [A] و ۲ ثانیه در ایالات متحده (استانداردهای IEEE 1547 و IEEE 929)، آشکار گردد [۹،۱۰].

روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای در دو دسته کلی راه دور و محلی طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های راه دور از طریق ارتباط مخابراتی، باز شدن کلید قدرت و جزیره‌ای شدن را به DG ارسال می‌کنند [۱۱]. عیب روش‌های راه دور پیچیدگی و هزینه بالای پیاده‌سازی است [۱۲]. همچنین در صورت بروز خطا در بستر مخابراتی حفاظت ضد جزیره‌ای از دست خواهد رفت. بنابراین حتی با وجود روش‌های راه دور، استفاده از روش‌های محلی با قابلیت اطمینان بالا به صورت پشتیبان ضروری می‌باشد [۱۳]. روش‌های محلی بر مبنای اندازه‌گیری مقادیر در محل مولد تصمیم‌گیری کرده و شامل سه دسته غیرفعال، فعال و ترکیبی می‌باشند. در روش غیرفعال با محاسبه شاخص‌هایی در پایانه مولد از جمله ولتاژ و فرکانس و مقایسه با آستانه حالت جزیره‌ای را

۱- مقدمه

با توجه به کاهش پیوسته قیمت ماژول‌های فتوولتائیک و قوانین تشویقی مناسب در بسیاری از کشورها، احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک بیش از سایر انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. در این خصوص، مطابق با آخرین گزارش سازمان بین‌المللی انرژی، ظرفیت تجمعی توان نصب شده نیروگاه‌های فتوولتائیک در پایان سال ۲۰۲۰، به بیش از ۷۵۹ گیگاوات رسیده است [۱]. در کنار ایالات متحده، بخش قابل توجهی از این مولدها در کشورهای اروپایی نظیر آلمان، اسپانیا، ایتالیا و انگلیس و در کشورهای آسیایی مانند چین و ژاپن احداث شده‌اند. انتظارات جهانی جهت تولید انرژی با استفاده از منابع تجدیدپذیر نظیر مولدهای فتوولتائیک در حال افزایش است [۲]. با توجه به اینکه توان تولیدی توسط ماژول‌های فتوولتائیک از نوع DC می‌باشد، بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها از طریق اینورتر و در بیشتر موارد با اتصال به شبکه توزیع صورت می‌پذیرد.

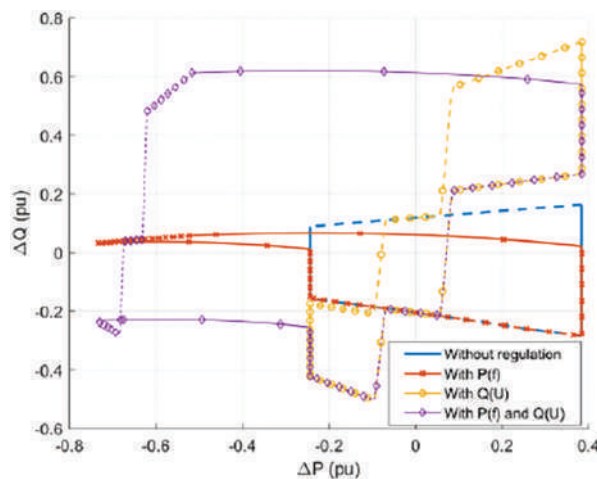
مشابه سایر تولیدات پراکنده (DG)، اتصال مولد فتوولتائیک به شبکه توزیع منجر به مشکلاتی در بهره‌برداری و حفاظت شبکه توزیع خواهد شد. آشکارسازی حالت جزیره‌ای یکی از مهم‌ترین مسائل حفاظتی مرتبط با DGها در هنگام اتصال به شبکه توزیع می‌باشد [۳]. با توجه به شکل (۱)، حالت جزیره‌ای زمانی ایجاد خواهد شد که یکی از کلیدهای قدرت در مسیر انتقال توان از شبکه سراسری بنا به دلایلی نظیر وقوع خطا در بالادست، مانورهای شبکه و یا اشتباه عوامل انسانی قطع گردد. در چنین شرایطی نیروگاه فتوولتائیک بار(های) محلی را بدون حمایت شبکه اصلی تغذیه خواهد نمود.

در صورت عدم آشکارسازی و عدم اعمال حفاظت مناسب، حالت جزیره ناخواسته که در ادامه به اختصار جزیره نامیده می‌شود، می‌تواند منجر به وقوع مسائل ایمنی برای کارکنان تعمیرات که از برق‌دار بودن مولدها بی‌اطلاع هستند، گردد. همچنین وصل دوباره جهت بازیابی شبکه در حین خطاهای گذرا صورت می‌پذیرد. در صورت وقوع وصل دوباره غیرسنکرون، ولتاژ و جریان بزرگی تولید شده که موجب خسارت به تجهیزات موجود در جزیره خواهد شد. تجهیزات مصرف‌کننده نیز به علت عدم توانایی DG در تثبیت ولتاژ و فرکانس ممکن است دچار آسیب گردند. بنابراین آشکارسازی حالت جزیره‌ای و اقدامات حفاظتی مناسب با توجه به دستورالعمل‌های شبکه که حفاظت ضد جزیره‌ای نامیده می‌شود،

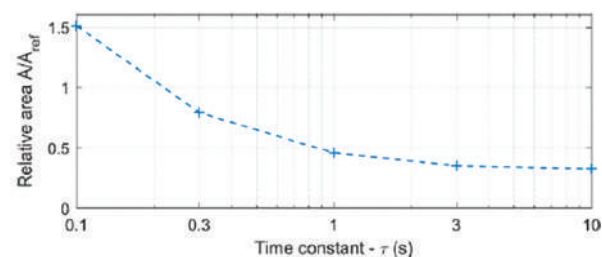
توان $Q(V)$ ، $P(f)$ و $Q(P)$ بر روی NDZ حالت ماندگار و زمانی روش‌های غیرفعال اضافه/کمبود فرکانس (OUF) و اضافه/کمبود ولتاژ (OUV) بررسی شده است. منظور از تنظیم‌های توان مذکور به ترتیب تنظیم توان اکتیو با توجه به فرکانس، توان راکتیو با توجه به دامنه ولتاژ و توان راکتیو با توجه به توان اکتیو است. NDZ حالت ماندگار بدین معنی است که مقادیر حالت ماندگار پس از وقوع جزیره در محدوده مجاز آستانه عملکرد رله‌ها قرار داشته و حالت جزیره ای آشکار نمی شود. در NDZ زمانی، هر نقطه متعلق به NDZ است اگر در طی زمان از لحظه وقوع جزیره تا حالت ماندگار مقادیر در محدوده مجاز رله‌ها باشند یا اینکه برای کمتر از مدت زمان عملکرد رله‌ها از مقادیر آستانه فراتر روند.

مطابق با نتایج ارائه شده مرجع [۵]، شکل و محل مرزهای NDZ حالت ماندگار رله‌های OUF و OUV با فعال بودن هر یک از روش‌های تنظیم توان اکتیو و راکتیو برابر شکل (۲) تغییر کرده و در حالت فعال بودن هم‌زمان تنظیم $P(f)$ و $Q(V)$ ، مساحت آن‌ها به‌طور محسوسی افزایش پیدا می‌کند. نتایج با توجه به بار محلی از نوع شاخه RLC موازی به دست آمده است.

در این مطالعه اثر تنظیم‌های توان بر روی NDZ زمانی نیز بررسی شده است. نتایج با فرض ثابت زمانی حلقه تنظیم توان برابر یک ثانیه و زمان تاخیر عملکرد رله‌های OUF و OUV برابر ۲۰۰ میلی‌ثانیه به دست آمده‌اند. در این شرایط با فعال بودن تنظیم‌های توان نه تنها NDZ زمانی افزایش نمی‌یابد بلکه به‌طور محسوسی نیز کاهش خواهد یافت. با توجه شکل (۳)، میزان کاهش مساحت NDZ به شدت به ثابت زمانی حلقه تنظیم توان وابسته است. در صورتی که ثابت زمانی حلقه تنظیم توان از مقدار ۰/۳ ثانیه بیشتر باشد مساحت الزاماً کاهش خواهد یافت.



شکل ۲: NDZ روش‌های OUF و OUV با و بدون فعال بودن تنظیم‌های توان



شکل ۳: وابستگی مساحت NDZ زمانی به ثابت زمانی بخش تنظیم توان [۵]

تشخیص می‌دهد. در روش‌های فعال اغتشاش کوچکی به سیستم اعمال شده و بازخورد آن بررسی می‌شود. در مراجع مختلف از جمله [۱۲، ۱۴] به مرور جامعی از انواع روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای، مزایا و معایب هر یک پرداخته شده است.

مطالعات سال‌های اخیر نشان می‌دهد توابع پیشرفته حمایت شبکه در مولد فتولتاییک از جمله تنظیم‌های توان اکتیو و راکتیو، قابلیت گذر از افت ولتاژ (LVRT) و قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه به حالت جزیره‌ای می‌تواند دارای مفاهیم متناقض با روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای بوده و در نتیجه موجب اختلال در عملکرد آنها می‌گردد. از سوی دیگر با افزایش نفوذ مولدهای فتولتاییک در شبکه توزیع، دستورالعمل‌های شبکه به علت مسایلی که در ادامه بیان خواهد شد، فعال بودن خدمات جانبی فوق یا برخی از آن‌ها را بر روی این نیروگاه‌ها الزامی می‌کند. بنابراین ارائه روش آشکارسازی حالت جزیره‌ای با در نظر گرفتن خدمات جانبی اشاره شده ضروری می‌باشد.

با افزایش نفوذ مولدهای فتولتاییک در سیستم‌های توزیع با توجه به نوسانات غیرقابل پیش‌بینی تابش خورشیدی، منجر به افزایش ناخواسته نوسانات ولتاژ و یا فرکانس در شبکه خواهد شد. در چنین شرایطی نوسانات ولتاژ و یا فرکانس ممکن است منجر به خروج گسترده مولدهای فتولتاییک از شبکه توزیع در پاسخ به عملکرد حفاظت ضد جزیره‌ای گردد. خروج هم‌زمان تعداد وسیعی از این مولدها می‌تواند منجر به ناپایداری کل شبکه شده و در ادامه خروج گسترده و خاموشی شبکه قدرت را در پی داشته باشد. برای غلبه بر این چالش‌ها، نیازمندی‌ها و الزامات حال حاضر شبکه می‌بایست به‌روزرسانی شوند. خدمات جانبی از جمله تنظیم‌های توان و قابلیت LVRT باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در کنار وظیفه اصلی تولید توان اکتیو، تنظیم‌های توان و قابلیت LVRT را ارائه نمایند [۲].

مولدهای فتولتاییک باید قابلیت عملکرد مناسب با سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی در ریزشبکه را داشته باشند. این نیروگاه‌ها باید بتوانند به نرمی به حالت عملکرد جزیره‌ای جابه‌جا شده و دوباره پس از پاک شدن خطا، به حالت متصل به شبکه تغییر وضعیت دهند. از این رو سازگاری و هماهنگی روش آشکارسازی حالت جزیره‌ای با تنظیم‌های توان، الگوریتم LVRT و جابه‌جایی بدون وقفه بین حالت‌های متصل به شبکه و مستقل در شبکه‌های قدرت امروزی، ضروری می‌باشد [۲].

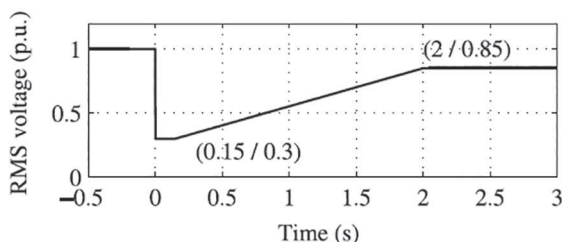
در ادامه، مطالب به شرح زیر ارائه خواهد شد. در بخش دوم به ارائه اثرات متقابل توابع پیشرفته حمایت شبکه با روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای پرداخته خواهد شد. در بخش سوم روش‌های آشکارسازی با قابلیت هماهنگی با توابع پیشرفته اینورتر ارائه می‌شود. در نهایت مطالب جمع‌بندی خواهد شد.

۲- اثرات متقابل روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای با توابع پیشرفته حمایت شبکه

۲-۱- اثر تنظیم‌های توان بر روی عملکرد روش تشخیص جزیره

ناحیه عدم تشخیص (NDZ) در صفحه ΔP و ΔQ (توان تامین شده از شبکه سراسری به صورت شکل (۱)) به ناحیه‌ای گفته می‌شود که روش آشکارسازی حالت جزیره با شکست در آشکارسازی مواجه می‌گردد. مساحت NDZ یکی از مهم‌ترین شاخص‌های نشان‌دهنده میزان کارایی روش‌های آشکارسازی به شمار می‌آید. در مراجع [۵، ۶، ۱۵، ۱۶]، تأثیر تنظیم‌های

مرجع [۷] در شکل (۴) نشان داده شده است. این حالت عملکرد نیز ممکن است دارای مفاهیم متناقض با الگوریتم آشکارسازی حالت جزیره‌ای بوده و عملکرد روش تشخیص جزیره را دچار اختلال نماید [۲]. از طرف دیگر حفاظت‌های ضد جزیره‌ای بر مبنای ولتاژ، در صورت افت ولتاژ از میزان مشخصی یک حالت جزیره‌ای را تشخیص می‌دهند. در رخداد‌های افت ولتاژ باید الگوریتم تشخیص جزیره و LVRT به صورت هماهنگ و یکپارچه در کمترین زمان ممکن، شرایط افت ولتاژ ناشی از خطاهای شبکه و یا وقوع حالت جزیره‌ای را از یکدیگر تمایز دهند. با توجه به خروجی الگوریتم در صورت تشخیص افت ولتاژ، سیستم کنترل DG دستور فعال‌سازی توابع حمایتی نظیر تزریق توان راکتیو را خواهد داد. همچنین در صورت تشخیص شرایط جزیره‌ای، دستور جابه‌جایی به حالت مستقل از شبکه داده خواهد شد. حمایت شبکه در حین عملکرد LVRT و یا حفظ پایداری شبکه پس از جابه‌جایی به حالت جزیره‌ای وابسته به تشخیص صحیح و سریع شرایط جزیره می‌باشد [۱۳].



شکل ۴: منحنی ولتاژ زمان روش LVRT مرجع [۷]

۲-۳- مفاهیم متناقض با قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه

قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه به حالت جزیره‌ای نیز با روش‌های فعال تشخیص حالت جزیره‌ای بر مبنای خارج کردن دامنه ولتاژ و فرکانس از محدوده مجاز و عملکرد رله‌های OUV/OUF، دارای مفاهیم متناقض هستند [۲۱]. در این شرایط حفاظت‌های ضد جزیره‌ای دستور قطع مولد را صادر می‌کند و امکان جابه‌جایی بدون وقفه به حالت جزیره‌ای را فراهم نمی‌آورند.

۳-۳- مروری بر روش‌های آشکارسازی حالت جزیره‌ای با قابلیت هماهنگی با توابع پیشرفته حمایت شبکه

۳-۱- جمع‌بندی روش فعال تشخیص جزیره و تنظیم توان

فعال‌بودن توابع پیشرفته حمایت شبکه، محل مرزهای NDZ روش‌های غیرفعال را تغییر داده و در برخی شرایط به‌طور چشمگیری مساحت آن را افزایش می‌دهد. برای ایجاد هماهنگی با تنظیم‌های توان، روش‌های فعال بشرح زیر ارائه شده‌اند. در مرجع [۲۰] با معرفی یک کنترل‌کننده توان راکتیو جمع‌شده با روش فعال آشکارسازی حالت جزیره‌ای، امکان فعال‌سازی هم‌زمان تنظیم توان (Q(V) و تشخیص جزیره فراهم شده است. در زمان اتصال اینورتر به شبکه سراسری، تزریق توان راکتیو با توجه به منحنی ولت-وار (Q(V) صورت می‌پذیرد؛ درحالی‌که در زمان وقوع جزیره تولید/جذب توان راکتیو افزایش ناگهانی داشته و وقوع جزیره از طریق رله اضافه/کمبود فرکانس شناسایی می‌شود. اشکال روش پیشنهاد شده عدم امکان قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه بین حالت‌های عملکرد است. روش‌های فعالی که پس از وقوع جزیره قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه به حالت جزیره‌ای را داشته باشند، بیش از سایر روش‌ها مورد توجه قرار

همچنین در مرجع [۶] اثر تنظیم‌های توان (P(f) و Q(P) بر روی NDZ حالت ماندگار با حضور بار RLC موازی ارائه شده است. در این مطالعه اثر فعال بودن هم‌زمان تنظیم‌های توان (P(f) و Q(P) بر روی NDZ بررسی نشده اما نویسندگان به احتمال نوسانی شدن مقایر فرکانس و ولتاژ بعد از وقوع جزیره اشاره کرده‌اند. در این شرایط مقادیر ولتاژ و فرکانس، مرزهای آستانه عملکرد را برای چندین بار نقض می‌کنند اما به‌علت نوسانی بودن پاسخ سیستم، مدت زمان آن کمتر از زمان عملکرد حفاظت‌های OUF و OUV است. در مرجع [۱۷] با پایه‌گذاری مدل سیگنال کوچک سیستم در حالت جزیره‌ای و به دست آوردن مقادیر ویژه ماتریس فضای حالت آن، عامل تولیدکننده نوسانات پیوسته پس از وقوع حالت جزیره‌ای با فعال بودن هم‌زمان تنظیم‌های توان (P(f) و Q(V) بررسی شده است. بر این اساس، نویسندگان وجود مقادیر ویژه ناپایدار در سیستم را پس از حالت جزیره‌ای، یکی از دلایل نوسانات پیوسته ولتاژ و فرکانس در این حالت معرفی کرده‌اند. در مراجع [۱۵، ۱۶] بارهای در نظر گرفته شده از نوع دینامیکی بصورت تابعی از ولتاژ و فرکانس و موتور القایی هستند. در این مطالعات نیز به افزایش مساحت NDZ رله‌های OUF و OUV با فعال بودن تنظیم‌های توان (P(f) و Q(V) اشاره کرده‌اند. زمانی که تنظیم‌های توان (P(f) و Q(V) در حضور بارهای ترکیبی (ترکیب ZIP و موتور القایی) فعال هستند، تغییرات چشمگیری در محل مرزها و مساحت NDZ صورت می‌گیرد. به علت افزایش مساحت نسبی NDZ با فعال بودن تنظیم‌های توان، احتمال عدم آشکارسازی حالت جزیره‌ای افزایش می‌یابد.

روش‌های فعال تشخیص جزیره نیز ممکن است در تضاد با اهداف تنظیم‌های توان باشد. روش‌های فعال متعددی بر پایه فیدبک مثبت بر روی مراجع توان اکتیو و راکتیو برای ناپایدار کردن شبکه جهت تشخیص حالت جزیره‌ای پیشنهاد شده‌اند [۱۸، ۱۹]. در این روش‌ها، تداخل بین فیدبک اعمال‌شده و منحنی‌های خدمات جانبی تنظیم توان به‌عنوان یک محدودیت جدی شناخته می‌شود [۲۰].

در صورتی‌که یک متغیر کنترل شونده مشترک برای اهداف مختلف در تنظیم‌های توان و روش تشخیص جزیره استفاده شود، عملکرد هر دو تابع را دچار اختلال خواهد کرد. به عنوان مثال روش‌های مبتنی بر فیدبک مثبت فرکانس نمی‌توانند با روش‌های تنظیم ولتاژ مبتنی بر توان راکتیو کار کنند؛ زیرا این روش‌ها توان راکتیو را برای اهداف آشکارسازی جزیره و تنظیم توان به ترتیب بر اساس فرکانس و دامنه ولتاژ کنترل می‌کنند. بنابراین پاسخ الگوریتم‌های تنظیم‌های توان و تشخیص جزیره به تغییرات گذرای ولتاژ بدون توجه به علت آن می‌تواند منجر به عملکرد اشتباه این توابع گردد. علت این احتمالات آن است که وقوع حالت جزیره‌ای و خطاهای گذرای شبکه می‌توانند منجر به تغییرات لحظه‌ای ولتاژ شوند [۲۰].

۲-۲- مفاهیم متناقض با قابلیت LVRT

برای جلوگیری از قطع تعداد وسیعی از تولیدات در سطح شبکه توزیع در هنگام خطاهای با مدت کوتاه در سطوح ولتاژی بالاتر، قابلیت گذر از افت ولتاژ (LVRT) در DGها ارائه می‌گردد. LVRT به معنی متصل ماندن DG در شرایط افت ولتاژ و حمایت شبکه است. در صورتی‌که ولتاژ برای مدت زمان کمتر از زمان مشخص شده در منحنی ولتاژ-زمان افت پیدا کند، DG باید به شبکه متصل بماند. یک نمونه منحنی ولتاژ-زمان استفاده شده در

گرفته‌اند [۲۱].

در مرجع [۲۲] به منظور به کارگیری هم‌زمان کنترل توان و روش فعال تشخیص جزیره، جداسازی مولفه‌های توالی مثبت و منفی در روش کنترل اینورتر پیشنهاد شده است. در این روش، نیازمندی‌های کنترل توان از طریق حلقه کنترل مولفه توالی مثبت و نیازمندی‌های روش تشخیص جزیره به واسطه حلقه کنترل مولفه توالی منفی تحقق می‌یابد. همچنین در این روش مقدار جریان توالی منفی به صورت ضریب ثابتی از جریان توالی مثبت به شبکه تزریق می‌گردد. افزایش عدم تعادل ولتاژ نقطه اشتراک اتصال DG و شبکه (PCC) و کاهش کیفیت توان در حالت عملکرد اتصال به شبکه به عنوان محدودیت روش پیشنهاد شده در مرجع [۲۲] می‌باشد.

در مرجع [۱۶] یک روش فعال برای پیاده‌سازی هم‌زمان توابع آشکارسازی حالت جزیره‌ای و خدمات جانبی نظیر قابلیت LVRT و تنظیم‌های توان $P(f)$ و $Q(V)$ پیشنهاد شده است. در این روش اغتشاش فرکانس پایین با دامنه یک درصد جریان نامی اینورتر به وسیله حلقه کنترل جریان محور d اینورتر به شبکه تزریق می‌گردد. به علت امپدانس پایین‌تر شبکه سراسری، جریان فرکانس پایین در حالت متصل به شبکه، در شبکه سراسری تزریق خواهد شد. در حالی که پس از وقوع حالت جزیره‌ای، این جریان در بار محلی جاری می‌شود. بنابراین، مقدار نوسانات قابل توجهی در ولتاژ محور d اینورتر بلافاصله پس از وقوع حالت جزیره‌ای ایجاد خواهد شد. به منظور بهرهمندی موثر از روش پیشنهادی، بهره‌بردار شبکه می‌بایست از عدم وجود فرکانس‌های طبیعی برابر فرکانس اغتشاش تزریقی به شبکه جهت اجتناب از هرگونه تشدید اطمینان حاصل نماید. همچنین پیچیدگی پیاده‌سازی روش پیشنهادی در محیط چند اینورتری به عنوان یکی دیگر از مشکلات این روش است. یکی از چالش‌های مهم در جهت پیاده‌سازی روش‌های تزریق جریان هارمونیک در جهت آشکارسازی حالت جزیره‌ای، سنکرون سازی جریان‌ها در محیط چند اینورتری می‌باشد.

۳-۲- روش‌های غیرفعال برای هماهنگی با قابلیت LVRT

در مرجع [۲۳] روش نوینی برای کوچک‌تر کردن NDZ روش تشخیص جزیره از نوع غیرفعال با آموزش و ارزیابی یک درخت تصمیم پیشنهاد شده است. در نخستین قدم با شبیه‌سازی رخدادهای مختلف از نوع جزیره‌ای و غیرجزیره‌ای، الگوهای آموزش و ارزیابی درخت تصمیم ایجاد می‌گردد. سیستم تحت مطالعه شامل دو فیدر ولتاژ متوسط موازی مجهز به دو ژنراتور سنکرون و یک مزرعه بادی مبتنی بر اینورتر می‌باشد. رخدادهای افت ولتاژ و خطاهایی که DG باید در این شرایط به شبکه متصل مانده و از رخدادهای گذر کند نیز در الگوهای آموزش درخت تصمیم گنجانده شده است.

رله هوشمند خطاهایی را که DG در هنگام وقوع آن‌ها باید با تأخیر مشخص شده در منحنی LVRT قطع گردد، شناسایی کرده و با همکاری با الگوریتم LVRT، DG را به شبکه متصل نگاه می‌دارد. در نتیجه در هنگام آموزش رله هوشمند، رخدادهای خطای با تأخیر کمتر از زمان مشخص شده در منحنی ولتاژ-زمان به عنوان رخدادهای غیر جزیره‌ای مشخص می‌گردد. رله پیشنهادی، کاربردی و سازگار با نیازمندی‌های شبکه و توابع پیشرفته اینورتر از جمله گذر از افت-ولتاژ و یا افت-فرکانس (LFRT/LVRT) می‌باشد. این امر به سادگی از طریق ادغام

منطق عملکرد رله پیشنهادی با نظارت الگوریتم‌های LVRT/LFRT اینورتر قابل تحقق است.

در مرجع [۲۴] واحد مسدودکننده کاهش ولتاژ (UVB) را در حفاظت ضد جزیره‌ای OUF و نرخ تغییرات فرکانس (ROCOF) جهت هماهنگی با عملکرد LVRT مورد استفاده قرار داده است. منطق UVB به گونه‌ای است که در صورت کاهش ولتاژ از مقدار تنظیم، عملکرد حفاظت‌ها برای هماهنگی با LVRT مسدود خواهد شد.

۳-۳- روش‌های فعال برای هماهنگی با قابلیت LVRT

هماهنگی روش‌های فعال آشکارسازی حالت جزیره‌ای و LVRT نیز در مطالعات مختلفی بررسی شده است. در مرجع [۴] با طراحی یک حلقه کنترل ولتاژ بیرونی، امکان فعال‌سازی قابلیت LVRT و آشکارسازی حالت جزیره‌ای فراهم شده است. مقدار مرجع کنترل ولتاژ بصورتی است که در حالت متصل به شبکه امکان رسیدن به مقدار مرجع وجود نداشته و کنترل کننده PI استفاده شده به اشباع خواهد رفت. در صورتی که در حالت جزیره ای امکان خروج از اشباع وجود دارد. بنابراین با خارج شدن کنترل کننده PI از اشباع، وقوع حالت جزیره‌ای آشکار خواهد شد. عیب این روش در NDZ بالای آن می‌باشد. بر اساس محاسبات انجام شده، توان اکتیو تامین شده از شبکه سراسری در لحظه وقوع جزیره باید خارج از محدوده ۱۹- الی ۱۷,۳۶ درصد توان نامی واحد تولید پراکنده باشد که با NDZ روش غیرفعال OUV برابری می‌کند. در مرجع [۲۵] که بهبود یافته روش ارائه شده در مرجع [۴] است، تنظیم توان راکتیو و قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه به حالت جزیره‌ای نیز فراهم شده است. اگرچه عیب این روش نیز NDZ بزرگ آن می‌باشد.

امکان فعال‌سازی هم‌زمان قابلیت LVRT و روش‌های فعال تشخیص جزیره شیفتر فرکانس در مرجع [۷] بررسی شده است. در این مقاله با در نظر گرفتن پنج حالت ممکن برای ولتاژ، عملکرد LVRT و حفاظت ضد جزیره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. اشکال روش پیشنهادی نداشتن قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه به حالت مستقل از شبکه پس از وقوع جزیره است.

همانطور که در بخش ۳-۱ بیان شد، در مرجع [۱۶] هماهنگی روش پیشنهادی تشخیص جزیره با تنظیم‌های توان $P(f)$ و $Q(V)$ فراهم شده است. علاوه بر قابلیت هماهنگی با موارد فوق قابلیت هماهنگی با الگوریتم LVRT نیز در روش پیشنهادی مد نظر قرار گرفته است. اما همان‌طور که در بخش قبلی نیز بیان شد امکان تشدید در فرکانس تزریقی و مشکل سنکرون سازی اغتشاش در محیط چند اینورتری از محدودیت‌های این روش است.

۳-۴- هماهنگی روش تشخیص جزیره و قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه

در مرجع [۲۶] با تزریق مولفه هارمونیک دوم جریان با فیدبک مثبت از هارمونیک دوم ولتاژ سعی در افزایش یک‌باره هارمونیک دوم ولتاژ پس از وقوع حالت جزیره‌ای دارد. افزایش نمایی هارمونیک دوم ولتاژ نشانی از وقوع حالت جزیره‌ای خواهد بود. در این روش به دلیل تزریق مولفه هارمونیک به شبکه، تزریق هارمونیک دوم بر روی مولفه اصلی ولتاژ و جریان تأثیری ندارد و می‌تواند قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه بین حالت‌های عملکرد سیستم را فراهم سازد. در مرجع [۲۷] با تغییر مرجع توان راکتیو به صورت تناوبی به صورتی که فرکانس در حالت جزیره‌ای دچار تغییرات شدید نشود و بررسی اختلاف بین مرجع

توان راکتیو و توان راکتیو تزریقی به شبکه، حالت جزیره‌ای را تشخیص می‌دهد.

در مرجع [۲۱] مبدل‌های پیوند دهنده شامل مبدل‌هایی که ریزش‌بکه‌های DC و AC را به یکدیگر متصل می‌کند معرفی شده است. از وظایف اصلی این مبدل‌ها می‌توان به توانایی عملکرد در حالت متصل به شبکه و مستقل، قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه بین حالت‌های عملکرد و ایستادگی در برابر اغتشاشات شبکه اصلی به‌ویژه قابلیت LVRT اشاره کرد. در این مقاله سیستم کنترل مبدل به جریان‌تامینی از شبکه سراسری دسترسی داشته و مقدار آن نیز در یک حلقه بسته با کنترل کننده PI کنترل می‌شود.

جابه‌جایی ناخواسته به حالت عملکرد جزیره‌ای از دو طریق افت ولتاژ و نقض منحنی ولتاژ-زمان LVRT و یا عملکرد روش تشخیص جزیره صورت می‌پذیرد. پس از جزیره‌ای شدن و قطع شدن جریان شبکه، حلقه کنترل جریان شبکه باز خواهد شد. در نتیجه عملکرد کنترل کننده تناسبی-انتگرالی بر روی جریان شبکه تأثیر نداشته و خروجی کنترل کننده افزایش می‌یابد. در صورتی که میانگین خروجی کنترل کننده در یک سیکل قدرت از مقدار از پیش تعیین شده بزرگتر و جریان شبکه از یک مقدار از پیش تعیین شده کمتر باشد، حالت جزیره‌ای آشکار خواهد شد. اشکال روش پیشنهادی آن است که در صورت عدم دسترسی به جریان‌تامینی از شبکه امکان پیاده‌سازی روش وجود ندارد. در مرجع [۲۸] یک کنترل کننده یکپارچه برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در حالت‌های عملکرد متصل به شبکه و جزیره‌ای پیشنهاد شده است. در این روش، کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو از طریق کنترل کننده‌های PI که خروجی آن‌ها به ترتیب مقادیر مرجع فرکانس و دامنه ولتاژ اینورتر هستند، صورت می‌گیرد. در حالت جزیره‌ای برای دنبال کردن مراجع توان اکتیو و راکتیو، مقادیر مرجع فرکانس و ولتاژ خروجی اینورتر تغییر خواهد کرد و در صورت وجود اختلاف توان قابل توجه در شبکه منجر به اشباع کنترل کننده‌ها خواهد شد. اشباع کنترل کننده‌ها نشانی از وقوع جزیره است. اشکال این روش آن است که در صورت تعادل نسبی بار و تولید در لحظه وقوع حالت جزیره‌ای فرکانس و ولتاژ مرجع در محدوده مجاز اشباع قرار خواهد گرفت و سیستم بدون آشکارسازی حالت جزیره‌ای به عملکرد خود در حالت جزیره‌ای ادامه خواهد داد (NDZ این روش مشابه روش‌های غیرفعال OUF و OUV است).

در مطالعاتی که در مراجع [۲۹] و [۳۰] انجام شده، روش‌های ترکیبی جهت آشکارسازی حالت جزیره‌ای و ارائه قابلیت جابه‌جایی بدون وقفه به حالت جزیره‌ای پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی مرجع [۳۰]، در مرحله نخست در صورتی که اندازه اختلاف ولتاژ PCC از مقدار نامی، بزرگتر از مقدار آستانه باشد، در مرحله دوم در الگوریتم MPPT منبع فتوولتاییک اغتشاش اعمال می‌گردد. این امر موجب کاهش چشمگیر توان اکتیو خروجی اینورتر شده که در حالت جزیره‌ای منجر به کاهش ولتاژ PCC و آشکارسازی حالت جزیره‌ای خواهد شد. پس از آشکارسازی، ولتاژ خروجی آرایه فتوولتاییک به نقطه کار حداکثر توان باز خواهد گشت و امکان تغذیه بارهای محلی وجود خواهد داشت. در مرجع [۲۹] در مرحله اول شاخص نرخ تغییرات ولتاژ (ROCOV) ارزیابی شده و در صورت بزرگتر شدن از مقدار آستانه، در چرخه وظیفه مبدل منبع فتوولتاییک اغتشاش اعمال

می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث بیان شده می‌توان نتیجه گرفت علاوه بر بزرگ بودن NDZ روش‌های غیرفعال، این پارامتر می‌تواند تحت تأثیر تنظیم‌های توان، وسیع‌تر شده و یا تغییر نماید. همچنین در روش‌های فعال تشخیص جزیره که پارامتر تحت کنترل آن‌ها با پارامتر کنترل شونده در تنظیم‌های توان مشترک است، قابلیت هماهنگی بین آن‌ها فراهم نمی‌شود. روش فعال پیشنهاد شده با امکان پیاده‌سازی هم‌زمان با تنظیم‌های توان و الگوریتم LVRT نیز دارای عیب کاهش کیفیت توان شبکه است. روش فعال دیگر با قابلیت هماهنگی با تنظیم $Q(V)$ ، LVRT و جابه‌جایی بدون وقفه به حالت جزیره‌ای نیز دارای عیب NDZ قابل توجه می‌باشد. بنابراین نیاز به ارائه روشی جهت آشکارسازی حالت جزیره‌ای با قابلیت هماهنگی با توابع پیشرفته حمایت شبکه با NDZ کوچک و عدم کاهش کیفیت توان شبکه ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

- [1] A. Detollenaere and G. Masson, "Snapshot of global PV markets 2021," PVPS Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach, 2021.
- [2] Y. Yang, P. Enjeti, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Wide-scale adoption of photovoltaic energy: Grid code modifications are explored in the distribution grid," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 21, no. 5, pp. 21-31, 2015.
- [3] H. Zeineldin, E. F. El-Saadany, and M. Salama, "Impact of DG interface control on islanding detection and nondetection zones," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1515-1523, 2006.
- [4] P. P. Das and S. Chattopadhyay, "A voltage-independent islanding detection method and low-voltage ride through of a two-stage PV inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 3, pp. 2773-2783, 2018.
- [5] O. Arguence, F. Cadoux, B. Raison, and L. De Alvaro, "Impact of power regulations on unwanted islanding detection," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 10, pp. 8972-8981, 2018.
- [6] M. Dietmannsberger and D. Schulz, "Impacts of low-voltage distribution grid codes on ancillary services and anti-islanding detection of inverter-based generation," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 4, pp. 1287-1294, 2016.
- [7] M. Dietmannsberger, F. Grumm, and D. Schulz, "Simultaneous implementation of LVRT capability and anti-islanding detection in three-phase inverters connected to low-voltage grids," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 2, pp. 505-515, 2017.
- [8] Power Generation Systems Connected to the Low-voltage Distribution Network: Technical Minimum Requirements for the Connection to and Parallel Operation with Low-voltage Distribution Networks, 2011.
- [9] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, 2018.
- [10] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, 2000.
- [11] W. Xu, G. Zhang, C. Li, W. Wang, G. Wang, and J. Kliber, "A power line signaling based technique for anti-islanding protection of distributed generators—Part I: Scheme and analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1758-1766, 2007.
- [12] C. Li, C. Cao, Y. Cao, Y. Kuang, L. Zeng, and B. Fang, "A review of islanding detection methods for microgrid," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 35, pp. 211-220, 2014.
- [13] H. Laaksonen, "Advanced islanding detection functionality for future electricity distribution networks," IEEE Transactions on

همکاری علمی استادان گرامی و فرهیختگان ارجمند در داوری مقاله‌های نشریه علمی ترویجی عصر برق در سال ۱۴۰۰ که ثمره آن در غنای علمی و فنی مطالب منتشر شده بسیار موثر بوده است باعث خوشحالی و شایسته تقدیر است. امید است افتخار همراهی صاحب‌نظران و اندیشمندان گرامی باعث تداوم موفقیت‌ها در ادامه راه باشد.

با احترام و امتنان

شورای سردبیری

- ۱- دکتر حسین ابوترابی زارچی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- دکتر ایمان احدی اخلاقی، دانشگاه سجاد
- ۳- دکتر امیر مسعود امینیان مدرس، دانشگاه سجاد
- ۴- دکتر حمیدرضا پوررضا، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۵- دکتر حامد توکلی، دانشگاه اراک
- ۶- مهندس بهروز جمشیدی، شرکت برق منطقه ای خراسان
- ۷- مهندس حجت جمشیدی، دانشجوی دکتری مخابرات دانشگاه فردوسی مشهد
- ۸- مهندس جواد حسن پور، شرکت برق منطقه ای خراسان
- ۹- دکتر سید ابراهیم حسینی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۰- دکتر سید کمال حسینی ثانی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۱- دکتر کسری حقیقی، مدیرعامل شرکت Uniquesec سوئد
- ۱۲- مهندس وحید خوشدل، دانشجوی دکتری مخابرات دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۳- دکتر حبیب رجبی مشهدی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۴- دکتر مصطفی رجبی مشهدی، شرکت مدیریت شبکه برق ایران
- ۱۵- دکتر بابک رضایی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۶- مهندس حجت دزفولی، شرکت مونکو
- ۱۷- دکتر جواد ساده، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۸- دکتر غزاله سربیشه ای، دانشگاه سجاد
- ۱۹- دکتر سید علی رضا سیدین، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۰- دکتر رضا شریعتی نسب، دانشگاه بیرجند
- ۲۱- دکتر مهرداد شکوه صارمی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۲- دکتر حسن صادقیپور، کارشناس دادگستری
- ۲۳- دکتر هادی صدوقی یزدی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۴- دکتر جواد صفائی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۵- دکتر سید حمید ظهیری ممقانی، دانشگاه بیرجند
- ۲۶- دکتر امیررضا عطاری، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۷- دکتر مهدی علومی بایگی، شرکت برق منطقه ای خراسان
- ۲۸- دکتر مصطفی عیدپانی، موسسه غیرانتفاعی خراسان
- ۲۹- دکتر محسن قایینی، دانشگاه سجاد
- ۳۰- دکتر عباس قائمی بافقی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۱- دکتر عباسعلی قربان صباغ، دانشگاه صنعتی قوچان
- ۳۲- دکتر علی کارساز، موسسه غیرانتفاعی خراسان
- ۳۳- دکتر عبدالله کامیاب، شرکت برق منطقه ای خراسان
- ۳۴- دکتر محسن کاهانی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۵- دکتر سینا کوثری موحد، شرکت توزیع برق خراسان رضوی
- ۳۶- دکتر سید محمد سعید ماجدی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۷- دکتر خلیل مافی نژاد، دانشگاه سجاد
- ۳۸- دکتر وحید محتشمی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۹- دکتر حامد ملا احمدیان، موسسه غیرانتفاعی خراسان
- ۴۰- دکتر محمد منفرد، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۱- مهندس مجید مهدیزاده، شرکت مخابرات خراسان رضوی
- ۴۲- دکتر محسن نجفی، دانشگاه اراک
- ۴۳- دکتر امین نوری، دانشگاه سجاد
- ۴۴- دکتر قوشه عابد هدتنی، دانشگاه فردوسی مشهد

Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2056-2064, 2013.

- [14] M.-S. Kim, R. Haider, G.-J. Cho, C.-H. Kim, C.-Y. Won, and J.-S. Chai, "Comprehensive review of islanding detection methods for distributed generation systems," *Energies*, vol. 12, no. 5, p. 837, 2019.
- [15] R. Sgarbossa, S. Lissandron, P. Mattavelli, R. Turri, and A. Cerretti, "Analysis of $\Delta P-\Delta Q$ area of uncontrolled islanding in low-voltage grids with PV generators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2387-2396, 2015.
- [16] D. Pal and B. K. Panigrahi, "Analysis and mitigation of the impact of ancillary services on anti-islanding protection of distributed generators," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2950 - 2961, October 2020.
- [17] D. Pal and B. K. Panigrahi, "On the marginal stability/instability of power island following unintentional islanding: A modal analysis based approach," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. (Early Access), 2021.
- [18] P. Du, Z. Ye, E. E. Aponte, J. K. Nelson, and L. Fan, "Positive-feedback-based active anti-islanding schemes for inverter-based distributed generators: Basic principle, design guideline and performance analysis," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 2941-2948, 2010.
- [19] P. K. Ganivada and P. Jena, "Active slip frequency based islanding detection technique for grid-Tied inverters," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4615-4626, 2019.
- [20] Y. Zhou, H. Li, and L. Liu, "Integrated autonomous voltage regulation and islanding detection for high penetration PV applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 2826-2841, 2012.
- [21] Q. Liu, T. Caldognetto, and S. Buso, "Flexible control of interlinking converters for dc microgrids coupled to smart ac power systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3477-3485, 2018.
- [22] H. Geng, D. Xu, B. Wu, and G. Yang, "Active islanding detection for inverter-based distributed generation systems with power control interface," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1063-1072, 2011.
- [23] Q. Cui, K. El-Aroudi, and G. Joós, "Islanding detection of hybrid distributed generation under reduced non-detection zone," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5027-5037, 2017.
- [24] D. Motter and J. C. Vieira, "Improving the islanding detection performance of passive protection by using the undervoltage block function," *Electric Power Systems Research*, vol. 184, p. 106293, 2020.
- [25] S. Ghosh and S. Chattopadhyay, "Three-loop based universal control architecture for decentralized operation of multiple inverters in an autonomous grid-interactive microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 2, pp. 1966 - 1979, March-April 2020.
- [26] A. Emadi, H. Afrakhte, and J. Sadeh, "Fast active islanding detection method based on second harmonic drifting for inverter-based distributed generation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 3470-3480, 2016.
- [27] S. Park, M. Kwon, and S. Choi, "Reactive power P&O anti-islanding method for a grid-connected inverter with critical load," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 204-212, 2018.
- [28] M. B. Delghavi and A. Yazdani, "A unified control strategy for electronically interfaced distributed energy resources," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 803-812, 2012.
- [29] R. Bakhshi-Jafarabadi, J. Sadeh, J. de Jesus Chavez, and M. Popov, "Two-level islanding detection method for grid-connected photovoltaic system-based microgrid with small non-detection zone," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1063 - 1072, 2021.
- [30] R. Bakhshi-Jafarabadi, J. Sadeh, and M. Popov, "Maximum power point tracking injection method for islanding detection of grid-connected photovoltaic systems in microgrid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 1, pp. 168 - 179, 2021.



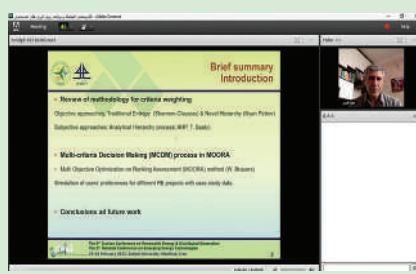
انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران - شاخه خراسان
Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers



گزارش تصویری از برگزاری

پنجمین همایش ملی فناوری های نوین انرژی

(۲ تا ۵ اسفند ماه ۱۴۰۰)



مشهد: بلوار وکیل آباد، بلوار جلال آل احمد ۴ دانشگاه سجاده
تلفن: ۰۵۱-۳۶۰۲۹۳۰۸
نمابر: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۸
www.kraee.ir/kiaeee info@kiaeee.ir

آنلاین کالا سان

ONLINEKALASAN



www.onlinekalasan.com/store



محصولات فوجی الکتریک



تجهیزات اندازه گیری ایسکرا



محصولات شرک



کنتور EDM



رله حفاظتی زیمنس و اشنایدر



آلارم یونیت + RTU



تابلوهای کمپکت GIS

- ♦ پاورمتر MC740, MC330, MC350، آمپر متر، ولت متر، فرکانس متر ISKRA
- ♦ تست بلاک های ولتاژی، جریانی و دیسکریپتسی سوئیچ FUJ
- ♦ انواع رله های حفاظتی Schneider Electric و SEIMENS
- ♦ انواع رله های کمکی و تست بلاک های SEIMENS
- ♦ انواع تابلوهای کمپکت 20 کیلوولت LSIS
- ♦ کنتور هوشمند سه فاز EDM/MK6E
- ♦ کلیدهای مینیاتوری SCHRACK

آنلاین کالا سان در سراسر کشور
نمایندگی فعال می پذیرد.

شرکت فن آوران
صانع شرق
Sane Shargh

@onlinekalasan
@onlinekalasan

پشتیبانی و فروش ۰۹۱۵۲۷۲۴۰۴۰
۷۵ داخلی ۰۵۱۳۵۲۴۳۵۲۲