



ASR-E-BARQ
ISSN: 2588-3828

عصر برق ۱۵

فصلنامه علمی انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران، شاخه خراسان سال هشتم • شماره ۱۵ • تابستان ۱۴۰۰ قیمت ۲۰.۰۰۰ تومان



ضرورت بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت ساختمان / فراز و فرودهای تعمیر و نگهداری شبکه‌های انتقال / مروری بر سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی / اصول طراحی سنسورهای تصویر برای استفاده در دوربین‌های دیجیتال / طراحی و ساخت سیستم آزمایشگاهی مهره و حلقه و رسم دیاگرام انشعاب آن / بهبود خوشه‌بندی شبکه‌های اجتماعی با الگوریتم تکاملی رقابت استعماری و معیار شباهت درونی گره‌های شبکه / یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال / مروری بر کاربرد خازن‌های بین‌انگشتی در سنسورهای خازنی / شبیه‌سازی سیستم اجاق‌گازهای القایی با استفاده از مدار مبدل رزونانسی با هدف بهینه‌سازی راندمان / مروری بر الگوریتم حافظه کوتاه مدت طولانی و کاربردهای آن / فناوری‌های نوین در نسل ششم شبکه‌های ارتباطی / لیزر پلاسمونیک با استفاده از ساختار فلز-عایق-فلز / مروری بر مهم‌ترین کتاب‌های منتشر شده در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در زمینه‌ی سیستم‌های قدرت



Introducing important projects:

- Maintenance and repairs of electricity transmission and distribution network in Razavi Khorasan, North Khorasan and South Khorasan provinces
- Maintenance and repairs of electricity transmission and distribution network in Sistan and Baluchestan province
- Maintenance and repairs of electricity transmission and distribution network in Semnan province
- Maintenance, repairs and management of the first and the second lines of Mashhad City Train
- Maintenance and repair of network substations and high voltage power lines Pumping stations of Dosti Dam water transmission line
- Maintenance and repair of substations and overhead network of Mashhad City Train
- Retrofit of transmission and distribution substations of Khorasan regional electricity
- Retrofit of transfer and over-distribution substations of Sistan Regional Electricity
- Automation of some substations in Khorasan and Sistan and Baluchestan provinces



معرفی پروژه های شاخص:

- ۱- نگهداری و تعمیرات شبکه انتقال و فوق توزیع برق استانهای خراسان رضوی، شمالی و جنوبی
- ۲- نگهداری و تعمیرات شبکه انتقال و فوق توزیع برق استان سیستان و بلوچستان
- ۳- نگهداری و تعمیرات شبکه انتقال و فوق توزیع برق استان سمنان
- ۴- نگهداری و تعمیرات و راهبری ناوگان خط یک و دو قطار شهری مشهد
- ۵- نگهداری و تعمیرات شبکه پست ها و خطوط فشار قوی برق ایستگاه های پمپاژ خط انتقال آب سد دوستی
- ۶- نگهداری و تعمیرات پستها و شبکه بالاسری قطار شهری مشهد
- ۷- بهینه سازی پست های انتقال و فوق توزیع برق منطقه ای خراسان
- ۸- بهینه سازی پست های انتقال و فوق توزیع برق منطقه ای سیستان
- ۹- اتوماسیون نمودن برخی از پست های استان خراسان و سیستان و بلوچستان

صاحب امتیاز: انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران
مدیر مسوول: دکتر حبيب رجبی مشهدی
سرديبر: دکتر جواد ساده

شورای سیاست‌گذاری:

دکتر ایمان احدی اخلاقی، مهندس حسن اروچی،
مهندس محمدعلی چمنیان، دکتر حبيب رجبی مشهدی،
دکتر مصطفی رجبی مشهدی، مهندس رضا ریاحی،
دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد شکوه صارمی،
مهندس علی کارگزار، دکتر عبدالله کامیاب،
دکتر مهدی علومی بایگی، دکتر مصطفی عیدبانی،
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 حبيب رجبی مشهدی، دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد
شکوه صارمی، دکتر امیررضا عطاری، دکتر مصطفی عیدبانی،
دکتر گئورگ قره‌پتیان، 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 برنامه‌ریزی:

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؛ ضرورت بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت ساختمان
۳	فراز و فرودهای تعمیر و نگهداری شبکه‌های انتقال؛ آشنایی با شرکت فن‌آوران انرژی طوس
۶	مروری بر سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی
۲۰	اصول طراحی سنسورهای تصویر برای استفاده در دوربین‌های دیجیتال
۲۷	طراحی و ساخت سیستم آزمایشگاهی مهره و حلقه و رسم دیاگرام انشعاب آن
۳۳	بهبود خوشه‌بندی شبکه‌های اجتماعی با الگوریتم تکاملی رقابت استعماری و معیار...
۴۱	یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال... (بخش نخست)
۵۰	تحلیل و بهبود پراکنندگی ساختارهای فراسطح زیر طول موجی (چکیده رساله دکتری)
۵۰	طراحی و تحلیل دیود تونلی مبتنی بر گرافن (چکیده رساله دکتری)
۵۱	کنترل گذتاور محرکه موتور القایی دو سیم پیچه با رتور قفس ... (چکیده رساله دکتری)
۵۱	طراحی رویکرد مد لغزشی دینامیکی مقاوم برای ردهای از ... (چکیده رساله دکتری)
۵۲	مروری بر کاربرد خازن‌های بین انگشتی در سنسورهای خازنی
۶۱	شبیه‌سازی سیستم اجاق گازهای القایی با استفاده از مدار مبدل رزونانسی با ...
۷۰	مروری بر الگوریتم حافظه کوتاه مدت طولانی و کاربردهای آن
۷۸	فناوری‌های نوین در نسل ششم شبکه‌های ارتباطی
۸۷	لیزر پلاسمونیک با استفاده از ساختار فلز-عایق-فلز
۹۳	مروری بر مهم‌ترین کتاب‌های منتشر شده در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در ...

• 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.

فرخوان

نشانی:

مشهد، میدان بسیج، ابتدای خیابان بهار، شرکت برق منطقه‌ای
خراسان، طبقه سوم

وب سایت: www.kiaeee.ir

پست الکترونیک: info@kiaeee.ir



ضرورت بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت ساختمان

یادداشت مدیرمسئول

این راستا باشد. توجه به راندمان وسایل سرمایشی ساخت داخل (به‌ویژه کولرهای آبی) و کولرهای گازی وارداتی از طریق اعمال سیاست‌های گمرکی می‌تواند به‌طور موثر بهره‌وری انرژی را بهبود دهد. به‌طور مشابه این سیاست بایستی برای واحدهای گرمایشی نیز طراحی شود. اما مهم‌تر از اصلاح تعرفه، تغییر در قوانین فروش انشعاب برق یا گاز می‌باشد به‌طوری که به‌ویژه در مناطق با مصرف انرژی بالا تنها در صورتی اتصال به شبکه صورت گیرد که در فرآیند ساخت، عایقکاری‌های لازم در کف، سقف، دیوارهای جانبی و پنجره‌ها صورت گرفته باشد. بدیهی است برای اجرایی شدن این فرآیند بایستی تمامی نهادها و ذریب‌ها همکاری نمایند و در یک دوره زمانی گام به گام و با طراحی مشوق‌های مختلف و فرهنگ‌سازی، این مساله مهم را به صورت عملیاتی اجرا نمایند.

بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و تهیه «برچسب مصرف انرژی ساختمان» می‌تواند شاخصی مناسب برای ارزیابی فنی ساختمان باشد. این شاخص به‌عنوان معیاری مناسب برای مصرف‌کنندگان در هنگام خرید می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر کاهش تلفات انرژی در ساختمان و نقش آن در بهبود بهره‌وری انرژی، این فرآیند پتانسیل بالایی برای ایجاد اشتغال موثر و مفید دارد. با شرایط کشور که کمبود انرژی در زمستان گذشته و بهار کنونی در بخش‌های گاز و برق به وضوح مشاهده می‌شود، پرداختن هرچه سریع‌تر به این مساله ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که صنعت ساختمان سهم قابل توجهی در اقتصاد ملی بازی می‌کند، بازار مصالح جدید و شغل‌های تخصصی مرتبط با بحث مصرف انرژی در ساختمان برای اشتغال دانش‌بنیان نیز فرصت مغتنمی فراهم می‌سازد.

حبیب رجیبی مشهدی
مدیرمسئول

متأسفانه کشور ما ایران به لحاظ مصرف انرژی، شرایط نامناسبی داشته و بیش از $\frac{2}{5}$ برابر میانگین مصرف جهانی، انرژی مصرف می‌کند. بیش از ۴۰ درصد انرژی کشور در ساختمان‌های مسکونی و اداری مصرف می‌شود. این میزان مصرف انرژی در بخش مسکونی اداری به حدی است که برخی به ساختمان لقب «قاتل انرژی» در ایران داده‌اند. ادامه این روند می‌تواند ایران را از یک صادرکننده حامل‌های اولیه انرژی به یک کشور واردکننده انرژی تبدیل کند. در واقع یکی از فرصت‌های اصلی کشور که داشتن منابع اولیه انرژی است، با مصرف بی‌رویه انرژی در بخش‌های مختلف و از جمله بخش ساختمان به تهدیدی جدی تبدیل شده است. شدت انرژی در کشور بالاست، به عبارت دیگر بهره‌وری انرژی بسیار پایین است و مزیت کشور به‌جای آن که موجب افزایش درآمد ناخالص ملی گردد، فقط تلفات و هدررفت انرژی را افزایش داده است. آمارهای مصرف انرژی واحدهای مسکونی در کشور ما در استان‌های سردسیر و گرمسیر در مقایسه با ایالت‌های سردسیر و گرمسیر آمریکا، تفاوت فاحشی را نشان می‌دهد. مقایسه آمار نشان می‌دهد مصرف انرژی در واحد سطح در ساختمان‌های مسکونی ایران به‌طور متوسط $\frac{2}{35}$ برابر آمریکا است. این نسبت برای مناطق گرمسیر ایران حدود ۲ برابر منطقه گرم و مرطوب آمریکا می‌باشد. مصرف انرژی در واحد سطح در مناطق سردسیر ایران به‌طور تقریبی $\frac{2}{6}$ برابر مناطق سرد و خیلی سرد آمریکا است.

مقایسه بالا برای مصرف انرژی در واحد سطح با کشورهای اروپایی نیز نشان می‌دهد که هدررفت انرژی در ساختمان‌های ایران بالا می‌باشد و حدود $\frac{1}{8}$ برابر متوسط اتحادیه اروپا است. این مقایسه‌ها به وضوح نشان می‌دهد که افزایش بهره‌وری انرژی در ایران یک ضرورت بوده و از این طریق می‌توان ضمن صیانت از منابع کشور برای دانش‌آموختگان رشته‌های برق، مکانیک و عمران فضای جدیدی برای اشتغال ایجاد نمود. اصلاح تعرفه انرژی برق به‌ویژه در مناطق گرمسیر و اصلاح تعرفه گاز در مناطق سردسیر می‌تواند یک راهکار اصولی در

۱. کلیه اعداد مقایسه‌ای در این نوشتار بر اساس گزارش مطالعاتی انجام شده در شرکت توانیر می‌باشد.



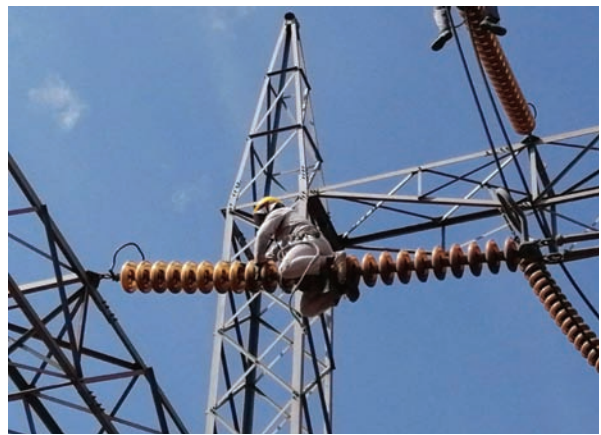
فراز و فرودهای تعمیر و نگهداری شبکه‌های انتقال

آشنایی با شرکت فن‌آوران انرژی طوس

تجهیزات انتقال و فوق توزیع شبکه برق خراسان بر اساس اصل ۴۴ قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران از سال ۱۳۷۸ به یک شرکت خصوصی تبدیل شد تا عهده‌دار تعمیر و تامین شبکه‌ی انتقال نیروی برق خراسان شود. بعدها این شرکت با نام مهندسی انتقال نیرو و مخابرات شرق به فعالیت پرداخت و در سال ۱۳۸۵ به «مهام شرق» تغییر نام داد. مهم شرق اکنون به یک مجموعه‌ی گسترده و توانمند تبدیل شده که در دل خود شرکت‌های بسیاری را در حوزه‌های مختلف صنعت برق به رشد و شکوفایی رسانده است. «فن‌آوران انرژی طوس» که در سال ۱۳۹۱ تاسیس شده است یکی از همان شرکت‌ها است که از سال ۱۳۹۶ عهده‌دار تعمیرات شبکه شد، وظیفه‌ای که پیش از آن بر عهده‌ی شرکت آذرخش، دیگر شرکت زیر مجموعه‌ی مهم شرق بود.

فن‌آوران انرژی طوس اکنون با ۵۰۰ پرسنل متخصص در بخش‌های مختلف تعمیرات خط و تجهیزات پست‌های فشار قوی فعالیت خود را به تمام کشور گسترش داده است و برخورداری از بسیاری امکانات و ماشین‌آلات مختلف در زمینه‌های تخصصی، گستره‌ی جغرافیایی فعالیت این شرکت را به حوزه صنایع بزرگ برق، آب، نفت، گاز، پتروشیمی و صنایع معدنی و فلزی مانند فولاد، سیمان و مس و برخی تاسیسات زیرساختی متروبی کشانده است.

نگهداری و تعمیرات شبکه انتقال و فوق توزیع برق استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی، نگهداری و تعمیرات شبکه انتقال و فوق توزیع برق استان سیستان و بلوچستان، نگهداری و تعمیرات شبکه انتقال و فوق توزیع برق استان سمنان، بهینه‌سازی پست‌های انتقال و فوق توزیع برق منطقه‌ای خراسان و بهینه‌سازی پست‌های انتقال و فوق توزیع برق منطقه‌ای سیستان بخشی از فعالیت‌های این شرکت را در همکاری مستقیم با صنعت برق تشکیل می‌دهد و نگهداری و تعمیرات و راهبری ناوگان خط یک و دو قطار شهری مشهد، نگهداری و تعمیرات شبکه پست‌ها و خطوط فشار قوی برق ایستگاه‌های پمپاژ خط انتقال آب سد دوستی و نگهداری و تعمیرات پست‌ها و شبکه بالاسری قطار شهری مشهد از جمله فعالیت‌های این شرکت در صنایع دیگر است.



بروز خاموشی جلوگیری شود. مهندس جهانی در ادامه می‌گوید: «اگر چه تعمیرات پیشگیرانه برای جلوگیری از خاموشی بسیار ضروری است اما عوامل بسیاری در خاموشی و قطع برق مشترکان تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال یکی از عوامل خاموشی در سال ۱۴۰۰ شرایط جوی خاصی است که از نظر بارندگی در سال جاری به‌وقوع پیوسته است و باعث از بین رفتن بخشی از ظرفیت نیروگاه‌های برقی شده است که به‌طور معمول در شرایط اوج مصرف شبکه به‌کارگیری می‌شوند.»

مدیرعامل شرکت فن‌آوران انرژی طوس اعتقاد دارد برای رفع این مشکلات باید به نیروگاه‌های تولید پراکنده و تجدیدپذیرها بیشتر توجه شود و تولید از صورت متمرکز خارج گردد و بحث تولید در محل مصرف بیشتر مورد دقت قرار گیرد چرا که تولید پراکنده هزینه‌ی تلفات و هزینه‌ی سنگین احداث شبکه و نگهداری آن را بسیار کاهش خواهد داد. بنابراین لازم است دولت‌های آینده بیشتر در این مسیر قرار گیرند و سیاست‌های انرژی به‌گونه‌ای تدوین شود که صنعت برق به‌عنوان یک صنعت زیربنایی در اولویت توجه باشد و توسعه‌ی زیرساخت‌ها جدی گرفته شود.

مهندس جهانی در ادامه می‌افزاید: «نگرش دولت و مجلس به صنعت برق باید به‌عنوان یک بخش درآمدزا باشد. در حال حاضر بخشی از درآمد صنعت برق در هدفمندی یارانه‌ها هزینه می‌شود در حالی که صنعت برق خود به آن نیازمند است و کمبود نقدینگی صنعت برق را دچار مشکل نموده است. از طرفی تعرفه‌ی انرژی واقعی نیست که هم باعث افزایش مصرف می‌شود و مدیریت مصرف را با چالش روبه‌رو می‌کند و هم صنعت آب و برق را به یک صنعت زیان‌ده تبدیل کرده است چرا که نمی‌توان آب و برق را با قیمت تمام شده در اختیار مصرف‌کننده قرار داد و انرژی به‌صورت یارانه‌ای در دسترس مشترکان قرار می‌گیرد. در این شرایط طرح‌های توسعه‌ای که برای آینده صنعت برق مورد نیاز است متوقف می‌شوند و چون صنعت برق صنعت گران‌قیمتی است و اجرای طرح‌های آن هم زمان‌بر است بعدها حتی در صورت تامین مالی، موضوع زمان می‌تواند مشکل ایجاد کند.»

چالش‌های تعمیر و نگهداری در صنعت برق

موضوع تعمیر و نگهداری در تمام سیستم‌ها همواره با مشکلات و محدودیت‌هایی روبه‌رو است، محدودیت‌هایی که بهره‌بردار را ملزم به حرکت در چارچوب‌های خاصی از انتخاب و تامین قطعه تارعیات برخی آیین‌نامه‌ها می‌نماید. مهندس جهانی با بیان این که یکی از چالش‌ها فرسوده بودن و قدیمی بودن برخی از تجهیزات است در ادامه می‌گوید: «گاهی تعویض یک ترانسفورماتور ماه‌ها زمان می‌برد چرا که برخی از ترانسفورماتورها بسیار قدیمی هستند و دیگر تولید نمی‌شوند

تعمیرات پیشگیرانه، لازمی جلوگیری از فروپاشی شبکه

مهندس محمد جهانی مدیرعامل شرکت فن‌آوران انرژی طوس در گفت و گو با گروه خبری نشریه عصربرق در مورد فعالیت‌های این شرکت گفت: «از سه بخش تولید، انتقال و توزیع نیروی برق در بیشتر کشورهای دنیا بخش انتقال نیرو که ارتباط بین تولید و توزیع را برقرار می‌کند، به‌عنوان بخش حاکمیتی صنعت برق همواره در اختیار دولت‌ها است و از واگذاری آن به بخش خصوصی جلوگیری می‌شود. شرکت فن‌آوران انرژی طوس در زمینه‌ی تعمیرات پیشگیرانه و بهینه‌سازی شبکه در بخش انتقال فعالیت دارد. اطلاعاتی که در تعمیر و نگهداری کسب می‌شود بسیار مهم است و تصمیم‌سازی برای آینده‌ی شبکه بر اساس تجربه‌ها و همین اطلاعات گذشته‌ی شبکه انجام می‌شود. وقتی قرار است تستی در مورد یک تجهیز انجام و گزارش کارشناسی ارائه شود باید به گذشته‌ی آن توجه گردد تا حوادث ناخواسته‌ای که باعث وارد شدن تنش به تجهیزات و کاهش عمر آن‌ها شده است در نظر گرفته شود.»

مهندس جهانی که بیش از دو دهه در مجموعه‌ی مهمام شرق حضور دارد در مورد اهمیت PM در شبکه‌های برق می‌گوید: «اگر اشتباهاتی در بحث تعمیر و نگهداری در بخش شبکه وجود داشته باشد، شبکه را با تهدید جدی روبه‌رو خواهد کرد که ممکن است به فروپاشی شبکه منجر شود. در یک شبکه از زمان شروع فروپاشی تا خاموشی کامل تنها چند دقیقه طول می‌کشد که در عمل فرصت هر نوع واکنش را از بهره‌برداران سلب می‌کند و در واقع باید با تمهیدات لازم در زمینه‌ی تعمیر و نگهداری پیش از چنین رخدادی آن را علاج نمود. هرچه شبکه گسترده‌تر باشد، امکان فروپاشی آن افزایش می‌یابد و حتی پیشرفته‌ترین شبکه‌ها هم از این خطر در امان نیستند و در سال‌های اخیر در شبکه‌های پیشرفته آمریکا و اروپا هم شاهد فروپاشی و خاموشی‌های گسترده بوده‌ایم. بنابراین شناخت عواملی که به فروپاشی منجر می‌شوند بسیار مهم است. به هر حال در هر شبکه تجهیزاتی وجود دارد که از حساسیت بالایی برخوردار هستند و باید به شدت از آن‌ها مراقبت شود چرا که با کوچک‌ترین اشکال در کار این تجهیزات ممکن است تمام شبکه از دست برود.»

خاموشی‌ها مانع جهش تولید است

مهندس محمد جهانی مدیرعامل شرکت فن‌آوران انرژی طوس تأکید دارد خاموشی‌ها یکی از موانع جهش تولید است و قطع برق خسارت‌های جبران‌ناپذیری را بر صنایع مختلف تحمیل می‌کند و ممکن است باعث بروز مشکلات جدی اجتماعی و امنیتی شود. بنابراین باید برنامه‌ریزی‌ها به‌گونه‌ای باشد که شبکه از پایداری کامل و بالایی برخوردار باشد و از



مهندس محمد جهانی؛ مدیرعامل شرکت فن‌آوران انرژی طوس



توانمند داخلی هیچ مانعی در بحث تولید سر راه خود نمی‌بینند، مشکلی که وجود دارد در بحث مصرف و توزیع است که دست‌هایی پیدا و پنهان نمی‌گذارند تجهیزاتی که تولید شده است به راحتی توزیع و به کارگیری شود.» وی در ادامه به توانایی و آمادگی مجموعه‌ی مهم شرق برای استفاده از تجهیزات داخلی اشاره کرد و گفت: «در مجموعه‌ی مهم شرق، به دلیل حضور متخصصان و کارشناسان خبره و ماهر از یک طرف و تجهیزات و ابزارهای لازم از سوی دیگر، این امکان وجود دارد که تجهیزات ساخت داخل را مورد آزمایش قرار دهد و در صورت برخورداری از قابلیت و کیفیت لازم، آن‌ها را مورد استفاده قرار دهد و از تجهیزات ساخت داخل حمایت نماید. این موضوع ممکن است برای بسیاری از کارفرمایان دولتی امکان‌پذیر نباشد.»

مدیرعامل شرکت فن‌آوران انرژی طوس یکی از مهم‌ترین چالش‌های حوزه‌ی کاری شرکت‌های بهره‌بردار و پیمانکاران صنعت برق را کمبود نقدینگی کارفرمایان بخش دولتی می‌داند، موضوعی که می‌تواند این گروه از شرکت‌ها را در صورت تأخیر در پرداخت مطالبات با مشکلات جدی مواجه نماید: «شرکت‌هایی که به صورت تخصصی فعالیت دارند از بدنه‌ی اجرایی بزرگ و متخصصی برخوردار هستند که حفظ سرمایه‌های انسانی آن‌ها یکی از دغدغه‌های مدیران شرکت‌ها است. کمبود منابع مالی در صورت توقف پروژه‌ها یا عدم پرداخت به موقع مطالبات باعث از دست رفتن نیروی انسانی خواهد شد. موضوعی که می‌تواند آینده‌ی صنعت برق را هم مورد تهدید جدی قرار دهد و در بسیاری از موارد باعث خروج نیروهای متخصص و کارآزموده از کشور یا دست‌کم از بازار کار این صنعت شود.»

چشم‌انداز آینده مبتنی بر نوآوری‌ها

افزون بر آن‌چه در بیشتر شرکت‌ها برای برنامه‌ی آینده در نظر گرفته می‌شود، شرکت فن‌آوران انرژی طوس حرکت به سمت فناوری‌های نوین را در دستور کار قرار داده است. طراحی و ساخت ربات‌های نصب گوی هشدار دهنده و ربات‌های بازدید خطوط از جمله کارهای است که به گفته‌ی مهندس جهانی در این شرکت پیگیری شده و در حال طی مراحل پایانی خود می‌باشد. ربات‌هایی که هم، زمان انجام کار را کاهش می‌دهد و هم باعث افزایش ایمنی و پیشگیری از خطاهای انسانی می‌شود.

به‌روزآوری تجهیزات، توسعه‌ی دفتر فنی برای توسعه شبکه برق خراسان، برگزاری دوره‌های یکپارچه آموزشی برای پرسنل و کیفیت کار در شبکه برق و استقرار کارگاه آموزشی در داخل شرکت برای تربیت و پرورش پرسنل تازه وارد هم از اقداماتی است که از نظر مدیران شرکت فن‌آوران انرژی طوس دور نمانده است.

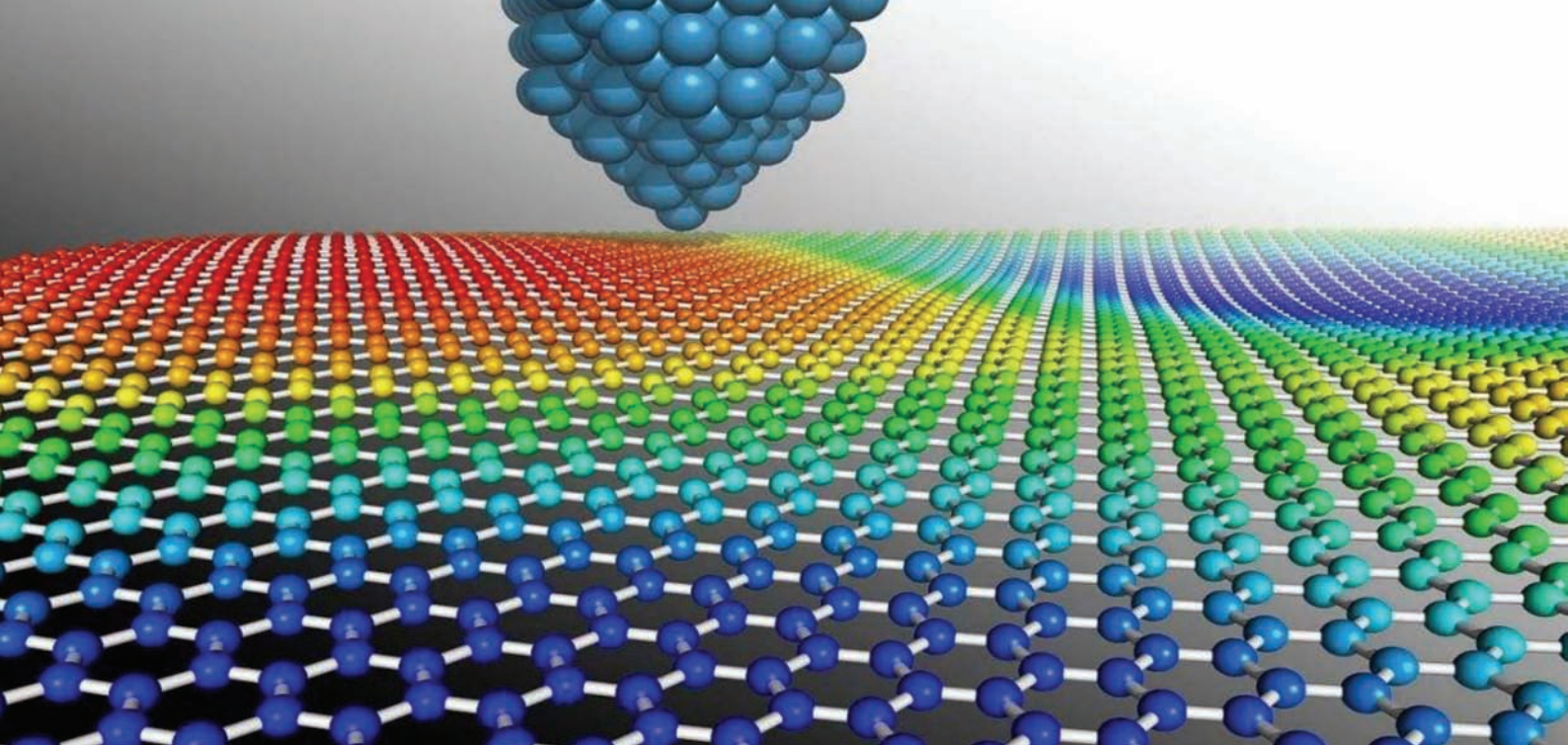
و گاهی شرکت سازنده دیگر وجود ندارد. به این ترتیب اگر تجهیز جدیدی بخواهد جایگزین تجهیز قدیمی شود باید هم با دیگر تجهیزات همخوانی داشته باشد و هم نیاز را برطرف کند که این موضوع کار بسیار زمان‌بر و نیازمند بررسی‌های دقیق چندجانبه است.» مدیرعامل شرکت فن‌آوران انرژی طوس

مشکل دیگر این حوزه را اثرگذاری مستقیم تحریم‌های خارجی و خودتحریمی‌ها می‌داند، خودتحریمی‌هایی که به گفته‌ی او بیش از تحریم‌های خارجی بر فرایند کارها اثر گذاشته است. وی در ادامه می‌گوید: «بسیاری از بخش‌های صنعت برق به خودکفایی رسیده است. تحریم‌ها مربوط به چند سال اخیر نیست و سال‌ها است که کشور با تحریم‌های مختلفی روبرو بوده است. هر زمان بخش دولتی به صنعت داخلی تکیه کرده‌اند، موفق عمل کرده‌ایم و هر زمان صنعت داخلی جدی گرفته نشده است، کشور متحمل ضربه شده است. در شرایط تحریم بسیاری از تجهیزات به کمک شرکت‌های داخلی تامین شده است و این نشان از توان بالای صنایع داخلی دارد و همواره باید مورد توجه باشد.»

مهندس محمد جهانی سپس به برخی از تجهیزات تست اشاره می‌کند که در داخل کشور ساخته شده است و مشکلات بسیاری را از سر راه برداشته است: «به‌طور قطع برای ما به‌عنوان مجموعه‌ای که کار تعمیر و نگهداری تاسیسات پیشرفته‌ی صنعت برق را بر عهده دارد، بسیار بهتر است که از تجهیزات ساخت داخل استفاده کنیم. تجربه‌ی ما نشان داده است که دستگاه‌های ساخت داخل هر زمان دچار مشکل شده‌اند از طرف شرکت سازنده‌ی داخلی حمایت‌های بسیاری دریافت کرده‌ایم و مهم‌ترین آن این است که هرگز معطل و منتظر قطعه نشده‌ایم و بیشتر موارد شرکت سازنده تا رفع نقص پیش آمده دستگاه جایگزین در اختیار ما قرار داده است تا شبکه دچار مشکل نشود، موضوعی که هرگز در مورد تجهیزات خارجی اتفاق نمی‌افتد.»

تا چند سال پیش بسیاری از دستگاه‌های تست مورد استفاده بخش تعمیرات از خارج وارد می‌شد اما امروز بیشتر این تجهیزات بومی‌سازی شده و تنها اندکی از دستگاه‌ها که از توجیه اقتصادی برای تولید داخلی برخوردار نیستند از خارج وارد می‌شود. شرکت فن‌آوران انرژی طوس هم بر حسب نیاز برخی از دستگاه‌ها را بومی‌سازی نموده و عنوان دانش‌بنیان را دریافت کرده است.»

مهندس جهانی مدیرعامل شرکت فن‌آوران انرژی طوس از تولید داخل به عنوان رخدادهای خوبی یاد می‌کند که نیازمند و شایسته‌ی حمایت هستند: «در گذشته پست‌های برق به‌صورت کامل از خارج وارد می‌شود و از مرحله‌ی طراحی تا نصب به عهده‌ی شرکت‌های خارجی بود اما امروز با وجود تحریم‌ها روی پای خودمان ایستاده‌ایم و شرکت‌های



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

آرزو رجبی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، rajaei@mshdiau.ac.ir
محبووبه هوشمند، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، hoshmand@mshdiau.ac.ir
سیدعابد حسینی، گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، hosseyini@mshdiau.ac.ir

چکیده

محاسبات کوانتومی روش جدیدی از پردازش اطلاعات است که بر مبنای مفاهیم مکانیک کوانتومی بنا شده است و منجر به رخدادهای عجیب و قدرتمندی در حوزه کوانتوم می‌شود. هر ماتریس یکانی نمایش‌دهنده یک گیت کوانتومی است. سنتز مدارهای کوانتومی به فرایند تبدیل یک گیت کوانتومی به یک سری گیت‌های پایه اطلاق می‌شود و به دو دسته کلی مبتنی بر تجزیه و ترکیب تقسیم می‌گردد. در روش‌های دسته نخست با بهره‌گیری از روش‌های تجزیه ماتریسی مدارهای کوانتومی سنتز می‌شوند. این مطالعه به دسته دوم می‌پردازد که با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و به خصوص الگوریتم ژنتیک از ضرب گیت‌های ماتریسی برای دستیابی به مشخصه نهایی مدار کوانتومی بهره گرفته می‌شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم تکاملی، الگوریتم ژنتیک، سنتز مدارای کوانتومی، محاسبات کوانتومی

A Review on the Synthesis of Quantum Circuits Using Evolutionary Algorithms

Arezoo Rajaei, Department of Computer Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, rajaei@mshdiau.ac.ir
Mahboobeh Hoshmand, Department of Computer Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, hoshmand@mshdiau.ac.ir
Seyyed Abed Hosseini, Department of Electrical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, hosseyini@mshdiau.ac.ir

Abstract

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

Keywords: Evolutionary Algorithms, Genetic Algorithms, Synthesis of Quantum Circuits, Quantum Computing

۱- مقدمه

یک گیت منطقی، برگشت پذیر خوانده می شود اگر هر جایگشتی از ورودی را به یک جایگشت از خروجی ببرد. ورودی یک گیت معکوس پذیر از روی خروجی آن مشخص می شود. گیت های برگشت پذیر، مانند NOT برخلاف گیت های برگشت ناپذیر (مانند OR) تعداد ورودی و خروجی های برابر دارند. مدارهای برگشت پذیر، از کنار هم قرار دادن گیت های برگشت پذیر به وجود می آیند. در مدارهای برگشت پذیر حرکت مدار در راستای زمان از چپ به راست است. از جمله ویژگی های مدارهای برگشت پذیر این است که در آنها بازخورد^۱ و گنجایش خروجی^۲ وجود ندارد.

محاسبات کوانتومی^۳ [۳-۱] حاصل ترکیب مکانیک کوانتومی^۴ و نظریه اطلاعات کلاسیک است و منجر به رخدادهای عجیب و قدرتمندی در حوزه کوانتوم می شود. با تعریفی که در ابتدای مقدمه در رابطه با برگشت پذیری ذکر شد، مدارهای کوانتومی همه برگشت پذیر هستند. هر ماتریس یکانی نمایش دهنده یک گیت کوانتومی است. سنتز مدارهای کوانتومی به فرایند تبدیل یک گیت کوانتومی به یک سری گیت های پایه گفته می شود. مساله سنتز و بهینه سازی مدارهای کوانتومی یک مساله سخت است [۴]. سنتز مدارهای کوانتومی به دو دسته کلی مبتنی بر تجزیه و ترکیب تقسیم می گردد. در روش های دسته نخست با بهره گیری از روش های تجزیه ماتریسی مدارهای کوانتومی سنتز می شوند. این مطالعه، به دسته دوم می پردازد که با استفاده از الگوریتم های تکاملی و به خصوص الگوریتم های ژنتیک از ضرب گیت های ماتریسی برای دستیابی به مشخصه نهایی مدار کوانتومی بهره گرفته می شود. در زمینه استفاده از روش های تکاملی در سنتز مدارهای کوانتومی، مطالعات کمی صورت گرفته است.

ساختار ادامه این نوشته از این قرار است. در بخش ۲، پیش زمینه های مورد نیاز در رابطه با محاسبات کوانتومی بیان شده اند. در بخش ۳، مقدمه ای بر الگوریتم های ژنتیک مطرح شده است. در بخش ۴ کارهای مرتبط در زمینه سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم های تکاملی بررسی شده اند. بخش ۵ به جمع بندی و پیشنهادهایی برای کارهای آتی می پردازد.

۲- پیش زمینه

محاسبات کوانتومی حاصل ترکیب مکانیک کوانتومی و نظریه اطلاعات کلاسیک است و منجر به رخدادهای عجیب و قدرتمندی در حوزه کوانتوم می شود. در این بخش، در زیر بخش ۲-۱ تاریخچه محاسبات کوانتومی بیان می شود و در زیر بخش ۲-۲، اصول محاسبات کوانتومی مطرح می گردد.

۲-۱- تاریخچه محاسبات کوانتومی

محاسبات کوانتومی شاخه جدیدی از پردازش اطلاعات بر مبنای اصول مکانیک کوانتومی است. هرچند هنوز کامپیوترهای کوانتومی به طو کامل عملی، ساخته نشده اند، اما آینده کامپیوترهای کوانتومی بسیار روشن به نظر می رسد.

ایده دستگاه محاسباتی بر مبنای مکانیک کوانتومی برای نخستین بار در دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ توسط فیزیکدانان و متخصصان کامپیوتر از قبیل چارلز بنت^۵، پل بنیوف^۶، دیوید دویچ^۷ و ریچارد فاینمن^۸ مطرح شد. این ایده زمانی ظاهر شد که دانشمندان با محدودیت های اساسی محاسبات روبه رو شدند. آن ها متوجه شدند که اگر فناوری طبق قانون مور^۹ به جلو رود، اندازه عناصر مداری که بر روی تراشه های سیلیکونی تعبیه می شود، عاقبت بیشتر از چند اتم نخواهد بود. مشکلی که در اینجا پیش می آید این است که در اندازه

اتمی، قوانین فیزیکی که بر رفتار اتمها حاکم هستند، قوانین مکانیک کوانتومی هستند، نه قوانین مکانیک کلاسیک.

[۵]، جزو نخستین افرادی بود که در سال ۱۹۸۲، مدلی انتزاعی پیشنهاد کرد که نشان می داد چگونه یک سیستم کوانتومی می تواند محاسبات را انجام دهد. سپس در سال ۱۹۸۵، دویچ [۶]، دریافت که ایده فاینمن، می تواند عاقبت به یک کامپیوتر همه کاره منجر شود و یک مقاله منتشر کرد که به صورت نظری نشان می داد هر فرآیند فیزیکی را می توان به صورت کامل با یک کامپیوتر کوانتومی مدل کرد. موفقیت اصلی توسط شور^{۱۰} در سال ۱۹۹۴، وقتی او به کمک کامپیوترهای کوانتومی، روشی برای شکستن یک مساله مهم در نظریه اعداد- تجزیه اعداد به عوامل اول [۸،۷] پیدا کرد، حاصل شد. او نشان داد که مجموعه ای از اعمال ریاضی که برای کامپیوتر کوانتومی طراحی شده اند، قابلیت تجزیه اعداد بزرگ را بر روی کامپیوترهای کوانتومی، بسیار سریع تر از کامپیوترهای کلاسیک دارند. با این موفقیت و همین طور کشف الگوریتم جستجوی گراور^{۱۱} [۹]، محاسبات کوانتومی از یک کنجکاوای دانشگاهی صرف، به یک علاقه جهانی تبدیل شد.

حوزه محاسبات کوانتومی مدرن، با کشف توزیع کلید کوانتومی^{۱۲} [۱۰]، توانایی ارسال یک بیت کوانتومی به کمک دو بیت کلاسیک و یک بیت درهم تنیدگی (مخبره از راه دور کوانتومی [۱۱])^{۱۳} و توانایی ارسال دو بیت کلاسیک با ارسال یک بیت کوانتومی و یک بیت درهم تنیدگی (کدگذاری چگال کوانتومی^{۱۴} [۱۲]) آغاز شد. سپس محققان، تلاش های عمیق تری برای ترکیب منابع مخابرات کلاسیک، مخابرات کوانتومی و درهم تنیدگی برای فرمول بندی پروتکل های جدید کوانتومی انجام دادند.

۲-۲- اصول محاسبات کوانتومی

۲-۲-۱- کیوبیت ها

حالات کوانتومی را می توان برحسب بردارها و یا با نماد معروف تر براکت^{۱۵} نمایش داد. کت ها همانند $|x\rangle$ نمایشگر بردارهای ستونی هستند و به طور کلی برای توصیف حالات کوانتومی به کار می روند. حالت $|x\rangle$ ، نمایشگر ترانهاده مزدوج^{۱۶} $\langle x|$ است. حالات پایه $|1\rangle$ و $|0\rangle$ را می توان به صورت $(1,0)^T$ و $(0,1)^T$ بیان کرد. هر ترکیبی از $|1\rangle$ ، $|0\rangle$ ، $|x\rangle$ را می توان به صورت $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \in C^2$ نشان داد. $\langle x|y\rangle$ نمایشگر ضرب داخلی^{۱۷} دو بردار است. برای نمونه چون $|0\rangle$ و $|1\rangle$ عمود هستند داریم: $\langle 0|1\rangle = 0$ و $\langle 0|0\rangle = \langle 1|1\rangle = 1$ ، نشان دهنده ضرب خارجی^{۱۸} دو بردار است.

یک کیوبیت^{۱۹}، یک بردار یکه، در فضای دو بعدی مختلط است که برای این فضا بردارهای پایه مشخص که با نماد $|1\rangle$ و $|0\rangle$ نمایش داده می شوند انتخاب شده اند. بردارهای پایه $|1\rangle$ و $|0\rangle$ به ترتیب همتهای کوانتومی بیت های کلاسیک ۰ و ۱ می باشند. برخلاف بیت های کلاسیک، کیوبیت ها می توانند در هر برهم نهی^{۲۰} $|1\rangle$ و $|0\rangle$ همانند $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ قرار بگیرند که α و β اعداد مختلطی هستند که $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

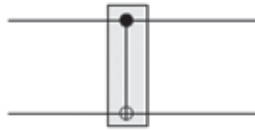
اگر چنین ترکیبی نسبت به پایه های $|1\rangle$ و $|0\rangle$ اندازه گیری شوند، آنگاه $|0\rangle$ با احتمال $|\alpha|^2$ و $|1\rangle$ با احتمال $|\beta|^2$ مشاهده می شود. یک ثابت n کیوبیتی، یک حالت کوانتومی است که فضای حالت آن یک فضای^{۲۱} 2n بعدی مختلط می باشد. با فرض بردارهای پایه $|1\rangle$ و $|0\rangle$ ؛ برای فضای یک کیوبیتی، بردارهای پایه این ثابت در مجموعه زیر می باشند.

$$\{|i_1\rangle \otimes |i_2\rangle \otimes \dots \otimes |i_n\rangle; i_1, i_2, \dots, i_n = 0,1\} \quad (1)$$

و یا به طور معادل:

$$CNOT \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

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



شکل ۱: نمایش مداری گیت CNOT

در حالت کلی‌تر، اگر U، یک گیت تک کیوبیتی، با نمایش مداری زیر باشد:

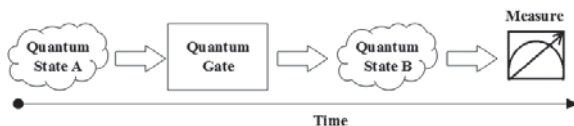
$$U \equiv \begin{bmatrix} u_{00} & u_{01} \\ u_{10} & u_{11} \end{bmatrix} \quad (10)$$

آنگاه، گیت U-کنترل شده، گیتی است که بر دو کیوبیت اثر می‌کند به طوری که کیوبیت اول، کیوبیت کنترل و کیوبیت دوم، کیوبیت هدف می‌باشد. اگر کیوبیت کنترلی برابر $|1\rangle$ باشد، این گیت یکانی U را بر روی کیوبیت هدف اعمال می‌کند و اگر کیوبیت کنترل، $|0\rangle$ باشد، کیوبیت هدف بدون تغییر خارج می‌شود.

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

۲-۲-۳- مدارهای کوانتومی

یک مدار کوانتومی، از مجموعه‌ای از سیم‌ها (کیوبیت‌ها) و توالی از گیت‌های کوانتومی تشکیل می‌گردد. محاسبات کوانتومی که با مدارهای کوانتومی مدل شده، در شکل (۲) نشان داده شده است. یک مدار کوانتومی همواره از چپ به راست ارزیابی می‌شود. بنابراین حرکت از چپ به راست در یک مدار کوانتومی به معنای حرکت به جلو در زمان است.



شکل ۲: محاسبات کوانتومی که با مدارهای کوانتومی مدل شده است [۱۳].

در مدارهای کوانتومی برای نشان دادن عملیات اندازه‌گیری از یک اندازه‌گیر به صورت زیر مشخص شده در شکل (۳) استفاده می‌شود. در این صورت سیم‌های کوانتومی پیش از اندازه‌گیری با یک خط مشخص می‌شوند. از آنجایی که پس از اندازه‌گیری فقط دو مقدار ۰ و ۱ قابل حصول می‌باشد، سیم‌های پس از اندازه‌گیری به صورت کلاسیک و با دو خط نشان داده می‌شوند.



شکل ۳: اندازه‌گیر کوانتومی [۱۳].

۳- الگوریتم‌های ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک (GA) [۱۶-۱۴] الگوریتم‌های جستجوی تصادفی هستند که فرایند تکامل طبیعی را شبیه‌سازی می‌کنند. الگوریتم‌های

$$\{|i_1 i_2 \dots i_n\rangle; i_1, i_2, \dots, i_n = 0, 1\} \quad (2)$$

حالت یک ثابت کیوبیتی، یک بردار در یک فضای کیوبیتی است:

$$|\varphi\rangle = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_n=0,1} a_{i_1, i_2, \dots, i_n} |i_1\rangle \otimes |i_2\rangle \otimes \dots \otimes |i_n\rangle, \quad (3)$$

که

$$\sum_{i_1, i_2, \dots, i_n=0,1} |a_{i_1, i_2, \dots, i_n}|^2 = 1 \quad (4)$$

مفهوم درهم‌تنیدگی^{۲۱} کوانتومی که همتای کلاسیک ندارد به عنوان منبع فیزیکی مهم در بسیاری از حوزه‌های مهم محاسبات و اطلاعات کوانتومی می‌باشد. یک حالت کوانتومی چند کیوبیتی $|\varphi\rangle$ درهم‌تنیده است اگر نتوان آن را به صورت ضرب تانسوری $|\varphi\rangle = |\varphi_1\rangle \otimes |\varphi_2\rangle$ نوشت. برای مثال جفت EPR نشان داده شده در زیر یک حالت کوانتومی درهم‌تنیده است:

$$|\varphi\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

به عبارت دیگر، کیوبیت‌های تشکیل‌دهنده یک حالت درهم‌تنیده به گونه‌ای باهم ترکیب شده‌اند که حالت کوانتومی یک جز تشکیل‌دهنده آن را نمی‌توان مستقل از حالت سایر اجزا تشکیل‌دهنده آن توصیف کرد حتی اگر ذرات به صورت فیزیکی از هم دور باشند.

۲-۲-۲- گیت‌های کوانتومی

اعمال کوانتومی را می‌توان با شبکه‌ای از گیت‌ها محقق کرد. هر گیت کوانتومی، یک تبدیل خطی است که با یک ماتریس یکانی^{۲۲} موثر بر روی فضای n کیوبیتی تعریف می‌گردد. ماتریس U یکانی است اگر $UU^\dagger = I$ که، U⁺ ترانزپوز مزدوج ماتریس U می‌باشد. چون هر عمل یکانی، معکوس پذیر است، هر گیت کوانتومی نیز معکوس پذیر است. بنابراین اگر خروجی‌های یک گیت کوانتومی را داشته باشیم، می‌توان ورودی‌های متناظر با آن را به دست آورد.

مثال‌هایی از گیت‌های تک کیوبیتی مفید، اعضای مجموعه پائولی \mathbb{P}

می‌باشد که از چهار عملگر زیر تشکیل شده است:

$$I \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, X \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, Y \equiv \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, Z \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

I تبدیل همانی^{۲۳}، X گیت چرخش بیت^{۲۴}، Z گیت چرخش فاز^{۲۵} و Y ترکیبی از هر دو است. اثر این تبدیلات بر روی حالات پایه $|1\rangle$ و $|0\rangle$ به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} X: |0\rangle &\rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow |0\rangle \\ Y: |0\rangle &\rightarrow i|1\rangle, |1\rangle \rightarrow -i|0\rangle \\ Z: |0\rangle &\rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow -|1\rangle \end{aligned} \quad (7)$$

دو گیت تک کیوبیتی مهم دیگر، گیت هادامارد^{۲۶} و گیت دوران فاز^{۲۷} است که بهترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} H &\equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \\ Rot(\theta) &\equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

گیت معکوس کننده-کنترلی^{۲۸}، CNOT، یک گیت دو کیوبیتی است. کیوبیت اول، در نقش کنترل و کیوبیت دوم در نقش هدف است. اگر کیوبیت کنترل، $|1\rangle$ باشد، CNOT، کیوبیت هدف را معکوس می‌کند و اگر کیوبیت کنترل، $|0\rangle$ باشد، کیوبیت هدف بدون تغییر خارج می‌شود. به عبارت دیگر، خروجی دوم، XOR کیوبیت کنترل و هدف می‌باشد. نمایش مداری گیت CNOT به صورت زیر است:


```

{
Initialize population with random solutions;
While TerminationCriteriaNotSatisfied
{
Evaluate population;
Select parents for reproduction;
Perform recombination (with a probability  $p_r$ ),
mutation (with a probability  $p_m$ );
}
}

```

در این روش به بیان ساده، برای بهینه‌سازی تابع هدف (تابع برازندگی) مساله، در هر مرحله، از یک جمعیت^{۴۵} اولیه کروموزوم‌ها (افراد^{۴۶}) که در حقیقت پاسخ‌های اولیه مساله می‌باشند، به یک جمعیت جدید از کروموزوم‌ها و یا یک نسل^{۴۷} جدید که در حقیقت پاسخ‌های ثانویه مساله مفروض می‌باشند می‌رسیم. بنابراین با تکرار این عملیات و تولید جمعیت جدید از جمعیت قبلی در هر مرحله و در نتیجه رسیدن به نسل‌های موفق، جمعیت به سمت یک پاسخ بهینه رشد خواهد کرد.

به‌طور معمول، افراد به شکل رشته‌های دودویی (شکل ۴) نمایش داده می‌شوند، هر چند کدگذاری‌های دیگر نیز ممکن است. جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند. هر فرد در جمعیت یک مقدار برازندگی دارد. به‌طور معمول برازندگی معیاری است که نشان می‌دهد یک فرد چه قدر برای حل مساله مورد نظر مطلوب است.

انتخاب، از مقادیر برازندگی استفاده می‌کند تا افرادی را برای اعمال تقاطع و جهش برای نسل بعد تعیین کند. جهش و تقاطع سعی می‌کنند ویژگی‌های افراد والد را تغییر دهند تا بتوانند فرزندان متمایزی ایجاد کنند. تقاطع عمل اصلی اکتشاف در GA است. این عملگر دو فرد را از بین افرادی که برای حضور در نسل بعد انتخاب شده‌اند به‌طور تصادفی انتخاب می‌کند و زیررشته‌های تصادفی را بین آنها جابجا می‌کند. عمل فرعی جستجو، جهش است. وظیفه آن بازیابی گوناگونی است که ممکن است در اثر اعمال مکرر انتخاب و تقاطع از بین برود. این فرآیند در نسل‌هایی تکرار می‌شود تا به‌شرط توقف برسیم. این شرط توقف می‌تواند رسیدن به یک تعداد پیش‌فرض از نسل‌ها باشد. یک شرط توقف متداول دیگر می‌تواند زمانی باشد که کیفیت میانگین جمعیت پس از چند نسل بهبود نیابد.

۴- سنتز مدارهای کوانتومی

۴-۱- مساله سنتز مدارهای کوانتومی

مشخصه هر مدار کوانتومی بر روی n کیوبیت با یک ماتریس یکانی $2^n * 2^n$ نشان داده می‌شود. سنتز یک مدار کوانتومی به فرآیند تبدیل این مشخصه به گیت‌های کوانتومی شناخته شده (با توجه به کتابخانه گیت‌ها) گفته می‌شود. مشخصه یک مدار کوانتومی و مدار معادلی برای این مشخصه به ترتیب در سمت چپ و سمت راست شکل (۴) نشان داده شده است. شماره‌گذاری خطوط مدار از بالا به پایین صورت می‌گیرد.

ژنتیک دست‌های از الگوریتم‌های تکاملی^{۲۰} هستند و به‌طور معمول برای حل مسایل بهینه‌سازی به کار برده می‌شوند. الگوریتم‌های ژنتیک کاربرد زیادی در علوم مختلف نظیر علوم زیستی، مهندسی، علوم کامپیوتر، اقتصاد، شیمی، ریاضی و فیزیک دارند. در زیر بخش ۳-۱ تاریخچه‌ای از الگوریتم‌های ژنتیک مطرح می‌شود. سپس در زیر بخش ۳-۲ پایه‌های زیستی این موضوع بیان می‌گردد. در نهایت در زیر بخش ۳-۳ الگوریتم ژنتیک ساده توضیح داده می‌شود.

۳-۱- تاریخچه‌ای از الگوریتم‌های ژنتیک

پیشینه الگوریتم ژنتیک به سال‌های حدود ۱۹۶۰ برمی‌گردد. در دهه‌های ۵۰ و ۶۰، پژوهش‌های زیادی برای استفاده از نظریه تکامل در بهینه‌سازی مسایل مهندسی به‌طور مستقل صورت گرفت. ایده اصلی در همه این سیستم‌ها، رشد یک جمعیت از پاسخ‌های اولیه یک مساله به سمت پاسخ بهینه با الهام‌گیری از عملگرهای انتخاب طبیعی و ژنتیک بود. الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط جان هلند^{۳۱} [۱۴] در سال ۱۹۷۵ مطرح و به‌وسیله خود او و دانشجویان و همکارانش گسترش یافت. تلاش‌های او و اطرافیان در این زمینه در نهایت به نشر کتاب سازگاری در طبیعت و سیستم‌های مصنوعی^{۳۲} انجامید. پس از آن تحقیقات گسترده‌ای توسط افراد مختلف در این زمینه انجام شد و الگوریتم ژنتیک به‌صورت امروزی خود رسید. الگوریتم ژنتیک بخشی از نظریه حسابگری تکاملی^{۳۳} است که در حال حاضر به‌عنوان بخشی از هوش مصنوعی به‌سرعت در حال رشد می‌باشد.

ایده اصلی این الگوریتم در نظریه تکامل داروین نهفته است. از نظر کاربردی، الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی مسایل است که اساس آن بر انتخاب طبیعی^{۳۴} (عامل اصلی تکامل زیستی) و برخی مفاهیمی که از علم ژنتیک الهام گرفته شده‌اند، استوار است. الگوریتم‌های ژنتیک در مسایلی که فضای جستجوی بزرگی داشته باشند می‌تواند به کار گرفته شود.

۳-۲- پایه‌های زیستی الگوریتم‌های ژنتیک

در راستای فهم کامل الگوریتم ژنتیک، ابتدا بهتر است با برخی از اصطلاحات زیستی به‌کاررفته در پایه‌های نظری این الگوریتم آشنا شویم. همه موجودات زنده از واحدهای کوچکی به نام سلول تشکیل شده‌اند. هر سلول نیز به نوبه خود از مجموعه‌ای از یک یا چند کروموزوم^{۳۵} تشکیل شده است. کروموزوم‌ها رشته‌هایی از مولکول DNA هستند که در حقیقت برنامه کاری موجود زنده را در خود ذخیره می‌کنند. هر کروموزوم شامل چندین ژن^{۳۶} است، که هر ژن بلوکی از مولکول DNA است که پروتئین خاصی را کدگذاری می‌کند. به‌طور کلی می‌توان گفت که هر ژن یک خصیصه^{۳۷} از موجود زنده (مانند رنگ چشم) را کدگذاری می‌کند. بسیاری از موجودات زنده در هر سلول چندین کروموزوم دارند.

در طی تولیدمثل^{۳۸}، در اثر تقاطع^{۳۹} ژن‌ها از کروموزوم‌های والدین^{۴۰} با یکدیگر ترکیب شده تا کروموزوم جدیدی را تشکیل دهند. در طی این تغییرات، ممکن است تغییرات کوچکی در برخی از بخش‌های DNA ژنهای فرزند، به وجود آمده و فرزند دچار جهش^{۴۱} گردد. در نهایت تابع برازندگی^{۴۲} یک موجود زنده با توجه به احتمال زیستن آن برای تکثیر (زیست‌پذیری^{۴۳}) یا برحسب تابعی از تعداد فرزندان آن گونه (باروری^{۴۴}) تعیین می‌گردد.

۳-۳- الگوریتم ژنتیک ساده

الگوریتم ژنتیکی که توسط جان هلند توسعه‌یافته است، امروزه به الگوریتم ژنتیک ساده شناخته می‌شود که ساختار آن در ادامه آمده است.



شکل ۵: یک مدار نمونه [۱۷]

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{params}[], \{1;3\} \right\}, \\ \left\{ \begin{pmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0001 \\ 0010 \end{pmatrix}, \text{params}[], \{2,3;3\} \right\}, \\ \left\{ \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \text{params}[], \{2;3\} \right\}, \\ \left\{ \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}, \text{params}[], \{1;3\} \right\}, \\ \left\{ \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \text{params}[], \{3;3\} \right\}, \\ \left\{ \begin{pmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0001 \\ 0010 \end{pmatrix}, \text{params}[], \{3,1;3\} \right\}, \\ \left\{ \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{params}[], \{1;3\} \right\} \end{array} \right\}$$

شکل ۶: نمایش مدار نمونه (در شکل ۵) [۱۷]

این الگوریتم گیت‌ها را از یک مجموعه انتخاب از پیش تعریف شده انتخاب می‌کند. این گیت‌ها ممکن است پارامترهای پیوسته نامشخصی داشته باشند که الگوریتم جستجو آنها را تنظیم می‌کند و یا ممکن است ثابت (بدون پارامتر) باشند. در حالت کلی که در مورد ماتریس تبدیل هدف اطلاعات کمی در دست است، منطقی است که گیت‌ها از مجموعه‌ای جهانی انتخاب شوند. همچنین منطقی است که یک مجموعه فوق کامل که گیت‌های بیشتری نسبت به یک مجموعه جهانی دارد، انتخاب گردد. این امر برای به دست آوردن نمایش‌های فشرده‌تر مفید است، هرچند ممکن است هزینه‌بر باشد. استفاده از یک مجموعه ناکامل ممکن است زمانی که اطلاعاتی از یک تبدیل هدف در دست است، مناسب باشد.

۴-۱-۲-۳- تابع برازندگی

به منظور ارزیابی کیفیت یک مدار نامزد، ماتریس آن مدار با ماتریس هدف U مقایسه می‌شود. رابطه (۱۳) این امر را نشان می‌دهد.

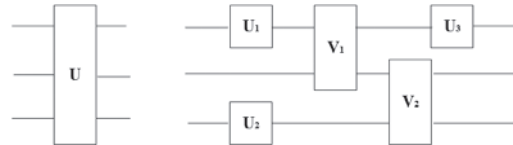
$$f(S, U) = \sum_{i=1}^{2^N} \sum_{j=1}^{2^N} |U_{ij} - S_{ij}|, S, U \in U(2^N) \quad (13)$$

f ، برازندگی یا تمایز^{۴۹} خوانده می‌شود. در این مقاله هدف یافتن مدارهایی است که تمایز بین مدارها در جمعیت و هدف را کمینه می‌کند. اگر $f=0$ باشد، مداری یافته‌ایم که U را به‌طور دقیق پیاده می‌کند، در غیر این صورت یک تقریب برای U پیدا کرده‌ایم.

۴-۱-۲-۴ عملگرهای ژنتیک

• انتخاب

انتخاب مبتنی بر رتبه صورت می‌گیرد. مدارها از یک تا N (تعداد کل مدارها در جمعیت) رتبه‌بندی می‌شوند که یک بهترین مدار را نشان می‌دهد. به هر مدار با رتبه r ، احتمالی برابر با $P(r) = ar^2 + br + c$ برای حضور در نسل بعد منتسب می‌شود. برای محاسبه مقادیر a ، b و c ، سه شرط گذاشته می‌شود. یکی این که



شکل ۴: مثالی از مدل نمایشی یک مدار کوانتومی

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود دو رابطه بین گیت‌های قرار گرفته در معادل سمت راست مدار وجود دارد: رابطه عمودی بین گیت‌ها که با ضرب تانسوری^{۴۸} مشخص می‌شود و رابطه افقی بین گیت‌ها (یا به عبارت دیگر گیت‌های قرار گرفته در کنار یکدیگر) که با ضرب ماتریسی مشخص شده و ترتیب آن وارون نمایش گیت‌ها در مدار است.

بنابراین برای معادل مداری نشان داده شده در سمت چپ می‌توان رابطه زیر را نوشت که نمایش دهنده عملکرد این مدار کوانتومی است:

$$U = (U_3 \otimes I \otimes I)(I \otimes V_2)(U_1 \otimes I \otimes U_2) \quad (12)$$

فعالیت‌های انجام شده در زمینه سنتز مدارهای کوانتومی را می‌توان به دو دسته مبتنی بر تجزیه و مبتنی بر ترکیب تقسیم کرد که فعالیت‌های مختلفی در هر بخش صورت گرفته است. در دسته نخست، با استفاده از ویژگی‌های ماتریسی مدار و گیت‌های کوانتومی و نیز تعریف گیت‌های خاص و روش‌های تجزیه آنها با توجه به روش‌های تجزیه ریاضی، ماتریس مدار موردنظر به دسته ماتریس‌های خاص که همان گیت‌های کوانتومی هستند، تجزیه می‌شود. در دسته دوم با استفاده از روش‌های جستجوی اکتشافی اقدام به یافتن مداری متشکل از کتابخانه گیت‌های موردنظر می‌شود. در این دسته از روش‌ها (که در زیر بخش‌های ۱-۲-۴، ۲-۲-۴، ۳-۲-۴ و ۴-۲-۴ و ۵-۲-۴ به پنج مورد از فعالیت‌های انجام شده از آن اشاره می‌شود)، از الگوریتم‌های تکاملی و به‌خصوص الگوریتم ژنتیک برای ساخت مداری که مشخصه موردنظر را در طول اجراهای مختلف تولید کند، استفاده می‌شود. نکته قابل توجه در مقایسه این دسته از کارها زمان مناسب برای رسیدن به جواب موردنظر است.

۴-۲-۲- سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

روش‌های مختلفی برای طراحی تکاملی مدارهای کوانتومی ارایه شده است. در روش‌های معرفی شده از GA برای سنتز مدارها بهره گرفته شده و هدف رسیدن به مشخصه موردنظر به‌طور کامل و یا با درصدی قابل قبول تفاوت، تعریف شده است. در ادامه تعدادی از روش‌های ارایه شده در [۱۷]، [۴]، [۱۹]، [۲۶] و [۲۳] معرفی و تحلیل می‌شوند.

۴-۲-۱- طراحی خودکار مدارهای کوانتومی

در [۱۷] نخستین گزارش از استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در سنتز مدارهای کوانتومی آمده است. این روش از GA با کروموزوم‌های با طول متغیر برای طراحی خودکار مدارهای کوانتومی استفاده می‌کند. در ادامه این روش مرور می‌شود.

۴-۱-۱-۲-۴ ساختار کلی الگوریتم ژنتیک

این روش از ساختار کلی الگوریتم ژنتیک ساده که در زیر بخش ۳-۳ توضیح داده شد، استفاده می‌کند.

۴-۱-۲-۲- نمایش کروموزوم‌ها

یک مدار کوانتومی نمونه (شکل ۵) و نمایش آن در شکل (۶) آمده است. هر مدار با یک ساختار داده تودرتو نشان داده می‌شود که هر عنصر مدار، نام آن و پارامتر (در صورت وجود) و سیسم‌هایی که به آن متصل است و تعداد کیوبیت‌ها (سه در این حالت) را کدگذاری می‌کند.

$$\sum_{r=1}^N P(r) = \sum_{r=1}^N ar^2 + br + c = 1 \quad (14)$$

دوم اینکه احتمال حضور مدار با کمترین رتبه در نسل بعد صفر است یعنی و وقتی r به سمت N میرود، مشتق احتمال صفر می شود که تضمین می کند مقدار احتمال به طور یکنواخت کاهش می یابد. این سه شرط مقادیر a ، b و c را به شکل رابطه (۱۵) تعیین می کنند.

$$P(r) = \frac{6N}{1-3N+2N^2} r^2 + \frac{6}{N(1-3N+2N^2)} r - \frac{12}{1-3N+2N^2} \quad (15)$$

• جهش

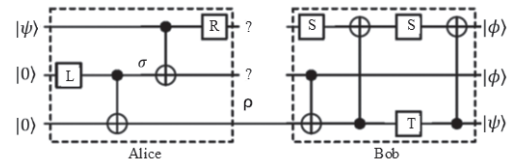
جهش به صورت تغییر اتفاقی یک گیت که به صورت یکنواخت از یک مدار تصادفی انتخاب شده است، صورت می گیرد. اگر گیتها ثابت (گیت های بدون پارامتر) باشند، ساختار گیت انتخاب شده به صورت انتخاب به صورت یکنواخت تصادفی خطهایی که این گیت روی آنها عمل می کند تغییر می کند.

• تقاطع

دو مدار والد، A و B ، در نظر گرفته می شوند. یک نقطه برش، به صورت یکنواخت تصادفی، در هر یک از دو والد انتخاب می گردد. در مدار به دست آمده از تقاطع، نخستین بخش از A ، به دومین بخش از B ، یا نخستین بخش از B ، به دومین بخش از A ، هر یک با احتمال 0.5 متصل می شود.

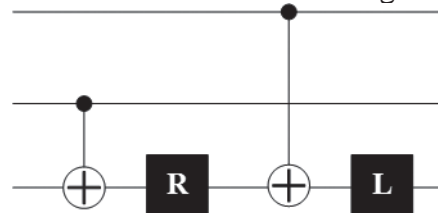
۴-۱-۵- ارزیابی

در ارزیابی روش بالا، مدارهای فرستنده و گیرنده در مخابره از راه دور کوانتومی [۱۱] در نظر گرفته شده اند. مدارهای مزبور در شکل (۷) نمایش داده شده اند.



شکل ۷: مدارهای مخابره از راه دور کوانتومی - بخش ارسال (سمت چپ) و بخش دریافت (سمت راست) [۱۷]

الگوریتم مدار ماتریس فرستنده را با یک مجموعه گیت R ، L و XOR در ۱۰ اجرای مختلف که هر اجرا به طور متوسط ۲۶،۴ نسل تولید میکشید به با یک جمعیت اولیه با اندازه ۱۰۰ به درستی سنتز کرد. همچنین این روش قادر به تولید خودکار مدار سمت گیرنده با استفاده از گیت های CNOT، R و L با چهار گیت بود. مدار سنتز شده در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: یک مدار کارا برای سنتز مدار سمت گیرنده در مخابره از راه دور کوانتومی که الگوریتم جستجو آن را پیدا کرده است [۱۷]

۴-۱-۶- جمع بندی

مقاله بررسی شده در بالا، نخستین گزارش از استفاده از الگوریتم های ژنتیک در طراحی مدارهای کوانتومی است و از این رو حایز اهمیت است. به عنوان اشکالات روش ارائه شده، می توان گفت تابع برازندگی هم ارزی تنها در صورتی مقدار تمایز صفر برمی گرداند که دو ماتریس

تولید شده توسط مدار تحت بررسی و ماتریس تبدیل داده شده به طور کامل یکسان باشند و هم ارزی فاز سراسری دو ماتریس یکانی را در نظر نمی گیرد. همچنین تابع برازندگی هزینه مدار کوانتومی را نیز در نظر نمی گیرد. ارزیابی های اعلام شده برای سنتز مدارهایی با بیشینه سه کیوبیت است، از این رو به نظر می رسد روش ارائه شده مقیاس پذیر نیست.

۴-۲-۲- یک روش تکاملی برای سنتز مدارهای برگشت پذیر و کوانتومی

در [۴، ۱۸] از الگوریتم های ژنتیک برای سنتز مدارهای برگشت پذیر و کوانتومی استفاده شده است. نمایش کروموزومها به گونه ای است که می توان هم به منظور سنتز مدارهای برگشت پذیر و هم مدارهای کوانتومی استفاده گردد. در ادامه این روش مرور می شود.

۴-۲-۱- ساختار کلی الگوریتم ژنتیک

مراحل زیر برای استفاده از الگوریتم ژنتیک برای سنتز مدارهای کوانتوم آورده شده است:

۱- تولید تصادفی جمعیت اولیه ای از افراد که در اینجا هر فرد یک مدار کوانتومی یا معکوس پذیر است. هر فرد کروموزوم کد شده ای از مدار برای ارزیابی تابع برازندگی است. اندازه جمعیت اولیه به طور معمول برابر ۵۰ تا ۵۰۰ فرد در نظر گرفته می شود. جمعیت کوچک همگرایی سریع تر را به همراه دارد در حالی که جمعیت با اندازه بیشتر فضای جواب بیشتری را بهبود جستجو می کند.

۲- گام هایی که الگوریتم ژنتیک در طی آنها جستجو را انجام می دهد نسل نامیده می شوند. عملیات جستجو هنگامی متوقف می شود که شرط تعریف شده در الگوریتم برقرار شود. این شرط به طور معمول رسیدن به تابع برازندگی بیش از حد مجاز تعیین شده و یا پایان تعداد نسل های مشخص شده در الگوریتم است.

۳- در ادامه n فرد از بین افراد انتخاب می شوند. قوانین انتخاب افراد در سرعت همگرایی عملیات جستجو تأثیر فراوانی دارد. توجه به این نکته لازم است که اگر عملگر انتخاب به طور حریصانه ای انتخاب خود را صورت دهد (یعنی تنها افراد با برازندگی بالا و بهترین آنها را انتخاب کند)، این احتمال وجود دارد که الگوریتم در دام نقطه کمینه محلی 5^0 گرفتار شود. در روش معرفی شده این قوانین بر پایه تابع برازندگی تنظیم شده اند.

۴- بر روی همه افراد جدید یک جمعیت، دو عملگر ژنتیک زیر اعمال می شوند:

• **تقاطع:** عملگری که امکان ترکیب دو فرد را با جابه جایی بخش هایی از کروموزوم های شخصی آنها می دهد.

• **جهش:** این عملگر با ایجاد نویز در الگوریتم GA از گرفتار شدن آن در مینیمم محلی جلوگیری می کند. به طور معمول این عملگر با احتمال کمی در حدود $[0.1, 0.01]$ (در مقایسه با جابه جایی با احتمال بین $[0.3, 0.85]$)، اعمال می شود و به طور تصادفی کروموزوم یک فرد تصادفی انتخاب شده را تغییر می دهد.

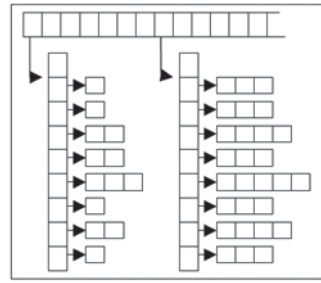
۵- افراد جدید، جایگزین افراد قدیمی در نسل گذشته می شوند.

۶- اگر پاسخ نهایی به دست آمد، از الگوریتم خارج می شویم، در غیر این صورت به شماره ۲ بازمی گردیم.

۴-۲-۲- نمایش کروموزومها

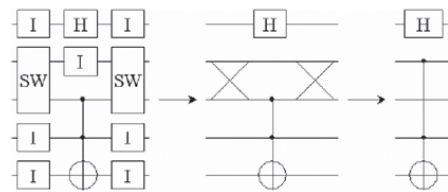
در GA بالا، افراد، مدارهای کوانتومی هستند که به بلوک های موازی تقسیم شده اند. برای کد کردن مدار از مدل نمایشی نشان داده شده در شکل (۹) استفاده شده است. در این شکل یک جمعیت متشکل از افراد نشان داده شده است. هر فرد در جمعیت شماره ای دارد و با رشته ای از اجزا نمایش داده می شود. خانه نخست در کروموزوم

تعداد ورودی/خروجی آن مدار را نشان می‌دهد و پس از آن رشته‌ای از بلوک‌های موازی می‌آیند که حاوی گیت‌ها هستند.



شکل ۹: کد کردن مدار [۴]

اندازه بلوک‌های موازی که برای نمایش مدار کوانتومی استفاده می‌شوند برابر اندازه ورودی/خروجی مدار است. کروموزوم هر فرد رشته‌ای از کاراکترها با دو نوع علامت است. برای اینکه آغاز و پایان بلوک به الگوریتم نشان داده شود لازم است نشانه‌های مخصوص و متفاوت با گیت‌ها انتخاب شود. این علامت مخصوص tag-R به اختصار r نامیده می‌شود. گیت‌ها با کاراکترها نشان داده می‌شوند و علامت هر گیت حرف نخست نام آن گیت است. شکل (۱۰) مثالی از تبدیل کروموزوم (شکل سمت چپ) به و تبدیل آن به مدل مداری (شکل سمت راست) را نشان می‌دهد. علامت H نماد گیت Hadamard W نام سیم و S نماد گیت Swap است.



شکل ۱۰: مثالی از نمایش مدار کد شده و تبدیل آن به مدل مداری [۴]

۴-۲-۲-۳- تابع برازندگی

معرفی یک تابع برازندگی مناسب تاثیر فراوانی در کیفیت الگوریتم ژنتیک و نتایج حاصل از آن دارد. مراحل تکمیل تابع برازندگی در [۴] در ادامه شرح داده می‌شود. در رابطه (۱۶) تابع اولیه برازندگی آمده است. در این رابطه Error نشان دهنده میزان صحیح بودن پاسخ به‌دست‌آمده نسبت به خروجی موردنظر است. تابع تعریف شده اگرچه فضای بزرگی از مساله را جستجو می‌کند اما بسیار عام است و هزینه مدار را در نظر نمی‌گیرد.

$$F = \frac{1}{1 + Error} \quad (16)$$

برای ارزیابی درستی مدار کوانتومی از رابطه (۱۷) استفاده می‌شود. در این رابطه نتایج ماتریس به‌دست‌آمده با ماتریس اولیه مقایسه می‌شود. عنصری از ماتریس سنتز شده را نشان می‌دهد و عنصری از ماتریس موردنظر را مشخص می‌کند. در حالتی که تطبیق کامل بین دو ماتریس صورت پذیرد در رابطه برای ارزیابی درستی عدد ۱ گزارش می‌شود.

$$Error = \sum_i \sum_j |O_{ij} - S_{ij}| \quad (17)$$

در رابطه (۱۸) تابع برازندگی کامل‌تری معرفی شده که هزینه را نیز دربر می‌گیرد. همان‌طور که دیده می‌شود دو پارامتر برای معرفی یک تابع برازندگی پیچیده‌تر و کارا تر کفایت می‌کند. در رابطه (۱۵) معادله

نخست ارزیابی درستی مدار را بر عهده دارد و معادله دوم انتخاب مدار با تعداد گیت کمتر یا هزینه کوانتومی کمتر را به عملگر انتخاب تحمیل می‌کند.

$$F = \frac{1}{1 + Error} - \frac{Min_cost}{Cost} \quad (18)$$

با وجود نتایج خوب رابطه این رابطه در مواردی با مشکل مواجه می‌شود. هنگامی که برازندگی مدار را بخواهیم در بازه [۰, ۱] اندازه بگیریم در شرایطی خاص عنصر دوم به‌کاررفته در رابطه مقدار صفر را برای تابع گزارش می‌کند درحالی که پاسخ درست به‌دست‌آمده است. برای حل این مشکل رابطه (۱۹) معرفی شده است که تابع برازندگی را به‌درستی در بازه [۰, ۱] گزارش می‌کند. در این رابطه Min_Cost مدار با کمترین هزینه ممکن فرض شده است. واضح است که در حالتی که مدار با هزینه کمتر و صحیح یافت شود تابع برازندگی کمتر از یک خواهد شد.

$$F = \frac{1}{Error + \frac{Min_cost}{cost}} \quad (19)$$

تابع برازندگی در رابطه (۱۹) بهترین مدار را (با خروجی صحیح و کمترین هزینه) هدف قرار می‌دهد. برای حل این مشکل پارامتر Min_cost حذف شده و رابطه (۲۰) به‌دست می‌آید. در این معادله پیشینه کردن تابع برازندگی مدنظر است با توجه به اینکه مقدار یک هیچگاه به‌دست نمی‌آید (Cost هیچگاه برابر صفر نمی‌شود).

$$F = \frac{1}{Error + cost} \quad (20)$$

با توجه به عدم برابری مقیاس Error و Cost در رابطه از دو پارامتر α و β برای تنظیم این مقیاس و جدا کردن دو جزء هزینه و خطا استفاده شده است. بدین ترتیب تابع برازندگی نهایی با رابطه (۲۱) مشخص می‌شود و می‌توان آن را به‌وسیله دو پارامتر α و β به ترتیب به سمت مدار با خروجی صحیح‌تر و یا مدار با هزینه کمتر هدایت کرد.

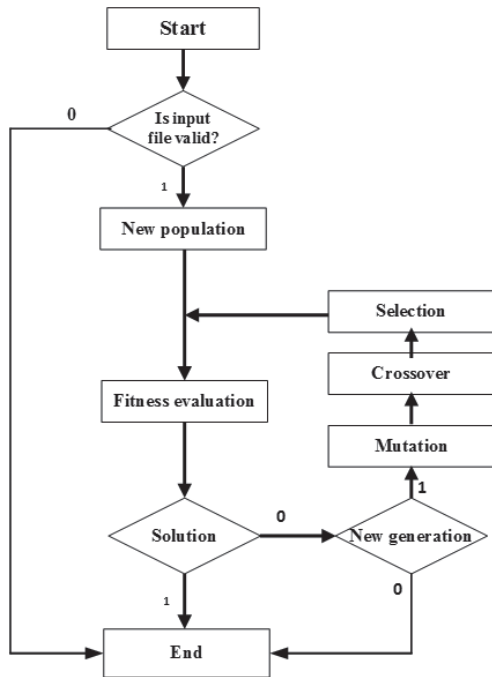
$$F = \alpha \left(1 - \frac{Error}{Error_{error}} \right) + \beta \frac{1}{Cost} \quad (21)$$

۴-۲-۲-۴- عملگرهای ژنتیک

● **انتخاب:** به‌منظور انتخاب از عملگر مشهور چرخ رولت [۱۴] استفاده می‌گردد.

● **جهش:** نتیجه یک جهش، ۱- اضافه کردن یک گیت، ۲- جایگزین کردن یک گیت با گیت دیگر، ۳- حذف گیت می‌باشد. همه این عملیات به‌غیر از عمل جایگزینی، به‌سادگی می‌توانند انجام گیرند. به‌عنوان مثال گیت Hadamard نشان داده‌شده در شکل (۱۰) را در نظر بگیرید که می‌خواهد با یک گیت CNOT جایگزین شود. در این مرحله توجه به این نکته ضروری است که تعداد خطوط بلوک باید به‌اندازه تعداد خطوط مدار حفظ شود و بنابراین بلوک جدیدی در این مرحله باید ایجاد شود. در مورد حذف گیت کافی است خطوط درگیر در آن گیت را با سیم جایگزین کنیم و برای اضافه کردن یک گیت نیز کافی است بلوک جدیدی ایجاد کنیم. نتایج عملگرهای ژنتیک در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در میانه دو والد قرار دارند که در سمت چپ آنها بچه‌های حاصل از جابه‌جایی دیده می‌شوند و در سمت راست نتایج حاصل از جهش (به ترتیب حذف گیت RG، اضافه کردن گیت AG و جایگزین کردن گیت CG) بر والد دیده می‌شود.

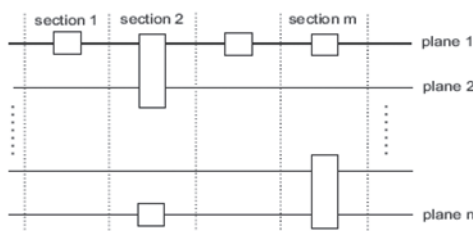
● **تقاطع:** برای بیشتر کردن سرعت جستجو، عملگر تقاطع تنها یک محدودیت دارد و این محدودیت آن است که دو نامزدی که برای



شکل ۱۳: فلوچارت الگوریتم ژنتیک [۱۹]

۴-۲-۲- نمایش مدار

در این طرح مدار به دو بخش افقی و عمودی به ترتیب با عنوان‌های section و plane (شکل ۱۴) برای نمایش مدار در الگوریتم ژنتیک، تقسیم می‌شود. در این روش برای نمایش ماتریسی گیت‌ها با توجه تنوع گیت‌های استفاده‌شده، از روش لیست در یک لیست^{۵۱} (به‌منظور اختصاص حافظه پویا) استفاده شده است.



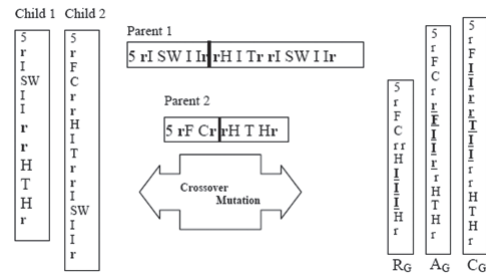
شکل ۱۴: نمایش یک مدار کوانتومی و تقسیم‌بندی آن با هدف کد کردن [۱۹]

برای کاهش زمان اجرای الگوریتم محاسبه ضربهای تانسوری در همه sectionهای یک فرد به‌صورت موازی انجام می‌گیرد و سپس ضربهای ماتریسی انجام می‌شود. یک نمونه نحوه کد کردن مدار در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این نمایش هر فرد حاوی یک یا بیشتر section و هر section حاوی یک یا بیشتر گیت خواهد بود. تعداد گیت‌ها با محاسبه تعداد کیوبیت‌های داده‌شده در ورودی مساله (با شمارش عناصر ماتریسی) تعیین می‌شود. تعداد sectionها سطح سنتز را مشخص می‌کند بدین ترتیب که الگوریتم سنتز با تعداد section زیاد گیت‌های پایه و با تعداد section کم گیت‌های پیچیده‌تر را جستجو می‌کند.

۴-۲-۳- تابع برازندگی

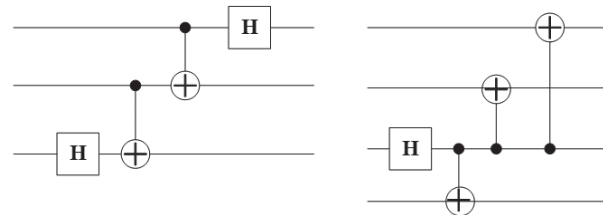
تابع برازندگی در این کار بر مبنای درصد شباهت ماتریس خروجی با ماتریس اولیه یعنی مقایسه عناصر متناظر ماتریسی در کروموزوم تولیدشده با خروجی موردنظر تعریف می‌شود. به‌عنوان مثال اگر سه عنصر از چهار عنصر در کروموزوم با خروجی داده‌شده یکی باشد تابع برازندگی برابر ۰٫۷۵٪ خواهد شد.

تقاطع در نظر گرفته می‌شوند باید تعداد خطوط یکسانی داشته باشند. این محدودیت عملیات تقاطع را ساده می‌کند به این دلیل که از حالت‌هایی که دو مدار در نقطه نامناسبی قطع می‌شوند جلوگیری می‌کند. بدین ترتیب برای هر مدار با تعداد خط بیشتر از یک، عملیات تقاطع تنها برای بلوک‌های موازی انجام می‌شود. این کار تضمین می‌کند که فرزندان تولیدشده معتبر باشند و نیازی به الگوریتمی برای بازسازی مدار نیست. در حالتی که افراد تنها یک خط در مدار دارند، عملیات تقاطع در نقطه‌ای تصادفی در کروموزوم اجرا می‌شود.



شکل ۱۱: نمایشی از کروموزوم‌ها و عملگرهای جهش و جابه‌جایی [۴]
۴-۲-۲-۵- ارزیابی

به‌عنوان یکی از موارد ارزیابی، مدار مخابره از راه دور در این روش سنتز گشته است. شکل (۱۲) مدارهای سنتز شده در سمت فرستنده (با استفاده از پنج گیت) و گیرنده (با استفاده از چهار گیت) توسط این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: مدار مخابره از راه دور. الف. فرستنده ب. گیرنده سنتز شده [۴]

۴-۲-۲-۶- جمع‌بندی

در این مقاله یک روش خودکار برای سنتز مدارهای کوانتومی و معکوس‌پذیر ارائه شده است. به‌عنوان اشکالات روش ارائه‌شده، می‌توان گفت تابع برازندگی هم‌ارزی فاز دو ماتریس یکانی را در نظر نمی‌گیرد. همچنین چون تابع برازندگی از جمع دو مقدار مختلف (مربوط به صحت مدار و هزینه مدار) تشکیل شده، نمی‌توان تشخیص داد در چه زمان مدار ارائه‌شده به درستی یک پاسخ صحیح را نشان می‌دهد. همچنین ارزیابی‌های اعلام‌شده برای سنتز مدارهایی با حداکثر سه کیوبیت است، بنابراین به نظر می‌رسد روش ارائه شده مقیاس‌پذیر نیست.

۴-۲-۳- طراحی خودکار مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک

در [۱۹] روشی خودکار برای سنتز مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک ارائه شده است که یکی از مقالات مستخرج از رساله دکترای [۲۰] نویسنده اول است. در ادامه مروری بر روش ارائه‌شده خواهیم داشت.

۴-۲-۳-۱- ساختار کلی الگوریتم ژنتیک

شکل (۱۳)، ساختار کلی الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده در [۱۹] نشان می‌دهد.

مدارهای با چند کیوبیت، یک سری آزمایشهایی صورت گرفته و نتایج با نتایج گزارش شده در [۴] مقایسه شده‌اند. جدول (۱) نتایج مقایسه را نشان می‌دهند.

جدول ۱: نتایج اجرا [۱۹]

زمان اجرا (میانگین)	زمان اجرا (میانگین ۲۰ اجرا)	تعداد نسل‌ها	اندازه جمعیت	Pc	Pm	تعداد ورودی‌ها در هر گیت کوانتومی
<0.1sec >0.1sec	<30sec >60 sec	<50 >50	50	0.6	0.4	یک ورودی یک ورودی
<1 sec >sec 1	<30sec >sec 60	<50 >50	50	0.4	0.6	دو ورودی دو ورودی
<3 sec >sec 5	<60 sec >180sec	<50 >50	50	0.6	0.6	سه ورودی سه ورودی

۴-۳-۲-۶- جمع‌بندی

طبق نتایج گزارش شده، این روش، در زمان کوتاهی به جواب می‌رسد. به‌عنوان اشکالات روش ارائه شده، می‌توان گفت تابع برازندگی هم‌ارزی تنها در صورتی مقدار تمایز صفر برمی‌گرداند که دو ماتریس تولیدشده توسط مدار و ماتریس تبدیل داده شده به‌طور کامل یکسان باشند و هم‌ارزی فاز سراسری دو ماتریس یکانی را در نظر نمی‌گیرد. همچنین تابع برازندگی فوق، میزان شباهت به ماتریس تبدیل را در نظر نمی‌گیرد و تنها اشتراکات با آن را در محاسبه برازندگی محاسبه می‌کند. تابع برازندگی هزینه مدار کوانتومی را نیز در نظر نمی‌گیرد. گزارش‌های اعلام‌شده برای سنتز مدارهایی با حداکثر سه کیوبیت است، لذا به نظر می‌رسد روش ارائه شده مقیاس‌پذیر نیست.

۴-۲-۴- طراحی چندهدفه مدارهای کوانتومی با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک^{۵۲}

در [۲۶] از برنامه‌نویسی ژنتیک برای طراحی چندهدفه مدارهای کوانتومی استفاده می‌شود.

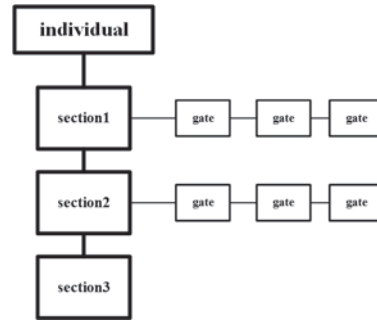
۴-۲-۴-۱- مشخصات برنامه‌نویسی ژنتیک

این مقاله، به‌منظور استفاده از GP برای طراحی مدار کوانتومی، به روشی نیاز دارد که مدارها را به‌عنوان کروموزوم‌ها معرفی کند. با این حال، از آنجاکه عملگرها (گیت) در مدارهای کوانتومی می‌تواند چندین ورودی داشته باشد، نمایش استاندارد به‌عنوان یک درخت (باینری) در اینجا به‌سختی قابل استفاده است. برخلاف مقاله [۲۷]، جایی که گره‌های داخلی ضرب را نشان می‌دهد و همه گره‌ها مربوط به گیت‌های فردی است، در این مقاله، بیشتر از درخت‌های منحنی شده^{۵۴} استفاده می‌کند که هر گره نمایانگر یک گیت جداگانه است و یک جانشین واحد دارد (به‌طوری‌که اندازه عمق درخت دست کم یکی کمتر از اندازه درخت باشد).

در هر تکرار از الگوریتم، جمعیت جدید (جمعیت کودک) از جمعیت قبلی (جمعیت والدین) ایجاد می‌شود. همان‌طور که در [۲۷]، افرادی که به‌عنوان والدین فعالیت می‌کنند بر اساس روش چرخ رولت^{۵۵} انتخاب می‌شوند. (این روش طوری عمل می‌کند که انگار یک رولت با نشانگرهای تصادفی چرخانده شده است و هر نشانگر قسمتی از رولت را که مطابق با تعداد مورد انتظار فرزندان است، در خود جای داده است). در نتیجه، تعداد فرزندان مورد انتظار برای هر فرد بر اساس رتبه آن در جمعیت است، یعنی فردی که دارای آمادگی بالایی است. فرزندان بیشتری خواهند داشت.

به‌عنوان عملگرهای ژنتیکی، این مقاله به کار می‌گیرد:

• **عملگر جهش:** یعنی نخستین گیت‌های k از یک مدار والد گرفته شده و یک مدار به‌طور تصادفی تولید می‌شود.

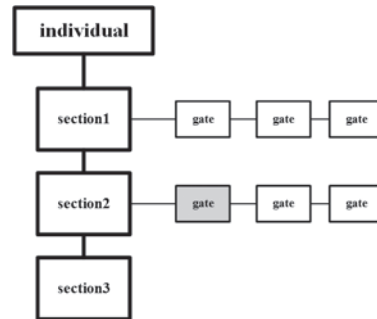


شکل ۱۵: کد کردن مدار کوانتومی برای استفاده در الگوریتم GA [۱۹]

۴-۳-۲-۴- اعمال ژنتیک

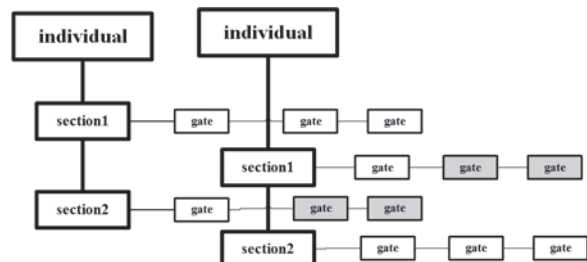
• **انتخاب:** برای انتخاب لازم است افرادی که در آن نسل همگرایی کمتری به پاسخ موردنظر داشته‌اند حذف شوند. در طرح پیشنهادی انتخاب متقابل استفاده شده بدین ترتیب که فردی که برازندگی آن کمتر از حد تعیین شده است از جمعیت حذف شده و فرد دیگری به‌طور تصادفی تولیدشده و به جمعیت اضافه می‌شود.

• **جهش:** در روش ارائه شده، به‌منظور انجام جهش، افراد به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند؛ گیتی به‌صورت تصادفی برگزیده شده و جهش بر روی آن انجام می‌شود بدین ترتیب که با گیت دیگری جایگزین می‌شود. همه گیت‌ها در پایگاه داده ذخیره شده‌اند. با توجه به اینکه در روش در پیش گرفته شده انجام چند جهش امکانپذیر است، این موقعیت وجود دارد که بر روی یک فرد جهش دیگری نیز بر مبنای احتمالات تعریف شده صورت پذیرد. عمل جهش در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۱۶: عملیات جهش [۱۹]

• **تقاطع:** در طول روند تکامل از جابه‌جایی یک اشاره‌گر^{۵۲} نشان داده شده در شکل (۱۷) استفاده شده است. دو والد به‌طور تصادفی با اشاره‌گری بر sectionهای خود انتخاب می‌شوند و از نقطه اشاره شده به بعد همه گیت‌ها با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. نتایج تقاطع برای بهبود برازندگی کروموزوم انتخاب شده استفاده می‌شود و امکان جستجوی فضای بیشتری را در مساله می‌دهد.



شکل ۱۷: عملیات تقاطع [۱۹]

۴-۳-۲-۴- ارزیابی

به‌منظور ارزیابی، ماتریس تبدیل دو مدار دو کیوبیتی و سه کیوبیتی در نظر گرفته شده و مدارهای موردنظر سنتز شده‌اند. همچنین برای

● **عملگر تقاطع:** یعنی دو مدار پدر و مادر به دو قسمت تقسیم می‌شوند و قسمت اول یک مدار با قسمت دوم دیگر ترکیب می‌شود - دو فرزند حاصل می‌شود.

علاوه بر این، از مفهوم عمق حداکثر درخت پویا [۲۸] استفاده شده است. در این روش، محدودیتی پویا بر عمق درختان مجاز در جمعیت اعمال می‌شود. در ابتدا، یعنی هنگام تولید جمعیت اولیه، مقدار کمتری تعیین می‌شود اما هر زمان که برای اسکان یک فرد جدید لازم باشد، این مقدار افزایش می‌یابد. برای تولید جمعیت اولیه، از روش Half-and-Half Ramped استفاده می‌کند، یعنی نیمی از درختان دارای حداکثر عمق کامل هستند در حالی که درختان باقیمانده دارای عمق کوچک‌تر (به‌طور تصادفی انتخاب شده) هستند.

۴-۲-۴-۲- تابع برازندگی استفاده شده

به‌منظور بررسی برازندگی از یک کروموزوم، یعنی، شباهت آن با ماتریس یکانی معین منجر به طراحی مدار می‌شود، تابع برازندگی دومرحله‌ای به‌صورت زیر استفاده شده است. در ابتدا، شباهت ماتریس U^C از هر کروموزوم C با ماتریس یکانی هدف S (با ابعاد $2^n * 2^n$) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Fitness_1 C = penalty * \sum_{i,j=1}^{2^n} |U_{ij}^C - S_{ij}| \quad (22)$$

همچنین در این مرحله از مقدار استفاده می‌شود تا اهمیت بیشتری روی دقت راه‌حل‌ها بگذارد. البته، معادله (۲۲) هم‌ارزی فاز جهانی بین عملکرد هدف و مدار به‌دست‌آمده را در نظر نمی‌گیرد. به‌منظور ارزیابی این، مقاله محاسبه می‌کند:

$$Correctness(C) = |tr(S^+ U^C)| * 2^{-n} \quad (23)$$

که در آن tr به معنی عملگر ردیابی^{۵۶} است و S^+ نشان‌دهنده ترانزاده مزدوج^{۵۷}، یعنی ضرب معکوس S است. اگر S و U^C فقط با یک فاکتور فاز پیچیده متفاوت هستند، $S^+ U^C = \phi I$ برای برخی عددهای پیچیده ϕ با $|\phi| = 1$ است. در نتیجه $|tr(S^+ U^C)| = |2^n \phi|$ ، به‌طوری که رابطه (۲۳) در این مورد به ۱ ارزیابی می‌کند. بنابراین، اگر معادله (۲۲) برابر با صفر یا معادله ۲ باشد یا معادله (۲۳) برابر با یک باشد، آنگاه کروموزوم عملکرد مطلوب را تشخیص می‌دهد و در مرحله بعدی سایر معیارهای بهینه‌سازی هزینه کوانتومی، عمق مدار و هزینه نزدیک‌ترین همسایه در نظر گرفته می‌شود:

$$Fitness_2 C = 1 + k_1 * QuantumCost(C) + k_2 * Gates(C) + k_3 * NNCost(C) \quad (24)$$

در اینجا ضرایب k_1 ، k_2 و k_3 با توجه به اهمیت متریک هزینه مربوطه می‌توانند مقادیر دلخواه بین صفر و یک داشته باشند. هنگامی که هزینه کوانتومی (QC) در ابتدا بر اساس تحقق محاسبات از نظر کتابخانه گیت NCV (متشکل از گیت‌های NOT، CNOT و V- کنترل شده) محاسبه می‌شود و فقط برای مدارهای برگشت‌پذیر مناسب است، امروزه سایر معیارها برای مدارهای کوانتومی مهمتر شده‌اند، به‌عنوان مثال T-count یا T-depth. اینها بر اساس این فرض است که مدارهای در کتابخانه کلیفورده $T +$ تحمل خطا^{۵۸} تحقق می‌یابند که در آن هزینه بالای گیت‌های T بر هزینه کل اجرا حاکم است. در مقابل، تعداد گیت^{۵۹} خالص (GC) (که به‌ظاهر از تحقق‌های مدار مرسوم الهام گرفته شده است) از اهمیت زیادی برای مدارهای کوانتومی برخوردار نیست زیرا زمان اجرای گیت‌های جداگانه می‌تواند تفاوت زیادی داشته باشد. هزینه نزدیک‌ترین همسایه این واقعیت را نشان می‌دهد که عملیات چندکیوبیتی (به‌عنوان مثال یک CNOT) به‌طور معمول فقط می‌تواند در کیوبیت‌های فیزیکی مجاور اعمال

شود. چنین محدودیت‌های توپولوژیکی (به‌اصطلاح محدودیت‌های نزدیک‌ترین همسایه) در حال حاضر به‌طور کلی برای کلیه فناوری‌های مورد بررسی برای محاسبات کوانتومی اعمال شود.

۴-۲-۴-۳- ارزیابی

این روش با استفاده از نرم‌افزار متلب و جعبه‌ابزار GPLAB برای برنامه‌نویسی ژنتیکی که توسط سیلوا ایجاد شده است [۲۹]، پیاده‌سازی شده است. برای داشتن یک مبنای اولیه برای مقایسه، در این مقاله روش پیشنهادی خود را بر روی برخی مدارهای از ۳ تا ۵ کیوبیت اعمال کرده است. ضرایب k_1 ، k_2 ، k_3 در رابطه (۲۴) به ترتیب، ۰.۸، ۰.۶ و ۰.۴ تنظیم شده‌اند تا بتواند تمرکز اصلی را بر هزینه کوانتومی بگذارد و در عین حال با در نظر گرفتن تعداد گیت و هزینه نزدیک‌ترین همسایه نیز به روشی معقول بپردازد. با تعداد جمعیت ۵۰ نفر شروع کرده و در صورت پیدا نشدن راه‌حل رضایت‌بخش، اندازه جمعیت را تا ۵۰۰ نفر افزایش داده است.

جدول ۲: ارزیابی اولیه [۲۶]

تابع محک	روش [۲۷] روش		روش [۳۰] روش		روش ارایه‌شده	
	GC	QC	GC	QC	GC	QC
3-17	5	11	6	12	3	10
4-49	12	28	14	28	9	26
Hwb5	24	102	38	80	30	80
nth_prime4_inc	11	26	14	26	8	24
nth_prime5_inc	28	96	29	91	24	82
4b15g_3	14	33	15	33	14	33

نتایج این مقاله با نتایج مربوطه از مقاله [۲۷] و کتابخانه معیار ماسلوف [۳۰] مقایسه شده است، اما این مقاله، برای همه معیارها نتایج بسیار مشابهی به دست آورده است. توجه داشته باشید که برای ایجاد یک مقایسه منصفانه، از یک پس پردازش^{۶۰} برای شناسایی گروه‌های خاصی از گیت‌های CNOT دو کیوبیتی و گیت‌های CNOT یک کیوبیتی استفاده شده است که می‌تواند به‌عنوان یک گیت منفرد (به‌اصطلاح گیت‌های پرز^{۶۱} شناخته می‌شود) و در نتیجه منجر به مقادیر کمی برای تعداد گیت و هزینه کوانتومی می‌شود. نتایج به‌روشنی نشان می‌دهد که این روش پیشنهادی قادر به رقابت با کارهای قبلی است.

۴-۲-۴-۴- جمع‌بندی

در این مقاله، یک روش طراحی چندهدفه را برای مدارهای کوانتومی بر اساس برنامه‌نویسی ژنتیک پیشنهاد شده است. برخلاف کار قبلی، تمرکز زیادی بر جنبه‌های مربوط به کوانتوم مانند هم‌ارزی فاز جهانی و معیارهای مناسب‌تر هزینه می‌گذارد که این امکان را می‌دهد که محدودیت‌های فناوری مانند محدودیت‌های نزدیک‌ترین همسایه در نظر گرفته شود. نوآوری دیگر این روش استفاده از عملکرد برازندگی دومرحله‌ای است که در مرحله نخست، صحت مدار ارزیابی می‌شود. سپس، معیارهای هزینه کوانتوم، عمق مدار، هزینه‌های نزدیک‌ترین همسایه در نظر گرفته شده‌اند. هرچند، در نتایج، تنها هزینه کوانتومی گزارش شده است و نتایجی از در نظر گرفتن اهدافی دیگر مانند عمق، هزینه همسایه مجاور و غیره گزارش نشده است و برای تعداد کیوبیت تا حداکثر ۵ کیوبیت نتایج گزارش شده‌اند که به نظر می‌رسد این روش فاقد امکان مقیاس‌پذیری است.

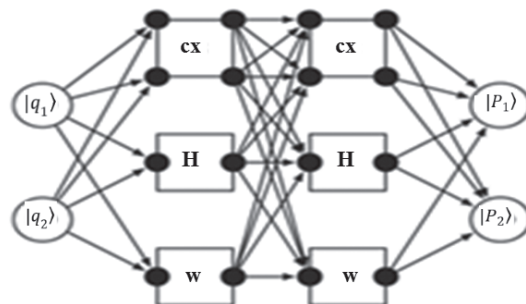
۴-۲-۵- طراحی خودکار مدارهای کوانتومی با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام^{۶۴}

در [۲۳] از برنامه‌نویسی مورچگان^{۶۳} برای طراحی خودکار مدارهای کوانتومی استفاده می‌شود. در ادامه این روش مرور می‌شود.

۴-۲-۵-۱- برنامه‌نویسی مورچگان کوانتومی^{۶۴}

در این نوع برنامه‌نویسی، مورچه‌ها مسیریابی را از داخل یک گراف انتخاب می‌کنند و تشکیل یک زیر گراف می‌دهند. این زیر گراف نمایشگر یک مدار کوانتومی است.

برای مثال، شکل (۱۸) یک گراف را نمایش می‌دهد که از QAP برای اکتشاف استفاده می‌شود. یک مجموعه از مورچه‌ها از سمت چپ گراف شروع به حرکت می‌کنند و به سمت راست می‌روند. هر مورچه نمایشگر یک کیوبیت است و این مورچه‌ها با انتخاب یال‌های متناظر با سیم‌های از مدار کوانتومی هستند، یک مدار را ایجاد می‌کنند. وقتی که مورچه از یک گیت یک کیوبیتی عبور می‌کند کیوبیت مربوطه توسط آن گیت تغییر می‌کند. هنگامی که چندین مورچه از یک گیت n کیوبیتی عبور می‌کنند کیوبیت‌های مربوطه توسط آن گیت تغییر می‌کنند. اگر تعداد ناکافی مورچه از یک گیت n کیوبیتی عبور کنند، آنگاه پس هر مورچه را به صورت یک عبوری از یک سیم، در نظر گرفته می‌شود و گیت به‌طور مؤثر نادیده می‌شود.

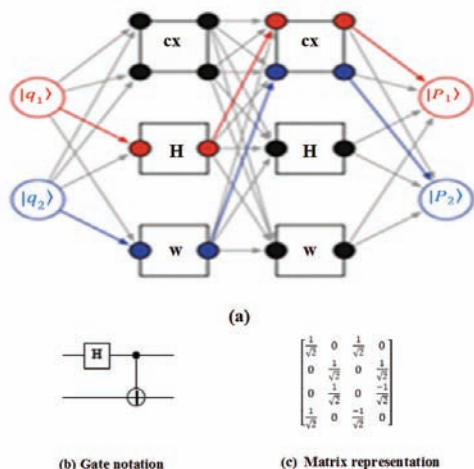


شکل ۱۸: یک مثال برای QAP (تولید مدار ۲ کیوبیتی با عمق بیشینه ۲) [۲۳]

تیمی از مورچه‌ها به‌طور اتحاد به سمت راست حرکت می‌کنند. مورچه اول مکان بعدی خود را انتخاب می‌کند و سپس مورچه دوم و غیره. هر دو مورچه نمی‌توانند از همان مکان بازدید کنند. این محدودیت تضمین می‌کند که مدار کوانتومی ساخته شده دارای تعداد ثابت کیوبیت می‌باشد. برای مقابله با محدودیت‌هایی که ممکن است در مسیریابی ایجاد شده وجود داشته باشد، اولویتها به‌طور تصادفی قبل از تولید مدار به مورچه‌ها اختصاص داده می‌شوند که مورچه‌ها مکان بعدی خود را به ترتیب اولویت انتخاب می‌کنند. برخلاف رفتار سنتی مورچه‌ها، مورچه‌ها مقادیر فرمون^{۶۵} را به اشتراک نمی‌گذارند. هر مورچه به‌طور مؤثر روی نمودار خود حرکت می‌کند. این بدان معناست که اگر مورچه‌ای از گره ناشناخته‌ای بازدید کند، نسبت به حرکاتی که مورچه دیگر در آن گره انجام می‌دهد، اعتراض نمی‌کند. دلیل این فرار از رویکرد سنتی این است که از آنجا که ممکن است هر مورچه (کیوبیت) عملکرد متفاوتی را انجام دهد، چنین تمایل به احتمال زیاد بی‌فایده است.

یک مثال از مدار تولید شده و نمایش فضای هیلبرت آن، در شکل (۱۹) نشان داده است. این شکل مسیریابی را نشان می‌دهد که توسط یک جفت مورچه تولید یک مدار دو کیوبیتی برای اجرای ژنراتور Bell-Pair انجام می‌شود که نخستین مسیر کیوبیت به رنگ قرمز و مسیر کیوبیتی دوم به رنگ آبی ارابه می‌شود. یال‌های بلااستفاده به رنگ خاکستری است.

در هر تکرار، مدارهای مختلفی تولید و ارزیابی می‌شوند. قبل از انتقال به تکرار بعدی، به‌روزرسانی فرمون انجام می‌شود. این عمل به‌روزرسانی، یک دنباله فرمون بر روی تمام یال‌های قرار گرفته در مجموعه‌ی مسیره‌ها، قرار می‌دهد.



شکل ۱۹: (a) مسیرهای انتخاب شده توسط مجموعه مورچه‌ها در شکل ۱۸- (b) مدار کوانتومی مربوطه شرح داده شده و (c) نمایش ماتریس راه‌حل. (شکل رنگی آنلاین) [۲۳]

فرمون P_e یک یال e به شرح زیر است:

$$p_e = p_e + \alpha \cdot f \quad (25)$$

که در آن α نرخ یادگیری است و f تابع پرازندگی مربوط به مجموعه‌ای از مسیره‌ها است. مسیره‌هایی که واقعاً در به‌روزرسانی فرمون نقش دارند با توابع elitism و pseudo-elitism که در بخش بعدی شرح داده می‌شود، کنترل می‌شوند. به‌عنوان بخشی از به‌روزرسانی فرمون، سطوح فرمون در یال‌های استفاده نشده با استفاده از نرخ ناپدید شدن کاهش می‌یابد. برای هر یال e ، سطح فرمون به‌صورت زیر به‌روز می‌شود:

$$p_e = (1 - \epsilon) \cdot p_e \quad (26)$$

استراتژی MAX-MIN نیز با حداقل سطوح مختلف فرمون استفاده شده است. حداکثر سطح فرمون توسط پارامتر محدود می‌شود، و حداقل سطح فرمون مطابق فرمول تغییر می‌کند:

$$p_{min} = p_{mid} + p_{var} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (27)$$

که در آن P_{mid} نقطه میانی است (وقتی $\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$)، P_{var} حداکثر تغییرات منفی یا مثبت در است، i تکرار جاری است و l یک پارامتر است که با توجه به سرعت P_{min} مطابق l تغییر می‌کند.

● **Elitism و Pseudo-elitism:** OAP از هر دو elitism و Pseudo-elitism استفاده می‌کند. رویکرد elitist فرمون‌ها را در بهترین مسیره‌های موجود اخیر را با نرخ یادگیری α قرار می‌دهد. همچنین با قرار دادن فرمون برای مجموعه مسیره‌هایی که از نظر مقدار برازندگی به مسیر elite نزدیک هستند، تغییر ایجاد می‌شود.

پارامتر Pseudo-elitism، β ، توضیح می‌دهد که چقدر باید مقدار برازندگی یک راه‌حل به بهترین راه‌حل موجود در مسیره‌های مؤلفه آن با فرمون به‌روز شود. به‌طور خاص، اگر تابع برازندگی بهترین راه‌حل اخیر پیدا شده باشد، و f تابع برازندگی یک راه‌حل باشد، راه‌حل کاندید فقط به سطوح فرمون کمک می‌کند اگر:

$$f \geq f_{el} - \beta$$

● **گیت‌های کنترل:** این مقاله، یک مورد خاص را برای توابع قابل کنترل ایجاد می‌کند. اگر یک تابع n -کیوبیتی به نام f در مجموعه توابع F به‌عنوان تابع کنترل‌کننده ذکر شده باشد، آنگاه در ستون به‌عنوان یک گیت $n+1$ کیوبیتی قرار دارد که یکی از ورودی‌های آن به‌طور خاص با کیوبیت کنترل مطابقت دارد. وقتی از تابع f و کیوبیت کنترل استفاده می‌شود، آنگاه به‌عنوان نسخه کنترل‌شده f استفاده می‌شود. با این حال، اگر فقط از f استفاده شود، تابع f به‌صورت نرمال در نظر گرفته می‌شود، نه به‌صورت یکانی (یعنی اگر فرم کنترل شده f به‌صورت تابع خودش در نظر گرفته شده باشد).

● پارامترها

برنامه‌نویسی مورچگان کوانتومی دارای پارامترهای زیر می‌باشد:

- a : تعداد تیم‌های مورچگان (مدارها) در هر تکرار

- P_{mid} : نقطه میانی از تغییرات

- l : سرعت تغییرات باگذشت زمان

- P_{Max} : بیشینه سطح فرمون

- α : نرخ یادگیری

- ϵ : نرخ ناپدید شدن

- B : میزان برازندگی مدار می‌تواند از برازندگی راه‌حل elite برای واجد شرایط بودن Pseudo-elitism منحرف شود.

یک پارامتر اضافی، گراف واقعی است که برنامه‌نویسی مورچگان کوانتومی را بررسی می‌کند. برای یک مساله n -کیوبیتی با مجموعه توابع F داده‌شده، این مقاله، از ستون‌های به تعداد $10 * (n-1)$ استفاده می‌کند. ستون‌های انفرادی به‌گونه‌ای ساخته شده‌اند که هر تابع به همان اندازه که ممکن است استفاده شود اتفاق می‌افتد. در بدترین حالت برابر با n بار برای هر تابع است که هر تابع یک عملگر تک کیوبیتی است. از این رو، ستون‌های این روش حاوی $O(|F| * n)$ گره است. با معرفی کردن گراف از این طریق، فضای جستجوی این روش با توجه به توانایی آن در توصیف مدارهای دلخواه بر روی تابعی که تا حد اکثر عمق داده‌شده که توسط تعداد ستون‌ها تنظیم شده، کامل است.

۴-۲-۵-۲-۴ - برنامه‌نویسی کوانتومی تصادفی^{۶۶}

این مقاله با یک مورد خاص از رویکرد خود مقایسه می‌کند که میزان یادگیری α به صفر تنظیم شده است. این قضیه تضمین می‌کند که هیچ یادگیری رخ نمی‌دهد و بنابراین هر مجموعه ممکن از مسیرها با احتمال یکنواخت در دسترس است. در این نمونه که از آن به‌عنوان برنامه‌نویسی کوانتومی تصادفی یاد می‌کند، بنابراین جستجوی تصادفی را در فضای مدارها انجام می‌دهد.

۴-۳-۵-۲-۴ - تابع برازندگی یک مدار کوانتومی: میانگین مربع وفاداری^{۶۷}

برای هدایت هر گونه جستجوی فراشناختی در فضای مدارهای کوانتومی، اندازه‌گیری صحت^{۶۸} لازم است. برای نقشه‌های واحد می‌توان از اندازه‌گیری وفاداری به‌عنوان یک مقدار عددی واقعی برای نزدیکی دو حالت کوانتومی استفاده کرد. برای دو ماتریس چگالی ρ و σ ، تابع وفاداری به شرح زیر است:

$$F(\rho, \sigma) = \text{tr} \sqrt{\rho^{1/2} \sigma \rho^{1/2}} \quad (29)$$

در این حالت، $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ و $\sigma = |\phi\rangle\langle\phi|$ ماتریس‌های چگالی از حالت‌های بردار $|\psi\rangle$ ، $|\phi\rangle$ به ترتیب، هستند. جایی که $|\psi\rangle$ و $|\phi\rangle$ رفت و آمد دارند و در همان پایه مورب هستند. پس رابطه‌ی وفاداری می‌شود:

$$F(\rho, \sigma) = \sqrt{|\langle\psi|\phi\rangle|} = \sqrt{|\langle\psi|\phi\rangle|^2} = |\langle\psi|\phi\rangle| = \|\psi\|^\dagger \|\phi\| \quad (30)$$

وقتی رابطه $F(\rho, \sigma) = 1$ می‌باشد، تشخیص $|\psi\rangle$ و $|\phi\rangle$ در هر پایه ناممکن است. در زمینه برازندگی برای ماورای ریاضی، این مقاله یک تابع برازندگی مبتنی بر مثال، میانگین مربع وفاداری \equiv را طراحی کرده است.

مدارها در برابر مجموعه‌ی داده (X, Y) که متشکل از مجموعه‌ای از n ورودی $X = \{|X_1\rangle|X_2\rangle \dots |X_n\rangle\}$ و n خروجی $Y = \{|Y_1\rangle|Y_2\rangle \dots |Y_n\rangle\}$ هدف متناظر است، یاد می‌گیرند. فرض کنید A یک ماتریس به نمایندگی از مقداری مدارها در برابر مجموعه‌ی داده (X, Y) باشد، آنگاه میانگین مربع وفاداری به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSF(A, X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^{|X|} F(|y_i\rangle, A|x_i\rangle)^2}{|X|} \quad (31)$$

حاصل میانگین مربع وفاداری بین خروجی هدف و خروجی‌های تولیدشده توسط مدار می‌باشد. خاصیت جذاب از وفاداری به‌عنوان معیاری از درستی، این است که فاز را به‌طور موثر نادیده می‌گیرد؛ مرحله جهانی می‌تواند به‌صورت جزئی اصلاح شود اما نادیده گرفتن این واقعیت، معیار گمراه‌کننده برازندگی است. به‌عنوان مثال، معیار برازندگی به‌صورت زیر در نظر می‌گیرد:

$$f(A, X, Y) = \sum_{i=1}^{|X|} \||y_i\rangle - A|x_i\rangle\| \quad (32)$$

مقدار یک ورودی و خروجی را در نظر بگیرید: $|x_1\rangle = [1 \ 0]^T$ و $|y_1\rangle = [0 \ 1]^T$ آنگاه مدار داوطلب A یک راه حل $A|x_0\rangle = [0 \ -1]^T$ را تولید می‌کند.

$$A|x_0\rangle = -1|y_0\rangle \quad (33)$$

به‌طور تجربی، آنها تا فاز غیرقابل کنترل باهم یکسان هستند. به‌عنوان نتیجه، A باید یک نمره مناسبی برای تابع برازندگی دارد. بدترین حالت تابع برازندگی به‌صورت زیر است:

$$f(A, \{|x_1\rangle\}, \{|y_1\rangle\}) = \|| [0 \ 2]^T \|| = 2 \quad (34)$$

در مقابل MSF نشان می‌دهد که ماتریس A یک راه‌حل مناسبی است.

$$MSF(A, \{|x_1\rangle\}, \{|y_1\rangle\}) = \frac{F(|y_1\rangle, A|x_1\rangle)^2}{1} = 1 \quad (35)$$

۴-۲-۵-۴ - آزمایش‌ها

در این بخش، ارزیابی تجربی رویکرد پیشنهادی این مقاله در مجموعه معیار را که در جدول (۳) ذکر شده است، توصیف می‌شوند. برای هر مساله معیار، هر الگوریتم جستجو را ۱۰۰ بار اجرا می‌کند، به آنها امکان می‌دهد تا ۱۰۰۰۰۰۰ ارزیابی‌های مدار را انجام دهند یا زمانی که یک راه‌حل صحیح پیدا شود. یک راه‌حل صحیح \equiv ، راه‌حلی است که دارای تابع برازندگی بزرگ‌تر مساوی ۰٫۹۸، است. برای هر اجرای مستقل بهترین راه‌حل کشف‌شده را ضبط می‌کند.

پارامترهای استفاده برای QAP عبارت‌اند: $a=50$ ، $p_{mid} = \frac{0.3}{q^3}$ ، $l=50$ ، $p_{var} = \frac{0.3}{q^3}$ ، $P_{max} = 10.0$ و $\epsilon = 0.1$ و $\alpha = 1.0$. در این مقاله از این مقادیر برای الگوریتم R-QAP، به‌جز $\alpha = 0$ ، استفاده کرده است. برای مساله TP، از اجزای Bob و Alice به‌عنوان گراف‌های مجزا برای سطح فرمون خودشان، استفاده می‌کند (شکل ۲۰). برای تولید مدار نامزد، هر سه گراف به‌طور هم‌زمان نمونه‌برداری می‌شوند و هر سه زیر مدار

سطوح p_{min} متفاوت است. علاوه بر این، از آنجاکه مشکل TP بسیار عمیقتر از سایر مشکلات ۳-کیوبیتی با توجه به تعداد کل ستون‌ها (۴۰ در مقابل ۲۰) است، این مقاله هر دو نوع p_{mid} و p_{var} را به $\frac{0.3}{q^3}$ تغییر می‌دهد تا به‌طور متناوب سطح اکتشاف را کاهش دهد.

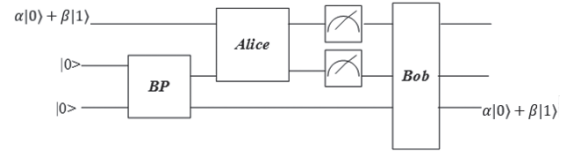
۴-۲-۵-۵- نتایج

نتایج در جدول (۴) نشان داده شده است. این مقاله نرخ موفقیت $(SR)^{۲۰}$ ، میانگین برازندگی $(MF)^{۲۱}$ ، بهترین برازندگی $(BF)^{۲۲}$ و نرخ میان چارکی $(IQR)^{۲۳}$ در برازندگی را لیست می‌کند و همچنین اختلافات آماری بین نتایج را با استفاده از آزمون tailed-two

جدول ۴: نتایج اجرای الگوریتم بر روی مسایل مختلف [۲۳]

Problem	QAP			R-QAP			P	A
	SR	MF(BF)	IQR	SR	MF(BF)	IQR		
BP	100%	1.0(1.0)	0.0	100%	1.0(1.0)	0.0	1.0	-
QFT-2	100%	1.0(1.0)	0.0	55%	1.0(1.0)	0.07	10-14	0.73
QFT-3	68%	1.0(1.0)	0.06	0%	0.69(0.81)	0.05	10-35	1.0
QFT-4	2%	0.84(0.98)	0.07	0%	0.37(0.48)	0.05	10-34	1.0
GDO-2	100%	1.0(1.0)	0.0	99%	1.0(1.0)	0.0	0.32	-
GDO-3	0%	0.67(0.85)	0.06	0%	0.67(0.68)	0.05	10-32	0.96
GDO-4	0%	0.9(0.9)	0.0	0%	0.57(0.77)	0.11	10-38	1.0
TOF	9%	1.0(1.0)	0.06	0%	0.63(0.69)	0.04	10-34	1.0
TP	57%	1.0(1.0)	0.18	0%	0.63(0.81)	0.04	10-35	1.0

تولیدشده مقادیر برازندگی‌شان را به اشتراک می‌گذارند. چون BP و آلیس مدارهای دوکیوبیتی هستند، وقتی که باب یک مدار ۳-کیوبیتی است، گراف‌های متناظرشان دارای تعداد مختلف سطر، ستون و



شکل ۲۰: یک مدار teleportation مختصر [۲۳]

جدول ۳: مسایل معیار برای الگوریتم‌های فراابتکاری^{۲۴} سنتز مدارهای کوانتومی [۲۳]

تابع ارزیابی	توصیف	مساله
MSF	Bell-Pair Generator	BP
MSF	2-Qubit Quantum Fourier Transformation	QFT-2
MSF	3-Qubit Quantum Fourier Transformation	QFT-3
MSF	4-Qubit Quantum Fourier Transformation	QFT-4
MSF	2-Qubit Grover's Diffusion Operator	GDO-2
MSF	3-Qubit Grover's Diffusion Operator	GDO-3
MSF	4-Qubit Grover's Diffusion Operator	GDO-4
MSFTP	Teleporation Circuit	TP

جدول ۵: مقایسه بین انواع روش‌های ارایه‌شده برای سنتز مدارهای کوانتومی

مرجع	سال انتشار	نوع الگوریتم	تعداد کیوبیت	معیارهای اندازه‌گیری	نکته قابل توجه
[۱۷]	۱۹۹۹	الگوریتم ژنتیک با کروموزوم‌های با طول متغیر	۳	احتمال حضور مدار با رتبه بهتر	تابع برازندگی هم‌ارزی فاز دو ماتریس یکانی را در نظر نمی‌گیرد
[۴، ۱۸]	۲۰۰۳، ۲۰۰۴	الگوریتم ژنتیک با کروموزوم‌هایی که به بلوک‌های موازی تقسیم شده‌اند	۳	هزینه مدار و هزینه خطا	تابع برازندگی هم‌ارزی فاز دو ماتریس یکانی را در نظر نمی‌گیرد
[۲۰، ۱۹]	۲۰۰۷، ۲۰۰۹	الگوریتم ژنتیک با تابع برازندگی دومرحله‌ای	۳	زمان اجرا	تابع برازندگی هم‌ارزی فاز سراسری دو ماتریس یکانی و میزان شباهت به ماتریس تبدیل را در نظر نمی‌گیرد.
[۳۳]	۲۰۱۱	الگوریتم ژنتیک موازی	۳	هزینه مدار کوانتومی و اندازه ماتریس‌ها	ماتریس کوانتومی سه‌تایی را هم بررسی می‌کند ولی تابع برازندگی هم‌ارزی فاز دو ماتریس یکانی را در نظر نمی‌گیرد.
[۳۱]	۲۰۱۴	الگوریتم ژنتیک الهام گرفته از [۳۲] برای طراحی چندهدفه مدارهای کوانتومی	۲ تا ۵	هزینه مدار کوانتومی، هزینه نزدیک‌ترین همسایه و عمق مدار	استفاده از تابع برازندگی دومرحله‌ای، در نظر گرفتن هم‌ارزی فاز سراسری عدم گزارش معیارهای عمق و نزدیک‌ترین همسایه
[۲۶]	۲۰۱۸	برنامه‌نویسی ژنتیک برای طراحی چندهدفه مدارهای کوانتومی	۳ تا ۵	تعداد گیت، هزینه، نزدیک‌ترین همسایه	استفاده از تابع برازندگی دومرحله‌ای عدم گزارش معیارهای عمق و نزدیک‌ترین همسایه
[۲۳]	۲۰۱۹	برنامه‌نویسی مورچگان کوانتومی	۴	نرخ موفقیت، میانگین برازندگی، بهترین برازندگی و نرخ میان چارکی	استفاده از تابع برازندگی میانگین مربع وفاداری

- 21 Entanglement
- 22 Unitary
- 23 Identity
- 24 Bit Flip
- 25 Phase Flip
- 26 Hadamard
- 27 Phase rotation
- 28 Controlled-NOT
- 29 Genetic Algorithms
- 30 Evolutionary algorithms
- 31 John Holland
- 32 Adaption in Natural and Artificial
- 33 Evolutionary computing
- 34 Natural selection
- 35 Chromosome
- 36 Gene
- 37 Trait
- 38 Reproduction
- 39 Crossover
- 40 Parents
- 41 Mutation
- 42 Fitness
- 43 Viability
- 44 Fertility
- 45 Population
- 46 Individual
- 47 Generation
- 48 Tensor
- 49 Discrepancy
- 50 Local minimum
- 51 List-in-a-list
- 52 One-point
- 53 Multi-objective Synthesis of Quantum Circuits Using Genetic Programming
- 54 Degenerated trees
- 55 Roulette wheel method
- 56 Trace operator
- 57 Conjugate transpose
- 58 Fault-tolerant Clifford+T library
- 59 Gate count
- 60 post-processing
- 61 Peres gates
- 62 Swarm Algorithms
- 63 Ant programming
- 64 Quantum Ant Programming(QAP)
- 65 Pheromone
- 66 Randomized Quantum Ant Programming (R-QAP)
- 67 Mean Square Fidelity(MSF)
- 68 Correctness
- 69 Metaheuristics
- 70 Success rate
- 71 Median fitness
- 72 Best fitness
- 73 Inter-quartile range
- 74 Measurmen- based quantum computation

مراجع

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, "Quantum Computation and Quantum Information," Cambridge university press, 2001.
- [2] G. Benenti, G. Casati, and G. Strini, "Principles of Quantum Computation and Information", Basic concepts :World Scientific Publishing, vol. 1, 2004.
- [3] M. Nakahara and T. Ohmi, "Quantum Computing From Linear Algebra to Physical Realizations", Taylor & Francis, 2008.
- [4] M. Lukac, M. Perkowski, H. Goi, M. Pivtoraiko, C. H. Yu, K. Chung, H. Jee, B. J. Kim, and Y. D. Kim, "Evolutionary Approach to Quantum and Reversible Circuit Synthesis", in Artificial Intelligence Review. vol. 20, pp. 361-417, 2003.
- [5] R. P. Feynman, "Simulating Physics with Computers", International Journal of Theoretical Physics, vol. 21, pp. 467-488, 1982.
- [6] D. Deutsch, "Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer", in Proceedings of the Royal Society London A, pp. 97-117, 1985.
- [7] P. W. Shor, "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring", in Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1994.
- [8] P. W. Shor, "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer", SIAM Journal on Scientific Computing, vol. 26, 1997.

« ادامه در صفحه ۲۶

U Whitney-Mann [۲۴] آزمایش می کند و در آنجا که تفاوت های معنیداری یافت می شود، برای تعیین سائز اثر از یک آزمون Vargha-Delaney [۲۵] استفاده می کند.

۴-۲-۶- جمع بندی

برنامه نویسی مورچگان کوانتومی قادر به یافتن راه حل های صحیح برای همه مسایل به جز مسایل 3-GDO و 4-GDO بود. در مقابل، R-QAP فقط قادر به یافتن راه حل های صحیح برای مسایل ۲-کیوبیتی ساده تر بود. برای هر مسالهای به جز BP و 2-GDO (که هر دو الگوریتم تقریباً همیشه راه حل های صحیحی پیدا می کنند)، آزمون Mann-Whitney U در هنگام استفاده از نرخ یادگیری غیر صفر، پیشرفت آماری معنی داری را نشان می دهد ($P < 0.05$). نتایج این مقاله برای تعداد کیوبیت تا حداکثر ۴ کیوبیت نتایج گزارش شده اند که به نظر می رسد این روش فاقد امکان مقیاس پذیری است.

۵- جمع بندی و پیشنهادهایی برای کارهای آتی

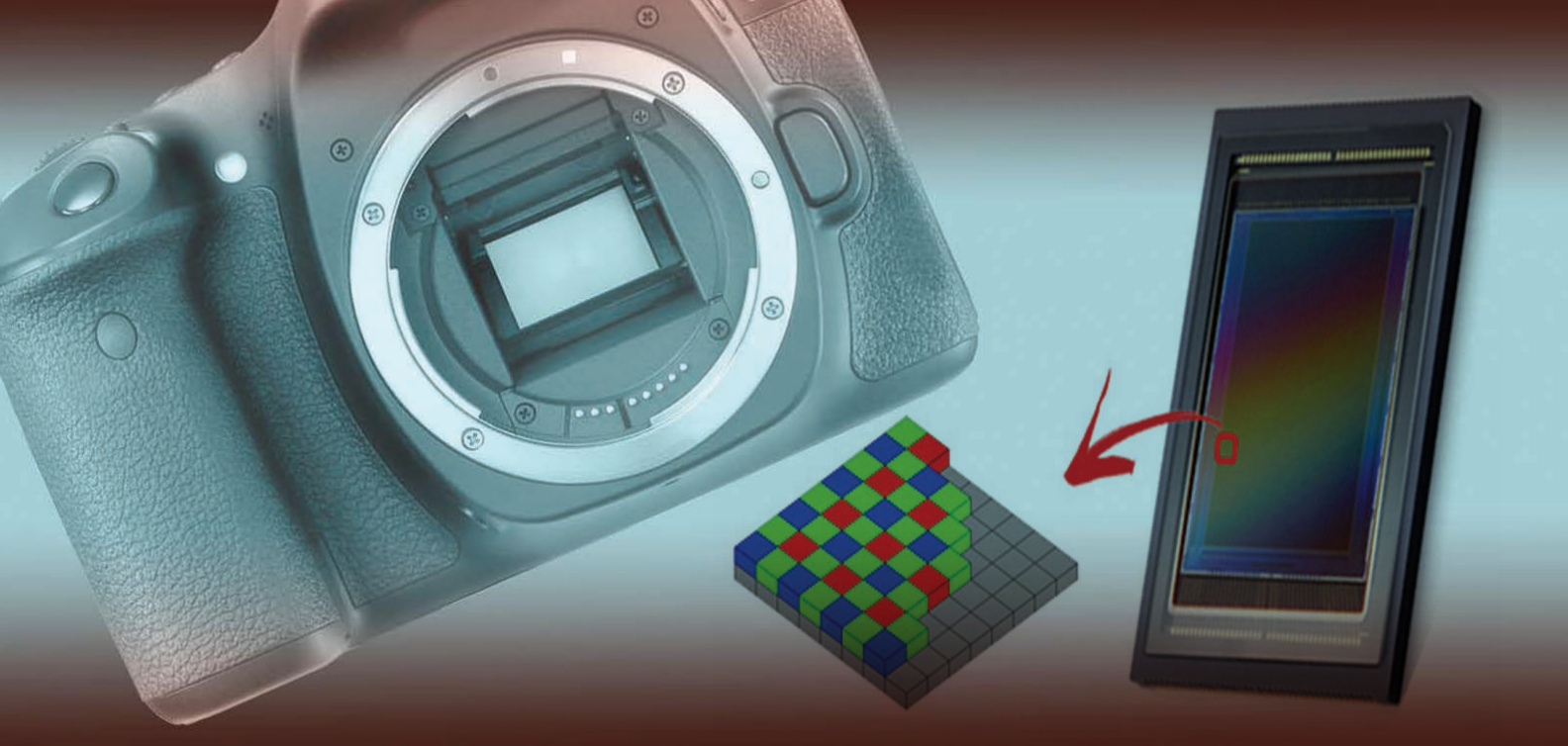
در این مطالعه، ابتدا مقدمه ای بر محاسبات کوانتومی بیان شد. سپس، مقدمه ای بر الگوریتم های ژنتیک و الگوریتم ژنتیک ساده که توسط جان هلند ارایه شده، مطرح شد. بعد، مساله سنتز مدارهای کوانتومی مورد بررسی قرار گرفت. هر ماتریس یکانی نمایش دهنده یک گیت کوانتومی است. سنتز مدارهای کوانتومی به فرایند تبدیل یک گیت کوانتومی به یک سری گیت های پایه اطلاق می شود و یک مساله سخت است. سپس روش های مختلف از الگوریتم های ژنتیک و یک روش از الگوریتم مورچگان در سنتز مدارهای کوانتومی در جدول ۵ بررسی شد. مشکلی که در تمام آن روش ها به نظر می رسد، گزارش نتایج برای تعداد کم کیوبیت و عدم مقیاس پذیری روش ها برای تعداد کیوبیت های بیشتر است.

به عنوان پیشنهاد به منظور افزایش مقیاس پذیری روش های تکاملی در حل مساله سنتز مدارهای کوانتومی، می توان این روش ها را با روش های کارا به منظور شبیه سازی مانند QuIDD [۲۱] ترکیب کرد. زیرا به منظور ارزیابی نامزدهای پاسخ، ناچار به شبیه سازی مدارهای کوانتومی هستیم.

علاوه بر مدل مداری، یک مدل دیگر و جدیدتر در حوزه محاسبات کوانتومی، محاسبات کوانتومی مبتنی بر اندازه گیری [۲۲] می باشد. این مدل امکان ذاتی موازی سازی کوانتومی بالاتری را نسبت به مدل مداری فراهم می کند. بر روی سنتز این مدل با استفاده از الگوریتم های تکاملی، تاکنون پژوهشی صورت نگرفته است. این امر نیز می تواند به عنوان یک زمینه تحقیقاتی مورد بررسی قرار گیرد.

پی نوشت ها

- 1 Feedback
- 2 Fan-out
- 3 Quantum Computation
- 4 Quantum Mechanic
- 5 Charles H. Benet
- 6 Paul A. Benioff
- 7 David Deustch
- 8 Richard P. Feyman
- 9 Moore's Law
- 10 Shor
- 11 Grover
- 12 Quantum Key Distribution
- 13 Quantum Teleportation
- 14 Dense Coding
- 15 Bra/Ket
- 16 Transpose Conjugate
- 17 Inner Product
- 18 Outer Product
- 19 Qubit
- 20 Superposition



مقاله علمی-ترویجی

اصول طراحی سنسورهای تصویر برای استفاده در دوربین‌های دیجیتال

مسعود تیموری، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، m.teymouri@uut.ac.ir

چکیده

در این مقاله ساختار کلی یک دوربین دیجیتال معرفی شده و مهمترین بخش آن که سنسور تصویر CMOS می‌باشد توضیح داده شده است. بعد از آشنایی با قسمت‌های مختلف سنسور تصویر، یک سنسور تصویر با استفاده از معماری ستون-موازی و رزولوشن یک مگاپیکسل (۱۲۸۰×۷۲۰) طراحی گردیده است. برای طراحی بلوک‌های مختلف سنسور از مدارات رایج و پرکاربرد استفاده شده است. برای آشنایی با نحوه ارزیابی سنسورهای تصویر، انواع پارامترهای مهم سنسور همراه با توضیحات در مقاله گردآوری شده است.

کلمات کلیدی: دوربین دیجیتال، سنسور تصویر CMOS، پیکسل، مبدل آنالوگ به دیجیتال.

Principles of Designing Image Sensors for Use in Digital Cameras

Masood Teymouri, Faculty of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran, m.teymouri@uut.ac.ir

Abstract

Abstract- In this paper, the overall structure of a digital camera is introduced and its most important part which is the CMOS image sensor, is explained in detail. After getting acquainted with the different parts of the image sensor, an image sensor has been designed using column-parallel architecture and a resolution of one megapixel. The most popular circuits have been used to design different blocks of the sensor. To evaluate image sensors, a variety of important sensor parameters with descriptions have been collected in the article.

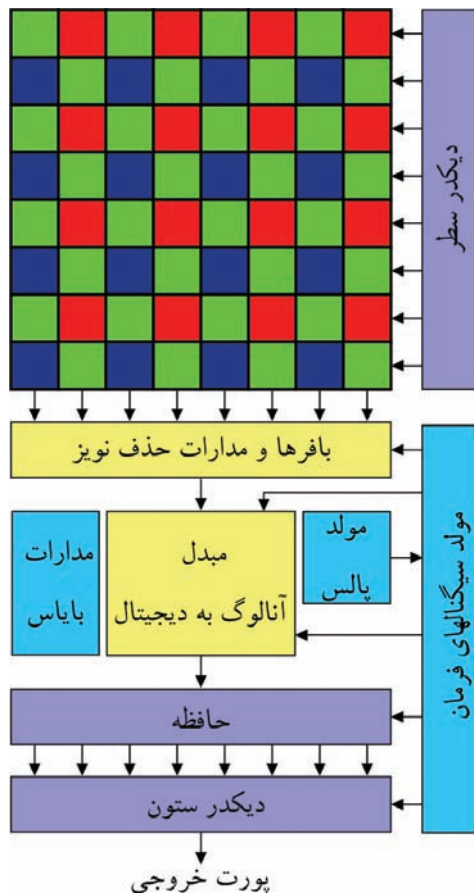
Keywords: Digital camera, CMOS image sensor, pixel, analog to digital converter

بلکه کاربردهای زیادی در ماشین‌های صنعتی، تجهیزات پزشکی، ماشین‌آلات کشاورزی، ادوات نظامی و غیره دارند. تقاضای زیادی که به دوربین در دنیا وجود دارد باعث شده است که تحقیقات فراوانی برای ارتقاء عملکرد آنها صورت پذیرد. نتیجه این تحقیقات

۱-مقدمه

دوربین‌های دیجیتال یکی از پرکاربردترین تجهیزات الکترونیکی می‌باشند که کاربردهای فراوانی در زندگی امروزی دارند. نه تنها از آنها برای عکسبرداری و فیلم‌برداری از مناظر استفاده می‌شود

خواندن سیگنال آنالوگ پیکسل‌ها، مدارات حذف نویز، مبدل‌های داده آنالوگ به دیجیتال، واحد تولید ولتاژهای مرجع، دیکدرهای سطر و ستون پیکسل‌ها، واحد کنترل و تولید پالس‌های مورد نیاز سنسور، حافظه SRAM و بخش‌های مختلف دیجیتال و غیره که دیگرام کلی آن در شکل (۲) نشان داده شده است [1-2].



شکل ۲: بلوک دیگرام سنسور تصویر CMOS

۱-۲- آشکارسازهای نوری

قطعات سیلیکونی که به‌عنوان آشکارساز نور در سنسورهای تصویر استفاده می‌شوند به گونه‌ای ساخته می‌شوند که وقتی در معرض نور قرار می‌گیرند جریانی از آنها متناسب با شدت نور رد می‌شود. با اندازه‌گیری جریان الکتریکی ایجاد شده، می‌توان شدت نور متمرکز بر روی آشکارساز را به دست آورد. این پدیده به اینصورت اتفاق می‌افتد که وقتی یک شار فوتونی به یک نیمه هادی برخورد می‌کند، اگر سطح انرژی نور تابیده شده بیشتر از سطح انرژی باند ممنوع نیمه هادی باشد مقداری از این فوتون‌ها در ماده نیمه هادی جذب شده و باعث ایجاد الکترون و حفره شده و به طبع آن موجب تولید جریان الکتریکی می‌شود. انرژی یک فوتون به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

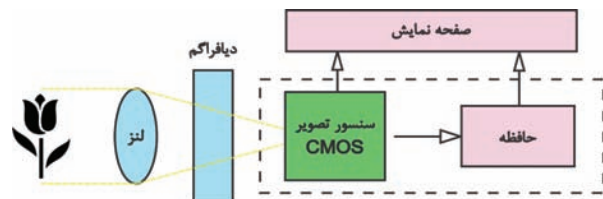
$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \geq E_g \quad (1)$$

در معادله بالا h ثابت پلانک، c سرعت نور، ν فرکانس و λ طول موج نور می‌باشد.

بخاطر این موضوع که باند انرژی نیمه هادی سیلیسیم حدود $1/1$ الکترون-ولت می‌باشد به راحتی از فرمول بالا می‌توان به این نتیجه رسید که نور با طول موج کمتر از 1100 نانومتر می‌تواند موجب تولید حامل‌های الکتریکی در این ماده گردد و همچنین می‌دانیم طول موج مرئی بین 380 تا 740 نانومتر می‌باشد پس می‌توان از عنصر

در یک قرن اخیر باعث شده که دوربین‌ها از یک وسیله دستی که در آنها برای تصویربرداری از فیلم‌های فوتوگرافی استفاده می‌شد و در نهایت عکس گرفته شده بر روی کاغذ چاپ می‌گردید به یک دوربین دیجیتال تبدیل شود که قابلیت تصویربرداری الکترونیکی داشته و بعد از پردازش تصویر در نهایت اطلاعات تصویر در یک فایل ذخیره می‌گردد. بلوک دیگرام کلی یک دوربین دیجیتال در شکل (۱) نشان داده شده است. برای ایجاد یک تصویر واضح از مناظر، از یکسری ادوات اپتیکی استفاده می‌شود. ساده‌ترین نوع آن، یک عدسی موازی‌ساز (لنز) می‌باشد که بتواند تصویر مناظر را به‌صورت واضح بر روی سنسور تصویر^۱ ایجاد کند. برای کنترل شدت روشنایی عبوری به داخل دوربین از یک دریچه قابل تنظیم که دیافراگم^۲ نام دارد استفاده می‌شود. با باز و بسته شدن دیافراگم می‌توان میزان نور رسیده به داخل بدنه دوربین را کاهش یا افزایش داد تا دوربین بتواند در محیط‌های کم نور و پر نور عکسبرداری نماید.

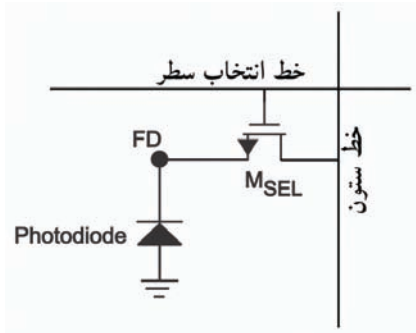
تصویر اپتیکی یک منظره، نور نقاط مختلف در یک فضای دو بعدی است که شدت روشنایی نقاط، تصویر را می‌سازد و طول موج آنها، رنگ نقاط را مشخص می‌کند. از این‌رو برای شناسایی شدت روشنایی و رنگ نقاط از سنسوری استفاده می‌شود که به سنسور تصویر^۳ معروف می‌باشد. این سنسورها قلب تپنده دوربین‌های دیجیتال می‌باشند که در بخش بعدی به‌طور مفصل در خصوص آن بحث خواهد شد. داده‌های دیجیتال تولید شده توسط سنسور تصویر، برای ذخیره‌سازی به واحد حافظه داخلی دوربین و یا یک حافظه که بیشتر به‌صورت کارت حافظه می‌باشد ارسال می‌گردد. همچنین برای نمایش تصویر گرفته شده می‌توان یک صفحه نمایش در دوربین تعبیه نمود [1].



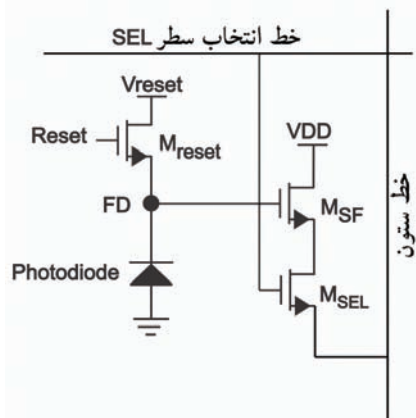
شکل ۱: بلوک دیگرام کلی یک دوربین دیجیتال

۲- سنسور تصویر

سنسور تصویر یک وسیله نیمه‌هادی است که قادر است تصویر ایجاد شده بر روی آن را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل نماید. امروزه این سنسورها توسط تکنولوژی CMOS ساخته می‌شوند چون می‌توان با استفاده از تکنولوژی CMOS علاوه بر ساختن آشکارسازهای نوری، انواع متنوعی از مدارات CMOS مورد نیاز را نیز در کنار این آشکارسازها تعبیه نمود. از این‌رو می‌توان در سنسورهای تصویر علاوه بر تولید سیگنال‌های آنالوگ متناسب با شدت روشنایی نقاط مختلف تصویر، مقادیر دیجیتال آنها را نیز تولید نمود. در این صورت می‌توان اطلاعات مربوط به شدت روشنایی نقاط مختلف تصویر را به صورت عددی تولید کرده و بر اساس هر پروتکل دلخواه به خارج از سنسور ارسال نمود. سنسورهای تصویر امروزی این توانایی را دارند که تصویر مربوطه را با وضوح بسیار بالا (در حد چندین ده مگاپیکسل) و سرعت عکسبرداری زیاد (در حد چندین صد فریم بر ثانیه) تولید کرده، نویز مربوط به مدارات را کاهش داده، توابع پردازش تصویر خاصی را بر روی اطلاعات اجرا نموده و در نهایت اطلاعات تصویر را به بیرون از تراشه ارسال نمایند. سنسورهای تصویر CMOS دارای بلوک‌های متعددی هستند که عبارتند از پیکسل‌ها^۴، آرایه پیکسل‌ها^۵، مدارات

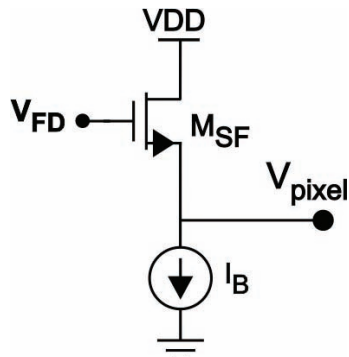


شکل ۴: شمای مداری پیکسل غیر فعال



شکل ۵: ساختار رایج پیکسل فعال نوع سه ترانزیستوری

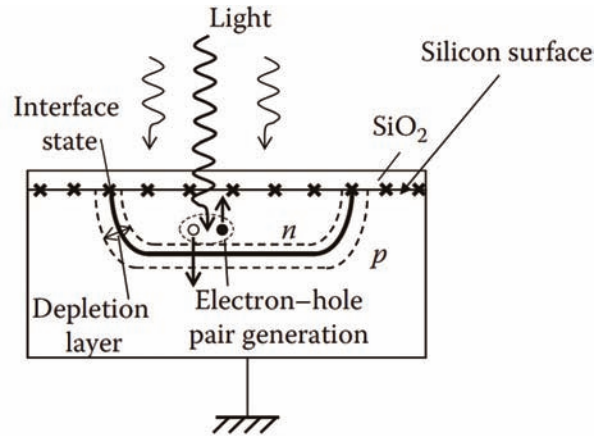
طرز کار این ساختار به این صورت می‌باشد که ابتدا با اعمال پالس Reset به ترانزیستور M_{reset} ولتاژ دو سر فوتودیود تا ولتاژ V_{reset} شارژ می‌گردد، بعد از شارژ خازن گره FD به ولتاژ ریست، ترانزیستور M_{reset} خاموش شده و خازن گره FD با جریان فوتودیود دشارژ می‌شود. این وضعیت به اندازه زمان مشخصی معروف به زمان در معرض گذاری نوری^{۱۴} (T_{EXP}) طول می‌کشد. بعد از این زمان با خواندن جریان خط ستون می‌توان شدت روشنایی تابشی بر روی پیکسل را به دست آورد. لازم به توضیح است می‌توان با اتصال یک منبع جریان به خروجی خط ستونی، جریان خط را به ولتاژ تبدیل نمود. در واقع با روشن شدن ترانزیستور M_{SEL} ، ترانزیستور M_{SF} با منبع جریان تشکیل مدار سورس-فالوور^{۱۵} را می‌دهد که ورودی آن ولتاژ فوتودیود و خروجی آن ولتاژ دو سر منبع جریان می‌باشد. مدار معادل مربوطه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶: مدار معادل پیکسل سه ترانزیستوری با اتصال به منبع جریان

۳- پیکسل دیجیتال^{۱۶}: در این ساختار، علاوه بر فوتودیود و مدار تقویت کننده، یک مبدل آنالوگ به دیجیتال^{۱۷} نیز در داخل پیکسل

سیلیسیم برای تشخیص نور مرئی استفاده نمود[3]. برای آشکارسازی نوری می‌توان از قطعات سیلیکونی مانند فوتوگیت^{۱۸}، فوتودیود^{۱۹} و پیند فوتودیود^{۲۰} استفاده نمود. به دلیل اینکه فوتودیود کاربردهای فراوانی دارد لذا در ادامه یک توضیح اجمالی در خصوص آن ارائه می‌شود. ساختار فیزیکی فوتودیود در شکل (۳) نشان داده شده است[2].



شکل ۳: ساختار فیزیکی فوتودیود از نمای جانبی[۲]

همان‌طور که دیده می‌شود فوتودیودها از یک پیوند PN ساخته می‌شوند. هنگامی که فوتودیود در معرض نور قرار می‌گیرد در ناحیه پیوند، زوج الکترون-حفره تولید می‌شود. این حامل‌ها تحت تاثیر میدان الکتریکی داخلی پیوند، جدا سازی شده و باعث ایجاد جریان می‌گردند که جریان مربوطه رابطه مستقیم با شدت روشنایی دارد. برای ساخت فوتودیود می‌توان از N^+P_{sub} یا $N_{well}P_{sub}$ استفاده نمود که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارند [4].

۲-۲- پیکسل

پیکسل‌ها کوچکترین جزء ساختاری یک تصویر می‌باشند که دست‌کم از یک آشکارساز نوری و یک مدار، به‌طور معمول به‌عنوان تقویت کننده تشکیل می‌شوند. ساختارهای مختلفی برای پیکسل‌ها معرفی شده است که مهمترین آنها به این شرح می‌باشد.

۱- ساختار پیکسل غیرفعال^{۲۱}: در این ساختار فوتودیود توسط یک سویچ به خط خروجی (خط انتخاب ستون) وصل می‌شود و توسط همان خط خروجی ریست می‌شود. توسط خط انتخاب سطر نیز، سطری که آن پیکسل در آنجا قرار دارد فعال می‌شود. به این دلیل به این پیکسل غیرفعال می‌گویند چون هیچ مدار بافری (تقویت کننده‌ای) در داخل پیکسل وجود ندارد[1]. شکل (۴) شمای مداری این پیکسل را نشان می‌دهد.

۲- پیکسل نوع فعال^{۲۲}: این پیکسل علاوه بر یک آشکارساز نوری، یک تقویت کننده جریان (بافر) نیز برای درایو خط خروجی دارد. برای ریست پیکسل، یک خط ریست در نظر گرفته شده است که با یک سویچ به آشکارساز متصل می‌باشد. بر اساس اینکه آشکارساز مورد استفاده در پیکسل فعال از نوع فوتودیود باشد یا پیند فوتودیود، می‌تواند به دو صورت سه ترانزیستوری (3T-APS) و یا چهار ترانزیستوری (4T-APS) مورد استفاده قرار گیرد. ساختار استاندارد 3T-APS^{۲۳} در شکل (۵) نشان داده شده است. در این ساختار، از ترانزیستور M_{reset} برای ریست فوتودیود، ترانزیستور M_{SF} برای تقویت کردن ولتاژ فوتودیود و M_{SEL} به‌عنوان سویچ برای اتصال پیکسل به ستون استفاده می‌شود[1].

قرار داده می‌شود. از این رو خروجی پیکسل به جای سیگنال‌های آنالوگ، داده‌های دیجیتال می‌باشد. این نوع از پیکسل در ساخت دوربین‌های با نرخ عکسبرداری بسیار زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد [1].

۲-۳- آرایه پیکسل

همان‌طور که در بخش ۱-۲ توضیح داده شد با استفاده از یک پیکسل می‌توان شدت روشنایی یک نقطه از تصویر را اندازه‌گیری کرد. بنابراین برای اینکه بتوانیم شدت روشنایی نقاط مختلف یک تصویر را اندازه‌گیری کنیم باید پیکسل‌های زیادی در نقاط مختلف به صورت منظم قرار دهیم تا بتوان نمونه‌گیری‌های مختلفی از شدت روشنایی نقاط مختلف تصویر اپتیکال ورودی انجام داد. بهترین روش چیدن پیکسل‌ها، قرار دادن آنها در سطرها و ستون‌ها بطور منظم می‌باشد همانند دریاچه‌های یک ماتریس، که نمونه آن در شکل (۷) برای یک آرایه پیکسل N سطر و M ستون دیده می‌شود.

با استفاده از شماره سطر و شماره ستون، شدت روشنایی هر نقطه از تصویر را می‌توان به دست آورد. تعداد پیکسل‌های موجود در آرایه پیکسل به نام رزولوشن معروف است که یکی از پارامترهای بسیار مهم در دوربین‌های دیجیتال می‌باشد. رنگ‌های مختلف هر پیکسل در تصویر به خاطر وجود فیلتر رنگی به نام Bayer می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان رنگ نقاط مختلف را شناسایی کرد. با سه رنگ اصلی قرمز، آبی و سبز می‌توان کد رنگ استاندارد RGB را استخراج نمود [5].

۲-۴- مدار خواندن پیکسل

همان‌طور که در بخش قبلی مشاهده کردیم پیکسل‌ها به صورت منظم در آرایه پیکسل‌ها قرار می‌گیرند. برای خواندن سیگنال پیکسل‌ها باید مداری (بافر) در داخل پیکسل و یا بیرون آرایه پیکسل تعبیه شود تا بتوان سیگنال پیکسل‌ها را استخراج نمود. به این، مدار خواندن پیکسل^{۱۸} گفته می‌شود. اگر این مدار در داخل پیکسل‌ها قرار داده شود به دلیل زیاد بودن تعداد پیکسل‌ها، تراشه^{۱۹} سنسور مساحت

سیلیکونی بسیار زیادی را اشغال خواهد کرد به همین دلیل رایج است که این مدار در خارج از آرایه پیکسل‌ها قرار داده شود و به صورت مشترک توسط همه پیکسل‌ها و یا پیکسل‌های یک ستون استفاده گردد. از طرفی برای خواندن سیگنال هر پیکسل، باید آن پیکسل توسط دیکدر سطر و ستون انتخاب شده و به مدار خواندن پیکسل متصل گردد. حال اینکه مدار خواندن پیکسل به چه صورتی پیاده‌سازی شود سه ساختار برای سنسور تصویر ایجاد می‌کند که در ادامه توضیح داده شده است.

۳- معماری‌های رایج سنسورهای تصویر

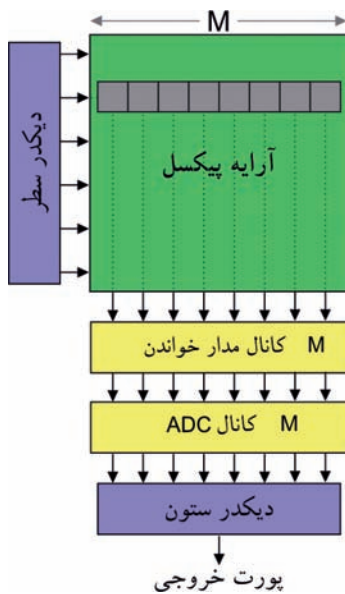
سه معماری مختلف بر اساس سه روش رایج خواندن سیگنال پیکسل‌ها وجود دارد.

۱-۳- روش سریال

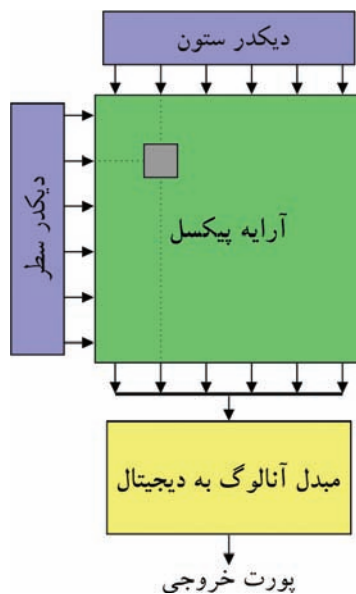
در این روش با استفاده از دیکدر سطر و ستون، در هر لحظه فقط به یک پیکسل می‌توان دسترسی داشت. به همین دلیل برای خواندن سیگنال تمامی پیکسل‌های آرایه، باید به صورت مرتب از پیکسل سطر اول و ستون اول تا پیکسل سطر N ام و ستون M ام عملیات خواندن پیکسل‌ها را انجام داد. شکل (۸) نمای ساختاری روش سریال را نشان می‌دهد [1]. این روش کمترین میزان مدار را داشته و از این رو توان مصرفی کمی داشته اما سرعت پایینی هم دارد و برای طراحی دوربین‌های کم توان اما با سرعت عکسبرداری پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳- روش ستون-موازی

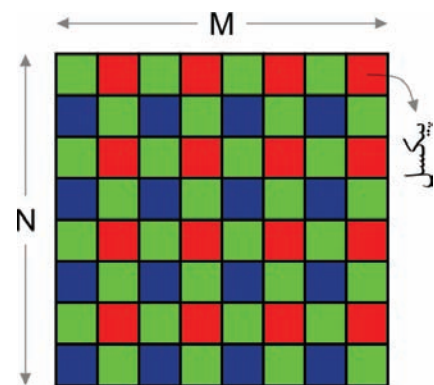
در این روش در هر لحظه از زمان می‌توان به همه پیکسل‌های موجود در یک سطر دسترسی داشت، به همین منظور فقط یک آدرس دیکدر سطر لازم می‌باشد و نیاز به خطوط اضافی آدرس به ستون‌ها نیست. نمایی از ساختار آن در شکل (۹) قابل مشاهده می‌باشد [1]. با این روش می‌توان دوربین‌های دیجیتال پر سرعت و با توان مصرفی معقول



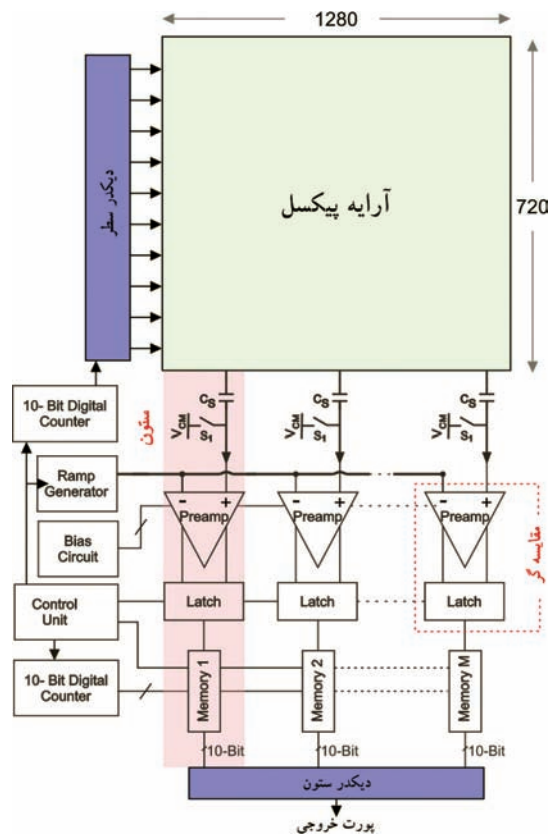
شکل ۹: معماری ستون-موازی



شکل ۸: ساختار سریال



شکل ۷: آرایه پیکسلی $N \times M$



شکل ۱۱: بلوک دیاگرام کلی سنسور تصویر طراحی شده

مشاهده می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود تمامی ستون‌ها از لحاظ مداری به‌طور کامل مشابه بوده و همگی با هم به صورت موازی کار می‌کنند. بنابراین کفایت فقط نحوه کار مبدل یک ستون را بررسی کنیم. سیگنال خروجی پیکسل‌ها به ورودی مثبت مقایسه‌گر ستون و سیگنال شیب به پایه منفی آن اعمال می‌گردد. در شروع عمل تبدیل، مولد سیگنال شیب، شمارنده ۱۰ بیتی و حافظه ستونی ۱۰ بیتی ریست می‌گردد. بنابراین ولتاژ خروجی مولد سیگنال شیب V_{CM} شده و محتوی شمارنده و حافظه پاک می‌شود. با اعمال هر پالس ساعت به مبدل، شمارنده یک واحد افزایش یافته و یک گام جدیدی به سیگنال شیب که برابر با $V_{FS}/1024$ می‌باشد اضافه می‌گردد. رنج کل مبدل داده می‌باشد. با اعمال هر گام از سیگنال شیب به مقایسه‌گر ولتاژ آن گام با ولتاژ خروجی پیکسل مقایسه می‌شود تا زمانی که $V_{ph} > V_{step}$ باشد مقدار شمارنده در حافظه ستونی مربوطه ذخیره می‌گردد اما وقتی که $V_{ph} < V_{step}$ باشد حافظه ستونی قفل شده و دیگر مقدار شمارنده در حافظه آن ستون ذخیره نمی‌گردد. حال این داده‌ی قفل شده در حافظه ستونی معادل داده دیجیتال سیگنال پیکسل آن ستون می‌باشد. بعد از طی $1024 = 2^{10}$ کلاک پالس، سیگنال آنالوگ پیکسل تمامی ستون‌ها که مربوط به یک ردیف مشخص از آن آرایه می‌باشند به دیجیتال تبدیل شده و در حافظه‌های ستونی ذخیره می‌گردند. حال با استفاده از دیکدر ستون‌ها این داده‌ها به بیرون تراشه ارسال می‌شود. توسط دیکدر سطر، پیکسل‌های ردیف بعدی فعال شده و کل عملیات خواندن سیگنال پیکسل‌ها و تبدیل به دیجیتال عین حالت قبلی اجرا می‌گردد. این کار تا زمانی که به آخرین ردیف از آرایه پیکسل برسیم انجام خواهد شد. حال کل پیکسل‌های آرایه خوانده شده به دیجیتال تبدیل شده و از تراشه نیز

طراحی نمود. بنابراین این روش رایج‌ترین معماری در سنسورهای تصویر CMOS می‌باشد [6].

۳-۳- روش پیکسل موازی

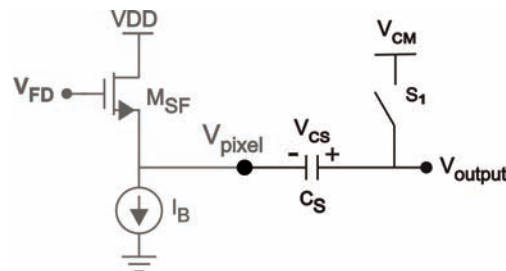
در این روش در هر لحظه از زمان، سیگنال تمامی پیکسل‌ها خوانده می‌شود. برای ساخت چنین سنسوری باید مدار خواندن پیکسل و مبدل داده در داخل هر پیکسل گذاشته شود. لذا فضای سیلیکونی بسیار زیادی را اشغال می‌کند و توان مصرفی بسیار بالای دارد. کاربرد این روش ساخت سنسورهای تصویر با سرعت عکسبرداری بسیار زیاد می‌باشد.

۴- طراحی یک سنسور تصویر

در اینجا هدف طراحی یک سنسور تصویر با استفاده از معماری ستون-موازی و بلوک‌ها و مدارات رایج در این حوزه می‌باشد. رزولوشن سنسور یک مگاپیکسل در نظر گرفته شده است بنابراین با مراجعه به استانداردهای مربوط به تصاویر، رزولوشن سنسور 1280×720 انتخاب می‌گردد. پیکسل مورد استفاده از نوع سه ترانزیستوری بوده که مدار آن در شکل (۲) نشان داده شده است. برای استخراج سیگنال پیکسل، از مدار بسیار رایج و پر کاربرد سورس-فالور استفاده خواهد شد. همان‌طور که در بخش ۲ توضیح داده شد. سیگنال پیکسل باید دو بار خوانده شود یک بار هنگام ریست پیکسل و بار دیگر بعد از زمان T_{EXP} میزان ولتاژ تغییر یافته فوتودیود به خاطر تابش نور، برابر با حاصل تفریق این دو نمونه خواهد بود.

$$V_{ph} = V_{reset} - V_{sig} \quad (2)$$

عمل تفریق می‌تواند به‌صورت دیجیتالی بعد از تبدیل نمونه‌ها به دیجیتال صورت پذیرد و یا می‌تواند به‌صورت آنالوگ اجرا گردد که روش آنالوگ بسیار رایج می‌باشد. به دلیل اینکه نویز با الگوی ثابت^{۲۱} در هر دو نمونه به یک اندازه می‌باشد بنابراین در زمان تفریق نمونه‌ها این نویز از خروجی حذف می‌شود به این مدار تفریق CDS^{22} گفته می‌شود که مدار CDS مورد استفاده در این سنسور از نوع آنالوگ بوده و در شکل (۱۰) نشان داده شده است [7-8].



شکل ۱۰: مدار CDS متصل به پیکسل

طرز کار این مدار به این صورت می‌باشد که ابتدا کلید S_1 در فاز سیگنال روشن شده بنابراین ولتاژ $V_{CS} = V_{CM} - V_{sig} - V_{gs,SF}$ در خازن C_S ذخیره می‌گردد. سپس کلید S_1 خاموش شده و بعد با ریست شدن پیکسل، ولتاژ خروجی پیکسل برابر با $V_{pixel} = V_{reset} - V_{gs,SF}$ می‌شود، لذا در این شرایط ولتاژ خروجی مدار CDS برابر خواهد بود با $V_{output} = V_{CS} + V_{pixel} = V_{CM} + V_{reset} - V_{sig}$ (۲) می‌بینیم ولتاژ خروجی برابر است با ولتاژ فوتودیود که به اندازه V_{CM} جابجا شده است.

برای تبدیل این سیگنال به داده دیجیتال از مبدل آنالوگ به دیجیتال با ساختار تک-شیب^{۲۳} که بسیار رایج می‌باشد استفاده شده است [9-11]. بلوک دیاگرام کلی سنسور تصویر طراحی شده با معماری ستون-موازی و مبدل تک-شیب در شکل (۱۱) قابل

جدول ۱: مشخصات انواع سنسور تصویر گردآوری شده در مرجع [۱۸]

مرجع	واحد	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]
اندازه پیکسل	μm	86/5	5/1	1/1	2/3	45/2
تعداد سطر	pixel	3840	19568	7728	7680	15360
تعداد ستون	pixel	2160	12588	4368	4320	8640
نرخ عکسبرداری	fps	480	5	240	120	60
توان مصرفی	mW	5230	1970	3000	3200	11050
بهره تبدیل	$\mu\text{V}/\text{e}$	30	91	92	61	80
نویز	μV_{rms}	140	319	414	317	614
اشباع	mV	923	687	524	933	800
رنج دینامیکی	dB	3/76	7/66	1/62	7/69	3/62
معیار شایستگی	$\text{e}^- \cdot \text{pJ}/\text{DRU}$	92/0	60/2	32/1	97/4	18/8

به بیرون ارسال شده است.

عکسبرداری FR^{26} : ماکزیمم تعداد عکس گرفته شده در یک ثانیه، حساسیت²⁷: نسبت تغییرات خروجی پیکسل به تغییرات شدت روشنایی دریافتی، بار اشباع²⁸: عبارت است از میزان باری که در خازن دو سر آشکارساز ذخیره می‌گردد، توان مصرفی: عبارت است از کل توان الکتریکی که سنسور مصرف می‌کند و معیار شایستگی FOM^{29} : یک شاخصی است که برای مقایسه سنسورهای تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد و با رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$Fom = \frac{\text{Power} \times \text{noise}}{M \times N \times \text{fps}} \quad (3)$$

در این رابطه M تعداد ستون آرایه، N تعداد سطر آرایه، noise میزان نویز سنسور، power کل توان مصرفی سنسور و در نهایت fps نرخ عکسبرداری می‌باشد [1,18]. برای آشنایی با مقادیر معمول برای پارامترهای معرفی شده، مشخصات تعدادی از سنسورهای تصویر که در مجلات معتبر منتشر شده است در جدول (۱) گردآوری شده است.

۶- نتیجه‌گیری

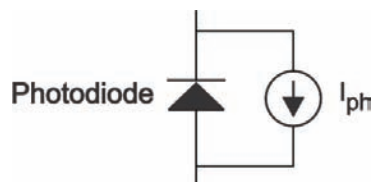
امروزه دوربین‌های دیجیتال یکی از تجهیزات مهم الکترونیکی است که به صورت گسترده در گوشی‌های موبایل، تبلت‌ها، لپ‌تاپ‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین یک زمینه بسیار مناسبی برای طراحان مدارات مجتمع جهت پژوهش می‌باشد. دوربین‌های دیجیتال دارای بخش‌های مختلفی هستند که مهمترین بخش آن سنسورهای تصویر است. برای توضیح نحوه کارکرد این سنسور ها، یک سنسور نمونه با رزولوشن 1280×720 با استفاده از مدارات رایج طراحی گردید و قسمت‌های مختلف آن از قبیل پیکسل، آرایه پیکسل، مدار خواندن پیکسل، مبدل آنالوگ به دیجیتال و دیکدرهای سطر و ستون توضیح داده شده و ساختار کلی سنسور نیز ارائه گردید.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Image sensor
- 2 Diaphragm
- 3 Image sensor
- 4 Pixel
- 5 Pixel array
- 6 Pixel readout circuit
- 7 Noise suppression circuit
- 8 Photo gate
- 9 Photodiode
- 10 Pinned photodiode
- 11 PPS: Passive pixel sensor

۵- ارزیابی سنسورهای تصویر

سنسورهای تصویر CMOS بعد از طراحی، باید شبیه‌سازی شده و بعد از تایید نتایج شبیه‌سازی به مرحله ساخت و تست آزمایشگاهی برسند. از آنجایی که امکان نوردی به فوتودیود و هر آشکارساز نوری دیگر در تحلیل کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مانند Hspice و یا Spectre وجود ندارد. بنابراین برای شبیه‌سازی فوتودیود از یک منبع جریان موازی با فوتودیود استفاده می‌شود که این منبع جریان، معادل جریان روشنایی فوتودیود می‌باشد [12]. مدار مورد استفاده در شبیه‌سازی به جای یک فوتودیود در شکل (۱۲) دیده می‌شود.



شکل ۱۲: مدل شبیه‌سازی فوتودیود

برای تحلیل پیکسل و مدار خواندن پیکسل باید خطییت، دقت و نویز آن مورد بررسی قرار گیرد که ولتاژ فوتودیود با چه دقتی و خطییتی قابل خواندن می‌باشد در این تحلیل‌ها جریان فوتودیود و یا ولتاژ دوسر فوتودیود به‌عنوان ورودی و خروجی مدار خواندن به‌عنوان خروجی مدار در نظر گرفته می‌شود. نمونه تحلیل‌های شبیه‌سازی پیکسل و مدار خواندن پیکسل در مرجع [13] ارائه شده است. همان‌طور که می‌دانیم سیگنال خروجی مدار خواندن به طبقه مبدل داده ارسال می‌گردد تا این سیگنال به داده‌های دیجیتال تبدیل شود. واضح است که از هر ساختار مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌توان در سنسور استفاده نمود و نحوه شبیه‌سازی آن نیز در مقالات فراوانی در این خصوص آورده شده است [14-17]. بعد از تحلیل کامپیوتری نوبت به ساخت تراشه و تست عملی آن می‌رسد تعدادی از مهمترین پارامترهای که بعد از رسم layout و ساخت سنسور می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد عبارت است از:

ضریب FF^{24} پیکسل: نسبت سطح سیلیکونی آشکارساز به کل سطح پیکسل، رنج دینامیکی DR^{25} : نسبت ماکزیمم شدت روشنایی قابل شناسایی به حداقل روشنایی قابل تشخیص توسط سنسور، نرخ

[9] L. K. Grover, "A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search", in Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC), (pp. 1996, 212-219).

[10] G. B. Charles, H. Bennet, "Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing", in Proceedings of IEEE International Conference on Computer System and Signal Processing New York, pp. 175-179, 1984.

[11] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, "Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels", Physical Review Letters, vol. 70, pp. 1895-1899, 1993.

[12] C. H. Bennett and S. J. Wiesner, "Communication via One- and Two-Particle Operators on Einstein-Podolsky-Rosen States", Physical Review Letters, vol. 69, pp. 2881-2884, November, 1992.

[13] A. U. Khalid, "FPGA Emulation of Quantum Circuits", vol. MS thesis: McGill University, 2005.

[14] J. H. Holland, "Adaptations in natural and artificial systems", MIT press, 1975.

[15] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning", Reading, MA Addison-Wesley, 1989.

[16] M. Mitchell, "An introduction to Genetic Algorithms", Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press, 1999.

[17] C. P. Williams and A. Gray, "Automated Design of Quantum Circuits", in Quantum Computing and Quantum Communications (QCQC, '98) Springer-Verlag, pp. 113-125, 1999.

[18] M. Lukac, M. Perkowski, H. Goi, M. Pivtoraiko, C. H. Yu, K. Chung, H. Jee, B. J. Kim, and Y. D. Kim, "Evolutionary Approach to Quantum and Reversible Circuit Synthesis", Artificial Intelligence Review, vol. 20, pp. 361-417, 2004.

[19] M. U. C. Ruican, L. Prodan, M. Vladutiu, "Automatic synthesis for quantum circuits using genetic algorithms", in ICANNGA07 International Conference on Adaptive and Natural Computing Algorithms, LNCS 4431 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (Warsaw, Poland, pp. 2007, 183-174).

[20] C. Ruican, "Developing Automatic Synthesis Methodologies For Quantum Circuits Using Genetic Algorithms", vol. PhD thesis, Politehnica University of Timisoara, Romania, 2009.

[21] G. F. Viamontes, M. Rajagopalan, I. L. Markov, and J. P. Hayes, "Gate-Level Simulation of Quantum Circuits", in Asia South Pacific Design Automation Conference, pp. 295-301, 2003.

[22] R. Jozsa, "An Introduction to Measurement Based Quantum Computation", preprint available at <http://arxiv.org/abs/quant-ph.2005.050812/>

[23] T. Atkinson, A. Karsa, J. Drake, and J. Swan, "Quantum Program Synthesis: Swarm Algorithms and Benchmarks", Springer Nature Switzerland AG 2019. L. Sekanina et al. Eds.: (EuroGP, 2019 LNCS, 11451 pp. 2019, 34-19).

[24] H. B. Mann, D. R. Whitney, "On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other", Ann. Math. Stat., (1) 18 pp. 1947, 60-50.

[25] A. Vargha, H. D. Delaney, "A critique and improvement of the CL common language effect size statistics of McGraw and Wong", J. Educ. Behav. Stat., (2) 25, pp. 2000, 132-101.

[26] M. Sarvaghad-Moghaddam, P. Niemann, and R. Drechsler, "Multi-objective Synthesis of Quantum Circuits Using Genetic Programming", Springer Nature Switzerland AG 2018, pp. 220-227, 2018.

[27] M. Y. Abubakar, L. T. Jung, N. Zakaria, A. Younes, and A. Abdel-Aty, "Reversible circuit synthesis by genetic programming using dynamic gate libraries", Quantum Inf. Process. 16(6), pp. 160, 2017.

[28] J. E. Baker, "Adaptive selection methods for genetic algorithms", International Conference on Genetic Algorithms, pp. 101-111, 1985.

[29] S. Silva, J. Almeida, "Gplab-a genetic programming toolbox for matlab", Proceedings of the Nordic MATLAB Conference (NMC-2003), pp. 273-278, 2005.

[30] D. Maslov, "Reversible logic synthesis benchmarks", <http://webhome.cs.uvic.ca/dmaslov2018/>

[31] بهاره رستمیان ملکی و مجید محمدی، طراحی با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک، "نوزدهمین کنفرانس ملی سالانه انجمن کامپیوتر ایران، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۱۳-۱۵ اسفندماه ۱۳۹۲، صفحه ۱۱۷۷-۱۱۸۲.

[32] J. R. Koza, "Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection", MIT Press, 1992.

[33] M. Lukac, M. Perkowski, & M. Kameyama, "Evolutionary quantum logic synthesis of Boolean reversible logic circuits embedded in ternary quantum space using heuristics", arXiv preprint arXiv:1107.3383, 2011.

12 APS: Active pixel sensor
 13 Four transistor APS
 14 Exposure time
 15 Source follower
 16 DSP: Digital pixel sensor
 17 Analog to digital converter
 18 Pixel signal readout circuit
 19 IC: Integrated circuit
 20 Column- parallel architecture
 21 FPN: Fixed pattern noise
 22 Correlated double sampling
 23 Single slope ADC
 24 Fill factor
 25 Dynamic range
 26 Frame rate
 27 Sensitivity
 28 Saturation charge
 29 Figure of meri

مراجع

[1] J. Nakamura, "Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras," Taylor & Francis, 2006.

[2] T. Kuroda, "Essential principles of image sensors," Boca Raton, Florida: CRC Press, 2015.

[3] S.M. Sze, "Semiconductor Devices: Physics and Technology," John Wiley & Sons, New York, 256, 1985.

[4] D. C. -Y. Li, V. C. Gaudet, A. Basu, "Test results of various CMOS image sensor pixels," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005.

[5] B. E. Bayer, "Color imaging array," US patent US3971065A, 1975.

[6] M. Teymouri, J. Sobhi, "A FHD 1080, 120 fps CMOS image sensor with two step SS-ADC," Analog Integr Circ Sig Process 99, 339-347, 2019.

[7] A. El Gamal and H. Eltoukhy, "CMOS image sensors," IEEE Circuits and Devices Magazine, vol. 21, no. 3, pp. 6-20, 2005.

[8] Y. Nitta et al., "High-Speed Digital Double Sampling with Analog CDS on Column Parallel ADC Architecture for Low-Noise Active Pixel Sensor," IEEE International Solid State Circuits Conference - Digest of Technical Papers, San Francisco, CA, 2006.

[9] J. Wei, X. Li, L. Sun and D. Li, "A 63.2μW 11-Bit Column Parallel Single-Slope ADC with Power Supply Noise Suppression for CMOS Image Sensors," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sevilla, 2020.

[10] N. Cho, B. Song, K. Kim, J. Burm and S. Han, "A VGA CMOS Image Sensor with 11-bit column parallel single-slope ADCs," International SoC Design Conference, Seoul, 2010.

[11] G. Liu, N. Yu, H. Zhang and J. He, "A Fully Differential SAR/Single-Slope ADC for CMOS Imager Sensor," IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), Xi'an, China, 2019.

[12] S. U. Ay, "Electrical property modelling of photodiode type CMOS active pixel sensor (APS)," 48th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2005.

[13] M. Teymouri, J. Sobhi, "An ultra-linear CMOS image sensor for a high-accuracy imaging system," Int J Circ Theor Appl. 2018.

[14] Y. Chae et al., "A 2.1 M Pixels, 120 Frame/s CMOS Image Sensor with Column-Parallel $\Delta\Sigma$ ADC Architecture," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 46, no. 1, pp. 236-247, Jan. 2011.

[15] M. Shin and O. Kwon, "14-bit two-step successive approximation ADC with calibration circuit for high-resolution CMOS imagers," in Electronics Letters, vol. 47, no. 14, pp. 790-791, 7 July 2011.

[16] M. Fan, J. Ren, N. Li, et al., "A 1.8-V 11-bit 40-MS/s 21-mW pipelined ADC," Analog Integr Circ Sig Process, 2010.

[17] S. Lim, J. Lee, D. Kim and G. Han, "A High-Speed CMOS Image Sensor with Column-Parallel Two-Step Single-Slope ADCs," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 56, no. 3, pp. 393-398, March 2009.

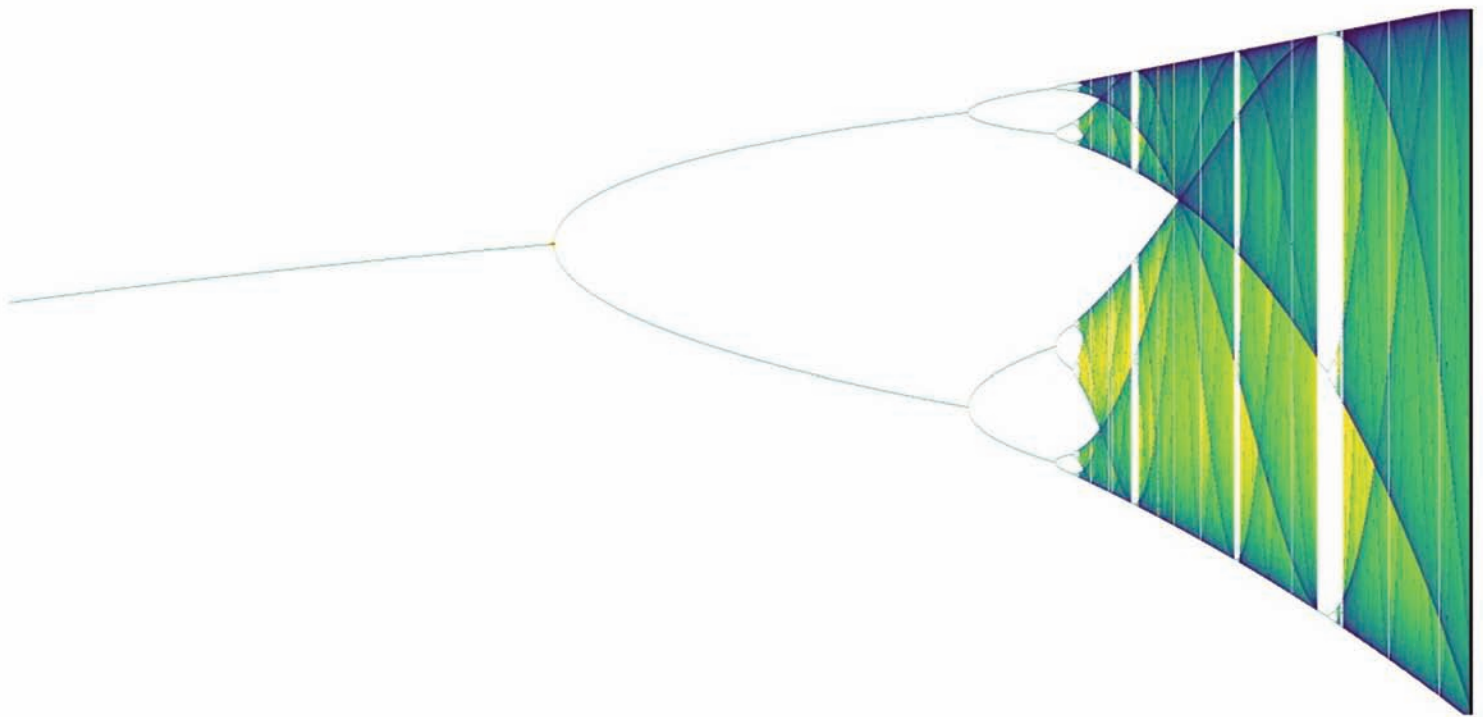
[18] Y. Oike et al., "8.3 M-Pixel 480-fps Global-Shutter CMOS Image Sensor with Gain-Adaptive Column ADCs and Chip-on-Chip Stacked Integration," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 52, no. 4, pp. 985-993, April 2017.

[19] H. Totsuka et al., "An APS-H-size 250Mpixel CMOS image sensor using column single-slope ADCs with dual-gain amplifiers," ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb. 2016.

[20] T. Arai et al., "A 1.1μm 33Mpixel 240fps 3D-stacked CMOS image sensor with 3-stage cyclic-based analog-to digital converters," ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb. 2016.

[21] T. Yasue et al., "A 14-bit, 33-Mpixel, 120-fps image sensor with DMOS capacitors in 90-nm/65-nm CMOS," Proc. Int. Image Sensor Workshop (IISW), Jun. 2015.

[22] R. Funatsu et al., "133Mpixel 60fps CMOS image sensor with 32-column shared high-speed column-parallel SAR ADCs," in ISSCC Dig. Tech. Papers, Feb. 2015.



مقاله علمی-ترویجی

طراحی و ساخت سیستم آزمایشگاهی مهره و حلقه و رسم دیاگرام انشعاب آن

■ عارف شاه منصوریان، گروه مهندسی برق کنترل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، shahmansoorian@eng.ikiu.ac.ir
 ■ مهدی فرهنگ رنجبر، گروه مهندسی برق کنترل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، mahdifarhang1374@gmail.com

چکیده

دوشاخگی (انشعاب)ها در علوم زیستی، پزشکی و صنعت کاربرد دارند. در این مقاله ابتدا به اهمیت و کاربردهای انشعاب و انواع آن پرداخته شده است. سپس به طور خاص سیستم حلقه و مهره را به دو صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی نموده، که با انجام آزمایشات تئوری و عملی نوع انشعاب آن مشخص شده است. در بحث آزمایشگاهی برای به دست آوردن دیاگرام انشعاب از یک سنسور جهت اندازه گیری سرعت زاویه ای و از یک ابزار برای خواندن موقعیت مهره استفاده شده است. در نتیجه دیاگرام انشعابی که از انجام آزمایش به دست می آید، از آن جهت اهمیت دارد که یک ابزار اساسی برای مطالعه تغییر رفتار سیستم با تغییر پارامترهای سیستم است.

کلمات کلیدی: انشعاب، انشعاب چنگالی، دیاگرام انشعاب، دینامیک غیر خطی، سیستم حلقه و مهره

Design and Construction of a Laboratory System for Bead and Hoop and Drawing its Bifurcation Diagram

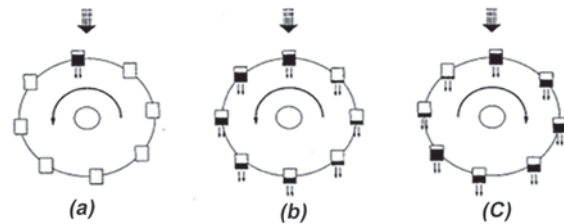
■ aref shahmansoorian, Department of Electrical Control Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin-Iran, shahmansoorian@eng.ikiu.ac.ir
 ■ mahdi farhang ranjbar, Department of Electrical Control Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin-Iran, mahdifarhang1374@gmail.com

Abstract

Bifurcations are used in the biological, medicine and industry. In this article, first, the importance and applications of bifurcation and its types are discussed. Then, in particular, the hoop and bead system has been studied in both theoretical and laboratory forms, which have been determined by performing theoretical and practical experiments. In the laboratory discussion, a sensor for measuring angular velocity and a tool for reading the position of the bead were used to obtain a bifurcation diagram. As a result, the bifurcation diagram obtained from the experiment is important because it is an essential tool for studying system behavior change in response to changes in system parameters.

Keywords: Bifurcation, Hoop and Bead system, Pitchfork Bifurcation, Bifurcation Diagram, Nonlinear Dynamic

تنوع رفتار سیستم‌های دینامیکی درجه اول محدود است و تمامی پاسخ‌ها یا به یک نقطه می‌رسند و یا به بی نهایت می‌روند. حال این سوال به وجود می‌آید که چه ویژگی‌هایی در سیستم‌های دینامیکی درجه اول اهمیت دارند؟ پاسخ را می‌توان با بررسی در سیستم‌های درجه اول یافت. وابستگی به پارامترها یکی از عوامل مهم و جالب در مورد سیستم‌های درجه اول است، یعنی با تغییر پارامتر، پایداری نقاط ثابت تغییر می‌کند [۱]. برای درک بهتر مفهوم نقاط ثابت و همچنین انشعاب، سیستم چرخ آبی را مطابق شکل (۱) در نظر می‌گیریم.



شکل ۱: سیستم چرخه آبی [۱].

دوشاخگی یا همان انشعاب می‌باشد. حال با توجه به مطالب بیان شده می‌توان به این نتیجه رسید که نقاط ثابت ممکن است با تغییر پارامترها از بین بروند یا به وجود آیند و یا پایداری آنها دستخوش تغییر شود. این تغییر کیفی در دینامیک را دوشاخگی (انشعاب) گویند. به مقادیری که این تغییرات در آن اتفاق می‌افتد، نقاط انشعاب گویند [۱]. انشعاب‌ها در صنایع مختلف، علوم زیستی و پزشکی و ... کاربردهای زیادی دارند. از جمله کاربردهایی که تاکنون از انشعاب‌ها در پژوهش‌های محققان دیده شده می‌توان به تشخیص هویت هر فرد با استفاده از شبکه چشم [۵]، جمعیت حشرات [۶]، سیستم دینامیکی مرتبه دوم با کاربرد باران اسیدی و فروپاشی جنگل [۷] همچنین تاثیر غلظت پروتئین بر ژن و بهبود عملکرد آن [۸] نام برد.

در این مقاله در بخش ۲ انواع انشعاب‌ها به صورت اختصار معرفی شده‌اند، سپس در بخش ۳ به بررسی تئوری ساخت آزمایش مهره و حلقه پرداخته می‌شود و در بخش آخر طراحی و ساخت سیستم حلقه و مهره بررسی می‌گردد.

۲- انواع انشعاب‌ها

در بخش ۱ به تعریف و توضیح انشعاب و کاربردهای آن پرداختیم، حال می‌خواهیم انواع انشعاب‌ها را به طور مختصر معرفی کنیم تا بیشتر با انشعاب یا همان دوشاخگی آشنا شویم.

۲-۱- انشعاب گره زینی^۲

این نوع انشعاب مکانیسمی است که به وسیله آن نقاط ثابت به وجود می‌آیند و نابود می‌شوند. وقتی یک پارامتر تغییر می‌کند، دو نقطه ثابت به هم برخورد می‌کنند و از بین می‌روند، که به طور معمول فرم نرمال این نوع انشعاب به صورت زیر می‌باشد [۱]:

$$\dot{x} = r \pm x^2$$

برای رسم دیاگرام انشعاب گره زینی که به فرم $\dot{x} = r \pm x^2$ می‌باشد، ابتدا باید نقاط ثابت را به دست بیاوریم.

حال معادله $\dot{x} = r + x^2$ را در نظر می‌گیریم. که نقاط ثابت این معادله برابر است با:

$$r + x^2 = 0 \rightarrow x^* = \pm\sqrt{-r}$$

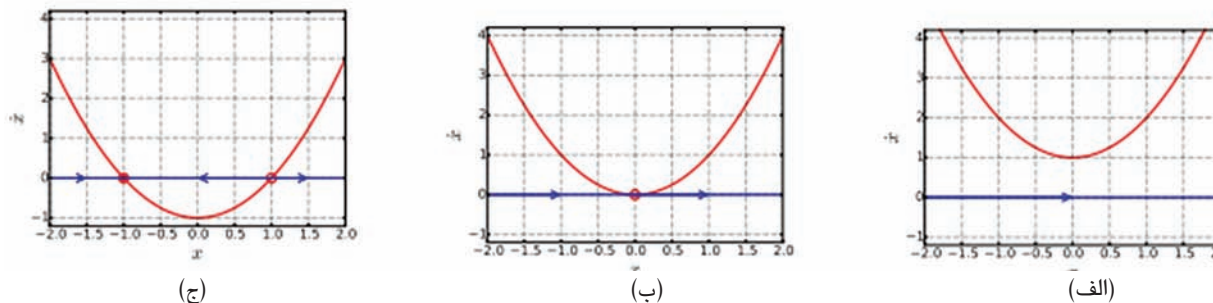
سه حالت پیش می‌آید: (۱) اگر $r < 0$ باشد، دو نقطه ثابت داریم. (۲) اگر $r = 0$ باشد، دو نقطه ثابت به هم برخورد می‌کنند. (۳) اگر $r > 0$ باشد، دیگر هیچ نقطه ثابتی نداریم. این موضوع در شکل (۲) نمایش داده شده است.

همان‌طور که از شکل‌های (۲) مشاهده می‌شود تعداد نقاط ثابت سیستم وقتی r از صفر عبور می‌کند تغییر می‌نماید. پس انشعاب در نقطه $r^* = 0$ رخ می‌دهد و دیاگرام انشعاب آن به صورت شکل (۳) می‌باشد. برای راحتی در رسم دیاگرام انشعاب ابتدا $r = -x^2$ را رسم می‌نماییم، سپس محور x و r را برعکس کرده تا دیاگرام انشعاب به دست بیاید. که در شکل‌های (۳) و (۴) قسمت‌های نقطه چین نقاط ناپایدار و قسمت‌های تو پر منحنی نقاط پایدار را نشان می‌دهند.

به‌طور مشابه همین روش را می‌توان برای معادله $\dot{x} = r - x^2$ پیاده نمود، که دیاگرام انشعاب آن به صورت شکل (۴) می‌باشد.

در [۹] و [۱۰] بررسی پایداری ولتاژ سیستم قدرت، ضمن به کارگیری تئوری اولیه انشعاب و اثرات آن بر روی پایداری سیستم، منجر به موضوع انشعاب نوع زینی شده است.

یک مدل مکانیکی منظم از معادلات لورنز توسط ویلیام مالکوس و لو هوارد در دهه ۱۹۷۰ در MIT اختراع شد که آب از بالا درون لیوان‌ها ریخته می‌شود حال بسته به شرایط اولیه با افزایش فلو می‌توان پایداری سیستم را بهم زد و سپس آن را آشوبناک کرد. در واقع نظریه آشوب^۱ شاخه‌ای از ریاضیات است که به بررسی رفتار آن دسته از سیستم‌های دینامیکی می‌پردازد که به شرایط اولیه بسیار حساس هستند. شالوده اصلی نظریه آشوب این ایده است که نظم و آشوب همیشه مخالف و در مقابل هم نیستند. سیستم‌های آشوبناک ترکیبی جذاب از نظم و آشوب هستند. از بیرون که به آن‌ها نگاه کنیم رفتاری غیرقابل پیش‌بینی دارند و بی‌نظمی از خود نشان می‌دهند، اما در درون این سیستم‌ها یک مجموعه از معادلات قطعی می‌بینیم که با نظم کار می‌کنند. امروزه نظریه آشوب به‌عنوان یک روش قوی و مفید جهت بررسی سیستم‌های پیچیده مطرح است و افق‌های جدیدی را در فهم رفتار سیستم‌های مکانیکی، سیستم‌های صوتی، سیال‌ها، سیستم‌های شیمیایی، سیستم‌های نوری، اکوسیستم‌ها و سیستم‌های زیستی باز کرده است. مفهوم آشوب یکی از مفاهیم جدید و بنیادی علم نوین است. به طور کلی می‌توان گفت که آشوب رفتاری به ظاهر تصادفی و بی‌نظم است که در بسیاری از پدیده‌های دنیای واقعی رخ می‌دهد [۲]. به‌عنوان مثال از آشوب می‌توان در الگوریتم بهینه‌سازی جستجو برای ابر کروی [۳]، سرکوب سیگنال‌های آشوبناک قلبی [۴] استفاده نمود. حال به بررسی عملکرد سیستم چرخ آبی در شکل (۱) می‌پردازیم. در واقع در حالت نخست چرخه ثابت است و لیوان بالایی به‌عنوان یک نقطه ثابت عمل می‌کند، به محض اینکه آب، درون لیوان بالایی مطابق شکل اول ریخته شود، چرخه شروع به حرکت می‌کند و لیوان‌ها در یک جهت بیشتر از جهت دیگر پر می‌شوند مانند شکل دوم و سپس جهت چرخش تغییر می‌نماید، یعنی نوعی تقارن به وجود می‌آید (شکل سوم). پس به‌طور کلی ابتدا چرخه ثابت بوده و بعد از ریخته شدن آب درون لیوان‌ها پایداری چرخ آبی تغییر کرده است که این خود نمونه بارزی از انشعاب می‌باشد. پس طبق این مثال نظریه آشوب با انشعاب مرتبط می‌باشد. یعنی با از بین رفتن پایداری، سیستم دچار آشوب گردید که این خود باعث به وجود آمدن

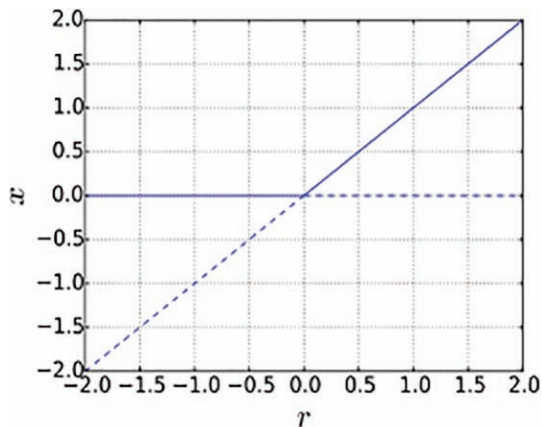


شکل ۲: نمودار (الف) هیچ نقطه ثابتی وجود ندارد، برای حالت $r > 0$ نمودار (ب) یک نقطه نیمه پایدار برای حالت $r = 0$ نمودار (ج) دو نقطه ثابت، یکی پایدار و دیگری ناپایدار برای حالت $r < 0$

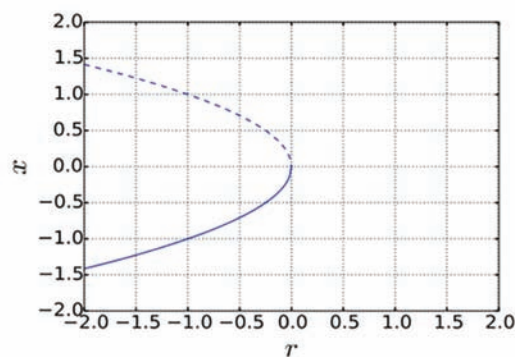
چنین نقطه ثابتی ممکن است با تغییر پارامتر، پایداری آن تغییر کند. اصطلاح ترنس کریتیکال برای توصیف چنین نوع از انشعاب به کار می‌رود. تفاوت اساسی بین انشعاب گره زینی و ترنس کریتیکال آن است که برخلاف حالت زینی در حالت ترنس کریتیکال دو نقطه ثابت همیشه وجود دارند و بعد از انشعاب از بین نمی‌روند، در عوض فقط پایداری آنها از یکی به دیگری منتقل می‌شود [۱]. فرم استاندارد انشعاب ترنس کریتیکال به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{x} = x(r - x)$$

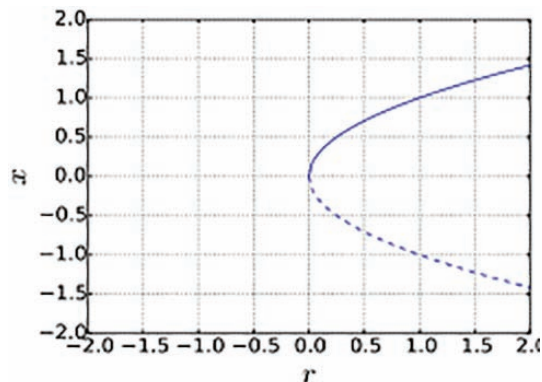
نقاط ثابت سیستم بالا عبارتند از $x^* = r$ و $x^* = 0$ که پایداری این نقاط در $r = 0$ تغییر می‌کند اما هرگز این نقاط ثابت از بین نمی‌روند. همان‌طور که در شکل (۵) به صورت گرافیکی نشان داده شده است. دیاگرام انشعاب ترنس کریتیکال در شکل (۶) رسم شده است.



شکل ۶: دیاگرام انشعاب برای سیستم



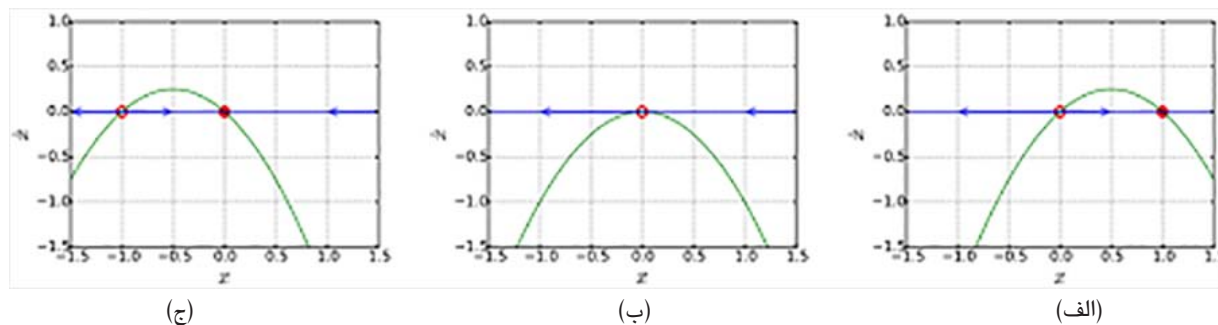
شکل ۳: دیاگرام انشعاب برای سیستم $\dot{x} = r + x^2$



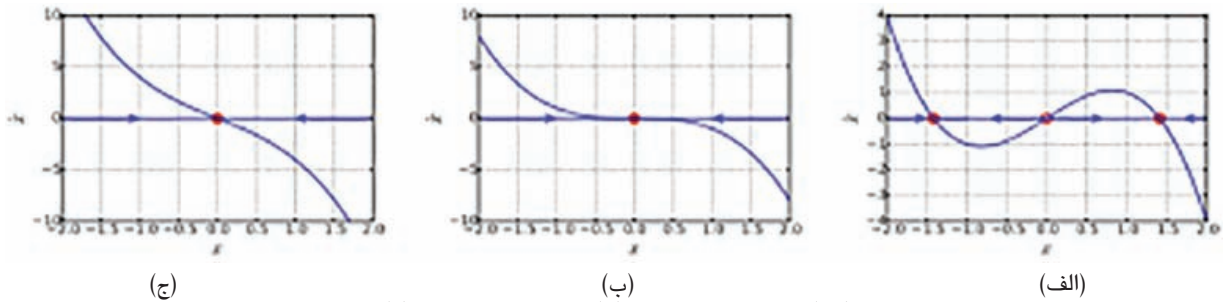
شکل ۴: دیاگرام انشعاب برای سیستم $\dot{x} = r - x^2$

۲-۲- انشعاب ترنس کریتیکال^۴

حالت‌هایی در سیستم وجود دارد که یک نقطه ثابت وجود دارد اما در شکل (۶) قسمت‌های نقطه چین منحنی نقاط ثابت ناپایدار و



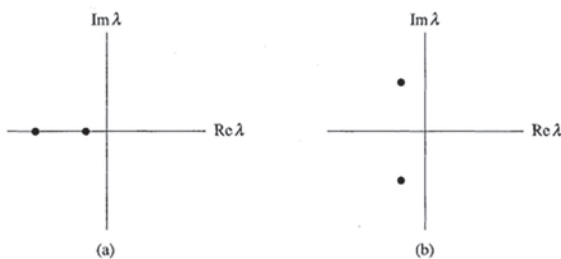
شکل ۵: نمودار (الف) برای حالتی که $r > 0$ نمودار (ب) برای حالتی که $r = 0$ نمودار (ج) برای حالتی که $r < 0$



شکل ۷. نمودار (الف) برای حالت $r > 0$ نمودار (ب) برای حالت $r = 0$ نمودار (ج) برای حالت $r < 0$

۲-۴- انشعاب هاپف^۴

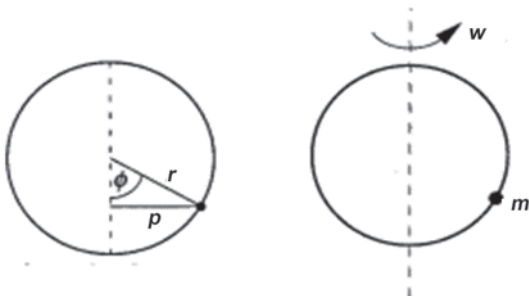
در این بخش نوع دیگری از انشعابها را بررسی می‌کنیم که مخصوص سیستم‌های درجه دوم می‌باشد. همچنین یک ویژگی قابل توجه دارد که آن را متمایز از دیگر انواع انشعابها می‌نماید و آن این است که یک نقطه ثابت پایداری خود را از دست می‌دهد بدون این که به نقاط دیگر برخورد کند. فرض می‌کنیم که یک سیستم دو بعدی یک نقطه ثابت پایدار دارد. همه حالتی که ممکن است این نقطه ثابت پایداری خود را از دست بدهد زمانی است که یک پارامتری مانند μ تغییر می‌کند. همان‌طور که می‌دانیم زمانی یک نقطه ثابت پایدار است که مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبی حتماً در نیم صفحه چپ باشند. حال یا هر دو حقیقی منفی هستند یا مزدوج با بخش حقیقی منفی و یا هر دو مزدوج روی محور $j\omega$ (شکل ۱۰). در این بخش حالتی را بررسی می‌نماییم که هر دو مقدار ویژه مزدوج به طور هم زمان از محور $j\omega$ عبور کنند، یعنی از سمت چپ به سمت راست جابه‌جا می‌شوند [۱].



شکل ۱۰: نمایش مقادیر ویژه انشعاب هاپف روی دستگاه مختصات [۱]

۳- تئوری ساخت آزمایش مهره و حلقه

در این بخش سیستم مورد نظر را به صورت تئوری بررسی نموده و نوع انشعاب آن را مشخص می‌نماییم.



شکل ۱۱: سیستم مهره و حلقه [۱]

همان‌طور که مشاهده می‌شود مهره‌ای به جرم m داخل حلقه‌ای با

قسمت‌های توپر نقاط ثابت پایدار هستند. و همچنین انشعاب در $r^* = 0$ اتفاق می‌افتد.

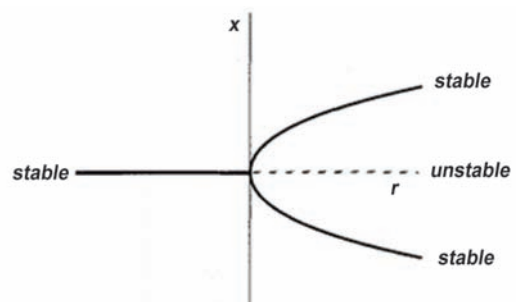
۲-۳- انشعاب چنگالی^۵

این نوع انشعاب در سیستم‌های فیزیکی که تقارن دارند، متداول است. مانند میله‌ای که یک وزنه بالای آن بسته شده است، به‌عنوان کاربرد از انشعاب در [۱۱] بحث شده است. انشعاب چنگالی خود به دو دسته تقسیم می‌شود: ۱- سوپر کریتیکال^۶ (فوق بحرانی) ۲- ساب کریتیکال^۷ (زیر بحرانی) که در هر دو دسته تعداد نقاط و پایداری مبدا تغییر می‌کند. فرم هر یک از این دسته‌ها به همراه نمودارهای آن به صورت زیر می‌باشد [۱]:

$$\dot{x} = rx - x^3$$

که نقاط ثابت سیستم فوق عبارتند از: $x^* = 0$ و $x^* = \pm\sqrt{r}$ که برای حالت‌های مختلف r نمودارهای سیستم فوق در شکل (۷) رسم شده است.

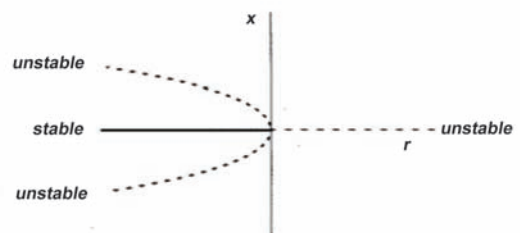
در شکل (۷)، در نمودارهای (الف) و (ب) نقطه صفر پایدار است و در نمودار (ج)، نقطه صفر ناپایدار است. دیاگرام انشعاب آن به صورت شکل (۸) می‌باشد.



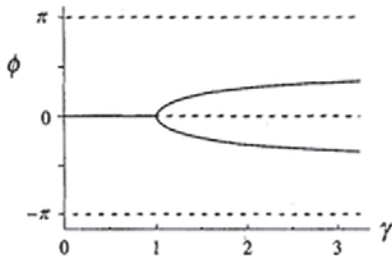
شکل ۸: نمودار انشعاب غیرخطی فوق بحرانی

انشعاب ساب کریتیکال (زیر بحرانی):

$$\dot{x} = rx + x^3$$



شکل ۹: نمودار انشعاب غیرخطی زیر بحرانی



شکل ۱۳: دیاگرام انشعاب سیستم مهده و حلقه [۱]

همچنین می‌توان با خطی سازی کردن معادله (۳) به این نکته پی برد که مبدا به ازای $\gamma < 1$ پایدار است، یعنی برای خطی سازی، $\sin \varphi$ و φ و $\cos \varphi$ را برابر ۱ قرار می‌دهیم. داریم:

$$mr\ddot{\varphi} = -b\dot{\varphi} - mg\varphi + mr\omega^2 \varphi \quad (۸)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{-b\dot{\varphi}}{mr} - \frac{g\varphi}{r} + \omega^2 \varphi \quad (۹)$$

برای به دست آوردن ماتریس خطی، ابتدا معادله (۹) را به فرم معادله فضای حالت می‌نویسیم. یعنی (با فرض در نظر گرفتن $x_1 = \varphi$):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-b}{mr}x_2 - \frac{g}{r}x_1 + \omega^2 x_1 \end{cases} \quad (۱۰)$$

حال ماتریس خطی سازی شده را به دست می‌آوریم:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{r} + \omega^2 & -\frac{b}{mr} \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

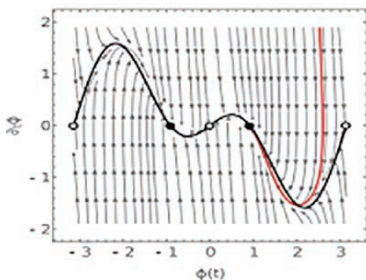
که مقادیر ویژه ماتریس بالا از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\lambda^2 + \frac{b}{mr}\lambda + \frac{g}{r} - \omega^2 = 0 \quad (۱۲)$$

حال شرط اینکه مبدا پایدار باشد این است که دو ریشه معادله (۱۱) منفی باشد، که این شرط مستلزم این است که

$$\omega < \sqrt{\frac{g}{r}}$$

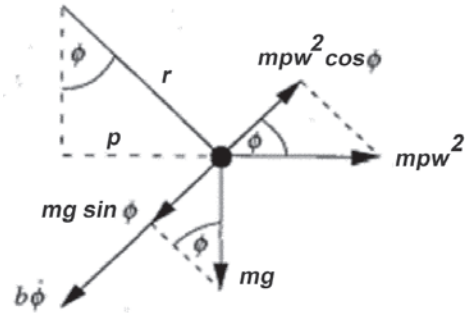
شکل (۱۴) دیاگرام صفحه فاز سیستم حلقه و مهده می‌باشد و بیانگر این نکته است که با تغییر ω مبدا پایداری خود را از دست داده و نقاط ثابت جدیدی به وجود می‌آیند و این خود یعنی همان دوشاخگی (انشعاب) که مسیر از مبدا فرار می‌کند و دورتر می‌شود.



شکل ۱۴: دیاگرام صفحه فاز سیستم حلقه و مهده

حال به تعبیر فیزیکی آنچه که در بالا به آن اشاره شد می‌پردازیم:

سرعت زاویه ω در حال چرخش می‌باشد و بازه تغییرات φ برابر است با $-\pi < \varphi \leq \pi$. با توجه به شکل (۱۱) در صورت چرخش، به ازای هر زاویه مثبت، یک زاویه منفی هم داریم. یعنی نوعی تقارن در اینجا وجود دارد که این موضوع در شکل (۱۳) به‌طور کامل مشخص است. که در رسم دیاگرام انشعاب، تقارن آن نیز رسم می‌شود. حال با توجه به قانون نیوتن نیروهای وارده بر مهده را مطابق شکل (۱۲) مشخص نموده و معادلات مربوطه را برای آن می‌نویسیم [۱]:



شکل ۱۲: نیروهای وارده شده بر مهده [۱]

$$mr\ddot{\varphi} = -b\dot{\varphi} - mg\sin\varphi + mr\omega^2 \cos\varphi \quad (۱)$$

که

$$\rho = r\sin\varphi \quad (۲)$$

داریم:

$$mr\ddot{\varphi} = -b\dot{\varphi} - mg\sin\varphi + mr\omega^2 \sin\varphi \cos\varphi \quad (۳)$$

معادله (۳) یک معادله دیفرانسیل درجه ۲ است و برای راحتی کار، این سیستم را با یک سیستم درجه اول تقریب می‌زنیم (یعنی ترم‌هایی که درجه ۲ هستند حذف می‌شوند) پس داریم:

$$b\dot{\varphi} = -mg\sin\varphi + mr\omega^2 \sin\varphi \cos\varphi \quad (۴)$$

$$b\dot{\varphi} = mg\sin\varphi \left[\frac{r\omega^2}{g} \cos\varphi - 1 \right] \quad (۵)$$

که با توجه به معادله بالا نقاط ثابت آن برابر است:

$$\sin\varphi^* = 0 \quad \varphi^* = 0 \quad \text{یا} \quad \varphi^* = \pi$$

ولی جالب بودن قضیه در آن است که دو نقطه ثابت دیگر هم وجود دارد، اگر $\frac{r\omega^2}{g} < 1$ باشد، که تعریف می‌کنیم:

$$\frac{r\omega^2}{g} = \gamma \quad (۶)$$

$$\varphi^* = \pm \cos^{-1}\left(\frac{g}{r\omega^2}\right) \quad (۷)$$

و حال معادله $\cos\varphi^* = \frac{1}{\gamma}$ را به صورت گرافیکی حل می‌کنیم.

برای $\gamma > 1$ دو ریشه قرینه هم دارند. برای $\gamma \rightarrow \infty$ این ریشه برابر $\pm\pi/2$ می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده تمام نقاط ثابت را به‌عنوان تابعی از γ ترسیم می‌نماییم. (شکل ۱۲)

که همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود بایفورکیشن در $\gamma = 1$ از نوع انشعاب چنگالی سوپر کریتیکیال (فوق بحرانی) می‌باشد.

به دست آورده و در همان سرعت می‌توانیم با استفاده از یک مقاله موقعیت مهره را روی حلقه بخوانیم در نتیجه در هر سرعت، موقعیت آن را نیز به دست می‌آوریم که نتایج در جدول زیر آورده شده است. نتایج اندازه‌گیری‌ها:

جدول شماره ۱: مقادیر مربوط به اندازه‌گیری سرعت و موقعیت

موقعیت (درجه)	سرعت (rpm)
۰	۰
۰	۱۰۰
۰	۲۰۰
۵	۳۰۰
۱۵	۳۵۰
۴۵	۴۰۰
۷۰	۵۰۰
۸۸	۷۰۰

طبق بحثی که در بخش ۳ داشتیم، در صورت چرخش مهره در حلقه، به‌ازای هر زاویه مثبت، یک زاویه منفی داریم. حال با استفاده از جدول بالا دیاگرام انشعاب را رسم می‌نماییم.

اگر ϕ نقطه تعادل باشد، منفی ϕ نیز نقطه تعادل می‌باشد پس سیستم فوق نسبت به محور ϕ تقارن دارد همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل (۱۸) تقریباً همانند شکل (۱۳) چنگالی بوده و تقارن دارد.

اکنون می‌خواهیم رفتار مهره را در هنگام چرخش حلقه، برای شرایط اولیه‌ی مختلف بررسی کنیم. به‌عنوان مثال اگر مهره در مبدا باشد در همان مبدا باقی‌خواهی ماند ولی اگر در نزدیکی مبدا باشد دیگر به سمت مبدا نخواهد رفت و به سمت نقطه تعادل دیگر خواهد رفت، حال اگر از اطراف همین نقطه ثابت (منظور نقطه ثابت غیر از مبدا می‌باشد) شروع به حرکت کند به سمت همان نقطه ثابت خواهد رفت و ماندگار خواهد شد. این دقیقاً همان چیزی است که در دیاگرام صفحه فاز شکل (۱۴) آمده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله ابتدا به کاربردهای انواع انشعاب در صنایع گوناگون پرداخته شد. سپس با در نظر گرفتن سیستم حلقه و مهره به صورت تئوری و ساخت آزمایشگاهی این سیستم و رسم دیاگرام انشعاب آن مشخص شد که نوع انشعاب، از نوع انشعاب چنگالی و از نوع

وقتی $\gamma < 1$ باشد، حلقه آهسته می‌چرخد و نیروی گریز از مرکز خیلی ضعیف است و نمی‌تواند بر جاذبه غلبه کند و از این‌رو مهره در پایین حلقه می‌ایستد. اما اگر $\gamma > 1$ باشد، نیروی گریز از مرکز بزرگ است و نقطه ثابت پایین ناپایدار می‌شود و کوچکترین انحراف از نقطه ثابت پایین تقویت می‌شود و از این‌رو مهره به طرف بالا کشانده می‌شود تا اینکه نیروی گریز از مرکز و نیروی جاذبه باهم به تعادل می‌رسند، این‌که کدام نقطه (+ یا -) انتخاب می‌شود، بستگی به شرایط اولیه دارد (شکل ۱۵). همان‌طور که ملاحظه می‌کنید معادله دیفرانسیل تقارن دارد [۱].

۴- طراحی و ساخت سیستم حلقه و مهره

در طراحی و ساخت سیستم حلقه و مهره از یک سنسور جهت تشخیص سرعت زاویه ای و یک ماژول جهت کنترل سرعت موتور و یک مقاله برای موقعیت مهره استفاده شده است که به معرفی و خصوصیات هر یک از سنسورها می‌پردازیم.

ماژول فرستنده و گیرنده مادون قرمز: که برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای مهره، هنگامی که حلقه در حال چرخش می‌باشد استفاده می‌شود.

این سنسور را دقیقاً روبه‌روی حلقه قرار می‌دهیم و با چرخش حلقه، سنسور مادون قرمز در هر بار چرخش، سرعت زاویه‌ای مهره را اندازه‌گیری می‌کند.

ویژگی‌های ماژول فرستنده و گیرنده مادون قرمز:

- ولتاژ کاری بین ۳ تا ۵ ولت
- جریان مصرفی در ۵ ولت حدود ۳۰ میلی‌آمپر
- فاصله تشخیص موانع ۲ تا ۳۰ سانتی متر
- دارای پیچ تنظیم بیشینه فاصله قابل تشخیص
- دارای آپ-امپ ۳۳۹ LM
- دارای LED نمایش‌دهنده تشخیص موانع
- دارای LED نمایش‌دهنده وصل بودن تغذیه

ماژول کنترلر دور موتور ۱۰ آمپر PWM DC 10A:

ماژول کنترلر سرعت موتور PWM یک ماژول بسیار پر کاربرد در رباتیک و صنایع مختلف می‌باشد. با استفاده از این ماژول و توان جریان‌دهی حداکثر ۱۰ آمپر می‌توان دور موتور DC را مدیریت نمود. ولتاژ کاری آن بین ۱۲ تا ۴۰ ولت می‌باشد.

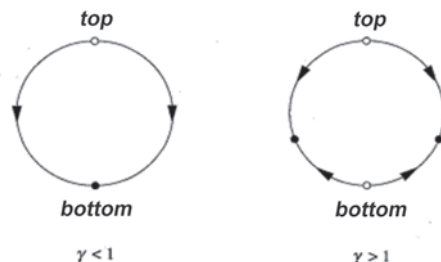
ابتدا سیستم مهره و حلقه را مطابق شکل (۱۷) بر روی موتور سوار می‌کنیم. سپس با راه‌اندازی موتور و با استفاده از ماژول PWM سرعت موتور را کنترل نموده، به عبارت دیگر سرعت موتور را بالا و پایین می‌بریم و سپس با استفاده از ماژول فرستنده و گیرنده مادون قرمز که رو به‌روی حلقه قرار دارد، سرعت مهره در هر بار چرخش را



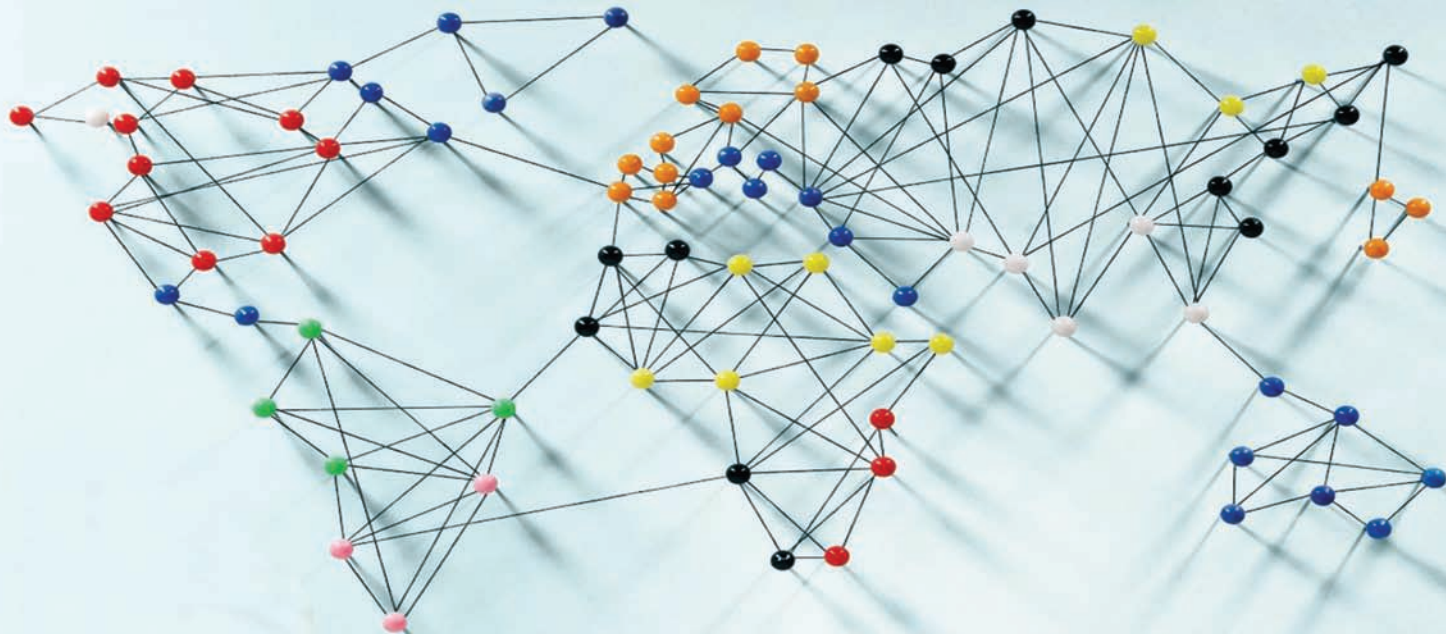
شکل ۱۷: سیستم مهره و حلقه
« ادامه در صفحه ۴۰ »



شکل ۱۶: ماژول فرستنده و گیرنده مادون قرمز



شکل ۱۵: تعبیر فیزیکی سیستم مهره و حلقه [۱]



مقاله علمی-ترویجی

بهبود خوشه‌بندی شبکه‌های اجتماعی با الگوریتم تکاملی رقابت استعماری و معیار شباهت درونی گره‌های شبکه

محمدامین شایگان^{*}، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، shayegan@iaushiraz.ac.ir

علی حسینی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، a.hosseini@iaushiraz.ac.ir

سعید صدیقی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، s.sedighi@iaushiraz.ac.ir

نویسنده مسوول

چکیده

به دلیل رشد روز افزون تمایل افراد به عضویت و استفاده از شبکه‌های اجتماعی، برقراری ارتباط و به اشتراک گذاری داده‌های موجود در این شبکه‌ها، مورد توجه علوم مختلف همانند علوم سیاسی، روانشناسی، جامعه‌شناسی، اقتصاد و ... قرار گرفته است. به همین دلیل، محققین اقدام به تشخیص و استخراج روابط بین افراد از داده‌های موجود در این شبکه‌ها، برای ایجاد جوامع دقیق‌تر نموده‌اند. با این حال هنوز روشی موثر جهت شناسایی و استخراج جوامع، بر مبنای داده‌های شبکه‌های اجتماعی ارایه نشده است. در این مقاله، به منظور خوشه‌بندی دقیق‌تر جوامع موجود در یک شبکه اجتماعی، روشی بر پایه استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری تکاملی رقابت استعماری و با انتخاب جمعیت اولیه بر اساس معیار خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی معرفی شده است. روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری پایه، به‌طور میانگین مقدار ماژولاریتی را ۲۱٫۴۵٪ افزایش داده و جوامع منسجم‌تری را استخراج نموده است.

کلمات کلیدی: الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم‌های تکاملی، خوشه‌بندی گراف، خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، شبکه‌های اجتماعی

Social Network Clustering Enhancement by using Imperial Competitive Evolutionary Algorithm and Inter-Similarity of Network Nodes

■ Mohammad Amin Shayegan^{*}, Department of Computer, Faculty of Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University/ Shiraz-Iran, Shayegan@iaushiraz.ac.ir

■ Ali Hosseini, Young Researchers and Elite Club, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz- Iran/a.hosseini@iaushiraz.ac.ir

■ Saeid Sedighi, Young Researchers and Elite Club, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz- Iran, s.sedighi@iaushiraz.ac.ir

^{*}Corresponding Author

Abstract

Abstract: Due to the growing desire of people to join and use social networks, communication and shar-

ing data in these networks has been considered by various sciences such as political science, psychology, sociology, economics, etc. Hence, researchers have begun to distinguish and extract relationships between individuals from the data contained in these networks, to create more accurate communities. However, there is still no effective method to identify and extract communities based on social media data.

In this article, a method has been proposed for social network accurate clustering by using Imperial Competitive Evolutionary Algorithm (ICEA) and selecting the initial population based on the density-based clustering criterion. The proposed method has improved the result of modularity about 21.45% in average, compared to rival basic ICEA and extracted more denser communities.

Keywords: Imperial Competitive Algorithm, Evolutionary Algorithms, Graph Clustering, density-based clustering, Social Networks

۱- مقدمه

با افزایش استفاده از شبکه‌های اجتماعی^۱ و گرایش افراد به عضویت و به اشتراک گذاری اطلاعات در آن‌ها، ارزیابی و تجزیه و تحلیل داده‌های موجود در این شبکه‌ها، مورد توجه علوم مختلفی همچون جامعه‌شناسی، روانشناسی، اقتصاد، جرم‌شناسی و... قرار گرفته است. چرا که می‌توان از این اطلاعات استخراج شده، در حوزه‌های مختلفی همچون صنعت، اقتصاد، سیاست و یا مسایل امنیتی استفاده نمود.

به منظور استخراج و ارایه راه حلی بهینه برای تجزیه و تحلیل شبکه‌های اجتماعی و یافتن جوامع مختلف موجود در آن‌ها، تا به حال الگوریتم‌های تکاملی^۲ و روش‌های بهینه‌سازی^۳ مختلفی معرفی و استفاده شده است. لیکن مشکلی که امروزه محققین با آن‌ها روبه رو هستند آن است که هنوز یک الگوریتم بهینه که بتواند داده‌های موجود در شبکه‌های اجتماعی را تجزیه، تحلیل و در نهایت جوامع منسجم را تشخیص و استخراج نماید معرفی نشده است [۱].

یکی از ابزارهای مهم جهت نمایش داده‌های حجیم و ارتباطات مابین آن‌ها «گراف» است. در حالت کلی می‌توان از گراف‌ها در نمایش رفتارهای بیولوژیکی پیچیده، سیستم‌های اقتصادی، اجتماعی و تکنولوژیکی استفاده نمود. ساختار شبکه‌های اجتماعی نیز بر پایه خوشه‌بندی^۴ گراف پیاده‌سازی می‌شود. در این راستا، خوشه‌بندی، ابزاری برای کشف ساختار از درون داده‌ها، بدون نیاز به هیچ پیش‌فرضی است. لیکن پایه و اساس خوشه‌بندی سنتی، تشابه اشیاء بوده و روش‌های سنتی خوشه‌بندی را نمی‌توان بر شبکه‌های اجتماعی اعمال نمود، چرا که خوشه‌بندی در شبکه‌های اجتماعی، به صورت پویا و در جهانی واقعی بر اساس ارتباطات موجود بین افراد انجام می‌شود [۱].

در نظریه گراف، خوشه‌بندی داده به خوشه‌بندی گراف، گسترش یافته که این مبحثی متفاوت از خوشه‌بندی داده است. معیار خوشه‌بندی در هر خوشه از گراف، بر اساس میزان تراکم لبه‌ها می‌باشد. خوشه‌بندی گراف به دنبال به حداکثر رساندن شباهت پیوندهای داخلی و همزمان به حداقل رساندن تعداد پیوندهای خارجی است که به عنوان پل ارتباطی بین جوامع عمل می‌کنند. با این حال، یافتن این ارتباطات و تخصیص آن‌ها به خوشه‌های مجزا در مقیاس‌های بزرگ داده و اطلاعات حجیم، مبحثی دشوار است.

خوشه‌بندی روش‌های متفاوتی دارد که یکی از آن‌ها خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی^۵ است. از مهمترین ویژگی‌های الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، توانایی تشخیص خوشه‌ها با اشکال دلخواه، خوشه‌بندی داده‌های همراه با نویز و پیچیدگی زمانی کم می‌باشد [۲]. فرآیند بهینه‌سازی به معنی تغییر دادن ورودی‌ها و خصوصیات یک سیستم به نحوی است که بهترین خروجی یا نتیجه به دست آید.

ورودی‌ها، متغیرهای فرآیند یا تابع مورد بررسی هستند که این نتایج عموماً با نام‌های تابع هدف^۶، تابع هزینه^۷ و یا تابع برازندگی^۸ نامیده می‌شود. خروجی نیز به صورت هزینه، سود و یا برازندگی تعریف می‌شود.

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی، تقسیم‌بندی می‌شود [۳]. الگوریتم‌های دقیق به روش‌هایی گفته می‌شود که بیشتر روش‌های ریاضی جهت یافتن جواب بهینه برای آن‌ها وجود دارد، لیکن در مسایل پیچیده کاربرد ندارند. بر خلاف الگوریتم‌های دقیق، الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان کوتاه، برای مسایل بهینه‌سازی هستند. الگوریتم‌های تقریبی خود به دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری^۹ و فراابتکاری^{۱۰} تقسیم‌بندی می‌شوند.

الگوریتم‌های فرا ابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای مکانیزم‌های خروج از بهینه محلی^{۱۱} بوده و قابل استفاده در طیف وسیعی از مسایل هستند. توانایی حل مسایل بسیار پیچیده، از قابلیت‌های دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد [۴].

در این مقاله سعی شده با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری رقابت استعماری^{۱۲} و ترکیب آن با روشی نوین جهت شناسایی جمعیت اولیه و تابع برازندگی، تشخیص جوامع در شبکه‌های اجتماعی بهینه‌سازی گردد.

بخش‌های آتی این مقاله به شرح زیر می‌باشد. بخش دوم، مروری بر برخی تحقیقات انجام شده در حوزه خوشه‌بندی شبکه‌های اجتماعی است. در بخش سوم، روش پیشنهادی این مقاله جهت بهینه‌سازی تشخیص جوامع در مجموعه داده‌های شبکه‌های اجتماعی، با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری رقابت استعماری به تفصیل معرفی می‌گردد. بخش چهارم نتایج حاصل از روش پیشنهادی معرفی و این نتایج با برخی از نتایج روش‌های رقیب موجود در همین حوزه مقایسه و در پایان در بخش پنجم به مرور، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- ادبیات تحقیق

۲-۱- مبانی نظری

۲-۱-۱- الگوریتم تکاملی رقابت استعماری

این الگوریتم، با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل کروموزوم در الگوریتم ژنتیک) به عنوان استعمارگر و باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود جذب می‌کنند. قدرت کل هر استعمارگر،

به هر دو بخش تشکیل دهنده آن، یعنی کشور استعمارگر (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت استعمارگر به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل می شود.

با شکل گیری استعمارگران اولیه، رقابت استعماری میان آنها شروع می شود. هر استعمارگر که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا دست کم از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک استعمارگر، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات استعمارگران رقیب خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت های استعماری، به تدریج بر قدرت استعمارگران بزرگتر افزوده و استعمارگران ضعیف تر، حذف خواهند شد. استعمارگران برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند [4]. جزئیات این الگوریتم نیز در ادامه به اختصار تشریح می شود.

الف) تعیین تعداد اولیه خوشه ها (ایجاد کشورهای اولیه)

در این مرحله، تعداد اولیه خوشه ها یا به طور تصادفی و یا با استفاده از سایر اطلاعات اولیه موجود تعیین می شود.

ب) تعیین اولیه کشورهای استعمارگر و مستعمره

در این مرحله، به ازاء هر کشور اولیه تابع هدف محاسبه و تعدادی از کشورها با بالاترین میزان تابع هدف به عنوان استعمارگر و بقیه کشورها به عنوان مستعمرات آنها تعیین می شوند.

ج) جذب (حرکت مستعمره ها به سمت استعمارگران)

این عملیات، در اصطلاح عملیات جذب نامیده شده که طی عملیاتی، مستعمره به سمت استعمارگرش حرکت خواهد کرد.

در راستای این سیاست، کشور مستعمره، به اندازه X واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر، حرکت کرده و به موقعیت جدید کشانده می شود X عددی تصادفی با توزیع یکنواخت است. اگر فاصله میان استعمارگر و مستعمره به d نشان داده شود مقدار X از رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$x \sim U(0, \beta * d) \quad (1)$$

در رابطه ۱، β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به دو می باشد. وجود ضریب، $\beta \geq 1$ باعث می شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت های مختلف به آن نزدیک شود. همچنین در کنار این حرکت، یک انحراف زاویه ای کوچک نیز با توزیع یکنواخت به مسیر حرکت افزوده می شود. در این حرکت ممکن است قدرت مستعمره بیشتر از استعمارگر شود.

د) انقلاب (انتقال تصادفی به مستعمره به مکان جدید)

بروز انقلاب، تغییرات ناگهانی را در ویژگی های اجتماعی-سیاسی یک کشور ایجاد می کند. در الگوریتم پیشنهادی، انقلاب با جابه جایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل سازی می شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می شود فرآیند حرکت تکاملی در بهینه محلی قرار نگیرد.

ه) محاسبه تابع هدف

تابع هدف در این پژوهش در رابطه (۲) نمایش داده شده است.

$$\text{similarity} = \sum_{i=0}^n w_i * p_i \quad (2)$$

در این فرمول، W برابر با وزن موجود در بین گره ها (که در واقع نمایش دهنده فاصله گره ها است) و p نمایش دهنده تعداد گره های موجود در مجاورت گره مرکزی است. تابع هدف به عنوان ورودی، یک کشور (یک نمونه از خوشه بندی کل مجموعه داده ورودی) را دریافت

و سپس درون این کشور به ازاء هر گره، تعداد و فاصله همسایگان تا گره را محاسبه می کند. در نهایت به ازاء هر گره، تابع هدف محاسبه می شود.

در این روند از الگوریتم نزدیک ترین همسایگی استفاده شده است که بتوان همسایگی تمامی گره ها را به طور همزمان تعیین و بر اساس آن، وزن (فاصله) و تعداد همسایگی را مشخص نمود.

و) جابه جایی موقعیت مستعمره و استعمارگر

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است برخی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از استعمارگر خود برسند. در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با یکدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار این کشور استعمارگر جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون سازی بر مستعمرات خود می کند.

ز) ارزیابی تابع هزینه کلی استعمارگران و مستعمره ها

در این گام، ضعیف ترین مستعمره از ضعیف ترین استعمارگر انتخاب و به قوی ترین استعمارگر تا به حال، اختصاص می یابد.

ح) سقوط استعمارگران ضعیف

در جریان رقابت های امپریالیستی، استعمارگرهای ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست استعمارگران قوی تر می افتد. در الگوریتم پیشنهاد شده، یک استعمارگر زمانی حذف شده تلقی می شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد.

خ) تکرار عملیات سقوط استعمارگران ضعیف

عملیات فوق با برگشت به مرحله ج (جذب) تا رسیدن به جواب بهینه (وجود فقط یک استعمارگر) و یا اتمام تعداد در نظر گرفته شده برای الگوریتم، تکرار می شود.

۲-۱-۲ شاخص ماژولاریتی^{۱۳}

ماژولاریتی (پیمانگی) معیاری جهت سنجش کیفیت ساختار جوامع در شبکه های اجتماعی است. یکی از ویژگی های اساسی ماژولاریتی، امکان مقایسه ی خوشه بندی های متفاوت است. از آنجایی که الگوریتم های مختلف، به طور حتم تعداد خوشه های یکسانی تولید نمی کنند، بسیاری از معیارهای موجود، مناسب برای مقایسه روش های مختلف خوشه بندی نبوده و امکان استفاده از آنها جهت ارزیابی میزان انسجام خوشه ها وجود ندارد.

ماژولاریتی امکانی را فراهم می کند تا بتواند از آن جهت تعیین تعداد خوشه ها استفاده نمود [۵]. ماژولاریتی، تعداد لبه های (یال ها) موجود در جامعه را با تعداد یال هایی که انتظار می رود وجود داشته باشند، مقایسه می کند. رابطه (۳) فرمول محاسبه ماژولاریتی را نشان می دهد.

$$Q = \sum_{c=1}^n \left[\frac{L_c}{L} - \left(\frac{K_c^2}{2 \cdot L} \right) \right] \quad (3)$$

در رابطه (۱)، n تعداد گره ها، L_c تعداد اتصالات در خوشه c ، L تعداد کل اتصالات درون شبکه و K_c درجه کلی گره های درون خوشه c می باشد. [۶]. شایان ذکر است پارامترهای تعداد گره ها و تعداد یال به عنوان ویژگی در مجموع داده های شبکه های اجتماعی موجود هستند.

با توجه به آنکه ماژولاریتی نشان می دهد خوشه ایجاد شده توسط یک الگوریتم خاص، تا چه میزان منسجم تر از ایجاد خوشه به صورت تصادفی است، از این رو هر چه عدد حاصل از ماژولاریتی بیشتر باشد، بیانگر یک خوشه منسجم تر است [۴].

۲-۲-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

باراً و خود [۸] با هدف خوشه بندی شبکه های اجتماعی، میزان

شبهات درون خوشه‌ای و عدم تشابه برون خوشه‌ای را بر روی پایگاه داده‌های ترکیبی زاکاری و فوتبال [۹] و مجموعه داده تماس‌های صوتی کاربران واقعی موبایل [۱۰] ارزیابی کردند. روش پیشنهادی بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی تکاملی چند هدفه MOEC، پایه‌گذاری شده و در مقایسه با مدل‌های مشابه دیگر به نتایج بهتری دست یافته است.

سعید و همکارانش [۶] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به خوشه‌بندی شبکه‌های اجتماعی پرداختند. آن‌ها به منظور تولید جمعیت اولیه، از معیاری به نام ضریب خوشگی استفاده کردند. بالاترین میزان ماژولاریتی در این پژوهش، برابر با ۰/۹۰۵ بوده است که به نسبت دیگر الگوریتم‌ها، بهبود قابل توجهی داشته است.

شی و همکارانش [۱۱] تحقیقی در خصوص پیش‌بینی ارتباطات کاربران با استفاده از مفهومی به نام فاکتور ماتریس و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات^{۱۴} ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که ماتریس فاکتورسازی، یک روش موثر در پیش‌بینی رابطه کاربران است. معیار ارزیابی در این مقاله دقت بوده که برابر با ۸۸٪ به دست آمده است. زامودیو و همکاران [۱۲] تحقیقی برای تشخیص جامعه در شبکه‌های اجتماعی ارائه کردند که از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای کشف اجتماع استفاده می‌کند. بیشترین تشابه درون خوشه‌ای محاسبه شده در روش پیشنهادی، حدوداً ۷۲٪ بوده است.

رستی و همکارانش [۱۳] الگوریتمی برای کشف جامعه در شبکه‌های اجتماعی پویا معرفی کردند. پژوهش آن‌ها بر روی شبکه‌های واقعی اجرا و نتایج آن با استفاده از معیار F-measure با دیگر الگوریتم‌های مشابه مقایسه شده است. مقدار F-measure این روش بر روی مجموع داده Amazon برابر با ۰/۷۸، بر روی مجموع داده DBLP برابر با ۰/۸۰، بر روی مجموع داده یوتیوب برابر با ۰/۶۴ و بر روی مجموع داده‌های LiveJournal برابر با ۰/۷۳ بوده است.

نیومن [۱۴] با بهینه‌سازی پارامتر ماژولار تلاش به تشخیص جامعه در شبکه‌های اجتماعی کرد. این پژوهش بر روی مجموع داده‌های ایمیل، جاز، فوتبال، کتاب، بلاگ‌های سیاسی، دولفین و کاراته اجرا شده است. نتایج حاصل از روش حداکثر سازی ماژولاریتی بر روی مجموع داده‌های فوق، به ترتیب برابر با ۰/۷۸، ۰/۵۹، ۰/۶۷، ۰/۵۹، ۰/۳۶، ۰/۲۷، ۰/۱۹، ۰/۶۳ بوده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که حداکثر سازی ماژولاریتی، یک مورد خاص برای بالا بردن احتمال تشخیص جامعه است. در این تحقیق، همه جوامع با خصوصیات مشابه آماری در نظر گرفته شده‌اند.

حسینی و عباسی [۱۵] بر اساس توضیح پیام‌ها، یک روش جدید برای تشخیص جامعه در شبکه‌های اجتماعی ارائه و نتایج را به وسیله پارامتر ماژولاریتی ارزیابی کردند. میزان ماژولاریتی بر روی حجیم‌ترین مجموع داده برابر ۰/۸۵۴ بوده که در مقایسه با روش‌های مشابه، منجر به تولید نتایج مطلوب‌تری شده است.

ژو و همکارانش [۱۶]، الگوریتمی جدید جهت تشخیص جوامع محلی، که روابط اجتماعی و ویژگی‌های موجود در شبکه‌های اجتماعی را به هم متصل می‌کنند، ارائه کردند. تفاوت معیار سنجش تشابه در این مقاله با روش‌های مشابه، ترکیب روابط اجتماعی و ویژگی‌های هر گره، توام است. این در حالی است که متدهای ارائه شده پیشین، تنها از روابط اجتماعی به‌عنوان درجه هر گره در مجموع داده‌های شبکه‌های اجتماعی استفاده می‌کردند. نتایج این الگوریتم با معیار سیلوئت، که تمرکز آن بر میزان کیفیت خوشه‌بندی انجام شده متکی است، برابر با ۰/۴۵ بوده است (هر چه مقدار سیلوئت بالاتر باشد، کیفیت خوشه‌بندی نیز بالاتر است).

یولا و لی [۱۷] به خوشه‌بندی کاربران در شبکه‌های اجتماعی پرداختند. در آن پژوهش از مجموعه داده‌های توپیتور، فوتبال، کاراته و ... استفاده شده است. آنها تعاملات بین کاربران جهت پیش‌بینی رفتار آینده کاربران را به‌عنوان بخش مهمی از تجزیه و تحلیل شبکه‌های اجتماعی در نظر گرفته‌اند. با توجه به اینکه نمی‌توان به صحت همه تعاملات انجام شده در شبکه‌های اجتماعی اعتماد داشت، بنابراین به هر تراکنش، وزن مشخصی از «اعتماد» داده شده است. در این مدل، خوشه‌بندی کاربران بر اساس دو فاکتور «میزان علاقه‌مندی» و «وزن اعتماد» انجام شده است. از نتایج این روش می‌توان به جلوگیری از همگرایی زودرس و اختصاص مناسب گره‌ها به خوشه‌های مناسب اشاره کرد.

کوگان و همکارانش [۱۸] یک الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی به نام CURE را معرفی کردند. این الگوریتم با مقادیر متفاوت پارامتر فاصله مجاورت، آزمایش شده که بهترین مقدار این پارامتر برابر با ۵ بوده است. نتایج این پژوهش با معیار تشابه برون خوشه‌ای بر روی مجموع داده‌های متفاوت محاسبه شده که در بهترین حالت، این معیار برابر ۰/۲۷ شده است. نتایج این پژوهش از نظر زمان اجرا نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است که در بهترین حالت در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها، زمان ۰/۸۹ ثانیه بهبود پیدا کرده است.

سانچز و دوارت [۱۹] یک رویکرد فراابتکاری مبتنی بر روش حرصانه، برای تشخیص جوامع در شبکه‌های بزرگ اجتماعی ارائه کرده‌اند. این الگوریتم با استفاده از دو مجموعه داده، توپیتور و فیسبوک آزمایش شده و نتایج به دست آمده برای این دو مجموعه داده، با معیار ماژولاریتی برابر با ۰/۶۷۴۴ و ۰/۵۴۱۶ بوده است.

آزاد و همکارانش [۲۰] تحقیقی در زمینه خوشه‌بندی داده‌های حجیم شبکه اجتماعی با استفاده از الگوریتم مارکوف به صورت موازی ارائه دادند. خوشه‌بندی مارکوف شباهت‌های دنباله‌ای را بر اساس فاصله اقلیدسی در نظر گرفته و گره‌ها را خوشه‌بندی می‌کنند. این پژوهش بر روش شبکه HipMCL با ۷۰ میلیون گره و ۶۸ میلیارد یال اجرا شده است. معیار ارزیابی F-score در این پژوهش برابر با ۱ شده است. زالیک [۲۱] به منظور تشخیص جامعه در شبکه اجتماعی، با استفاده از گره مرکزی و الگوریتم تکاملی Net-Degree پژوهشی انجام داد.

در این پژوهش از یک الگوریتم تشخیص جامعه تکاملی چند هدفه جهت شناسایی جوامع مبتنی بر مرکز استفاده شده است. معیار گره مرکزی برای خوشه‌بندی بهینه و برای بهبود همگرایی الگوریتم تکاملی استفاده می‌شود. نخستین تابع استفاده شده، شمارش گره‌های غیرمتصل با گره مرکزی جامعه است. که برای یک ساختار خوب جامعه، این معیار باید کمینه باشد تا جوامع با دقت جداسازی شوند؛ بنابراین تابع نخست، کیفیت هر جامعه و تابع دوم، کیفیت هر گره را اندازه‌گیری می‌کند. این معیار نیز برای یک ساختار جامعه خوب باید کوچک باشد، چرا که در واقع میزان فاصله درون خوشه‌ای را محاسبه می‌کند. معیار ارزیابی در این پژوهش، ماژولاریتی است که با الگوریتم تک هدفه Net-degree مقایسه شده است. نتایج حاصل به ترتیب برای کیفیت جامعه و کیفیت گره در مجموع داده‌های کاراته، برابر با ۰/۷۴۱ و ۰/۶۹۳ برای مجموع داده دولفین، برابر با ۰/۴۰ و ۰/۴۶۵، برای مجموعه داده کتاب، برابر با ۰/۴۸۳ و ۰/۴۶۵، برای مجموع داده جاز، برابر با ۰/۵۳۸ و ۰/۶۳۸ و در مجموع داده فوتبال برابر ۰/۴۵۶ و ۰/۶۴۱ به دست آمده است.

ترشیزی‌نژاد و همکاران [۲۲] با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، اقدام به تعیین اعداد جوامع در مجموعه داده‌های یوتیوب و فیسبوک کردند. برای این منظور، آن‌ها در هنگام محاسبه هزینه کل امپراتوری،

از ضریب خوشه‌بندی و گشت بسته استفاده کردند. معیار ارزیابی روش آن‌ها معیار اطلاعات متقابل هنجارسازی شده و ماژولاریتی بوده است. نتایج حاصل از آن تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر معیار اطلاعات متقابل هنجارسازی شده بر روی مجموعه داده یوتیوب، در مقایسه با روش Walktrap به میزان ۰/۰۶۵ درصد و بر روی مجموعه داده فیسبوک در مقایسه با روش COPRA به میزان ۰/۰۲۸ درصد بهبود داشته است.

۳- روش پیشنهادی

با توجه به اهمیت تجزیه و تحلیل داده‌های شبکه‌های اجتماعی و استخراج جوامع منسجم، در این تحقیق رویکردی جدید بر اساس ترکیب روش خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، با الگوریتم رقابت استعماری معرفی شده است. تفاوت عمده این روش با سایر کارهای مشابه، انتخاب جمعیت اولیه بر اساس معیار خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی است. یعنی بر خلاف روال طبیعی سایر الگوریتم‌های تکاملی، که مجموع اولیه آن‌ها به تصادف انتخاب می‌شود، روش پیشنهادی با تکیه بر خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی و ارایه تابع هدفی که تکیه اصلی آن بر تشابه درون خوشه‌ای است، توانسته خوشه‌های منسجم‌تری را تولید نماید.

در گام نخست ایده پیشنهادی، از الگوریتم مبتنی بر چگالی به منظور تعیین تعداد خوشه و مقداردهی اولیه برای ایجاد کشورها استفاده شده است. حسن استفاده از خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی آن است که تعیین تعداد خوشه‌ها به‌عنوان پارامتر ورودی مساله الزامی نیست و در روند خوشه‌بندی، وابسته به نواحی با تراکم بالاتر، خوشه‌ها تشکیل می‌شوند. به این صورت که نواحی با میزان چگالی بالاتر، با در نظر گرفتن میزان فاصله و تعداد خاص همسایگان، به‌عنوان یک خوشه در نظر گرفته می‌شوند. سپس در گام دوم، کیفیت خوشه‌های تولید شده اولیه با استفاده از تابع برازندگی مورد نظر، بررسی و در نهایت جواب تولید شده از طریق معیار ماژولاریتی ارزیابی می‌شود. روند اجرای این فرآیند در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳-۱- تولید جمعیت اولیه بر اساس خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی

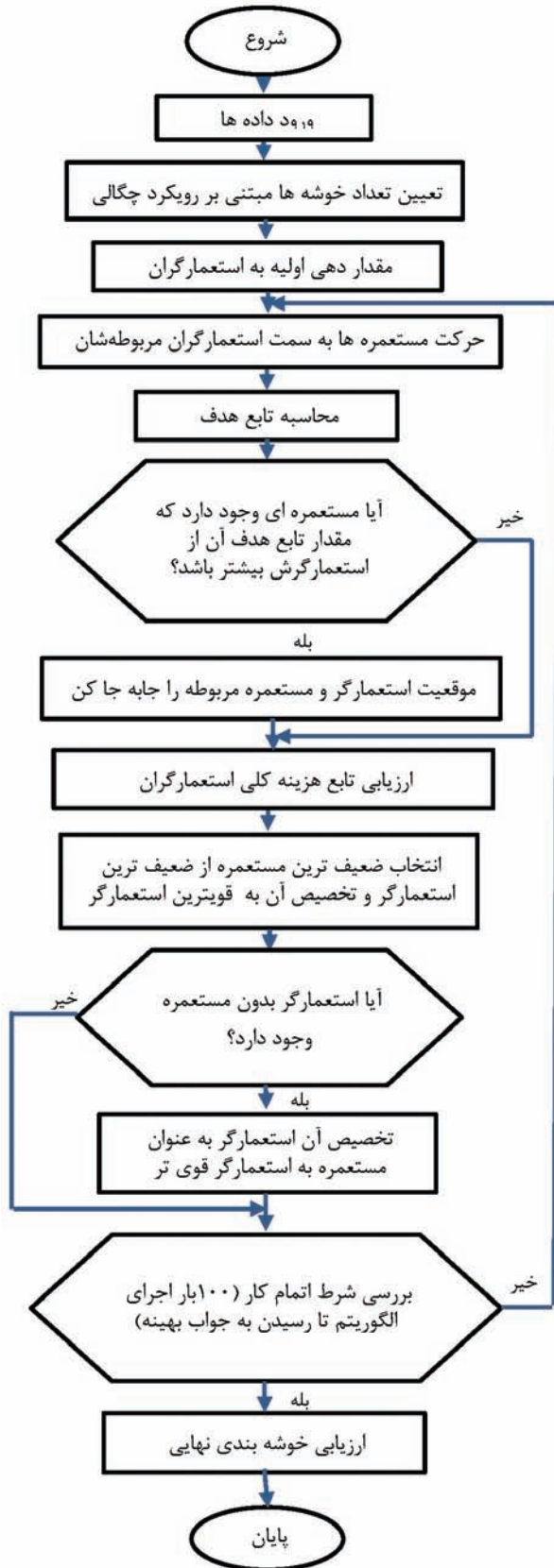
داده‌های آزمایشی در این مقاله، مربوط به هفت شبکه اجتماعی معروف هستند. داده‌های ورودی، به صورت گراف بوده و در قالب ماتریس ذخیره شده‌اند. جدول (۱)، مجموعه داده‌های بکار رفته در این تحقیق را معرفی می‌کند.

جدول ۱: مجموعه داده‌های مورد استفاده در این تحقیق

مجموعه داده	تعداد راس	تعداد ریل
کاراته	۳۴	۷۸
فوتبال	۱۱۵	۶۱۳
دولفین	۶۲	۱۵۹
کتاب‌های سیاسی ایالت متحده امریکا	۱۰۵	۴۴۱
جاز	۱۹۸	۴۴۱
فیسبوک	۲۸۸۸	۲۹۸۱
توییت	۲۳۳۷۰	۳۲۸۳۱

۳-۲- تعیین تعداد خوشه‌ها مبتنی بر رویکرد چگالی

در این مرحله، با در نظر گرفتن دو پارامتر تعداد همسایگی گره V_i (که در ابتدا عدد ۵ در نظر گرفته شده و تا نصف تعداد کل گره‌های ورودی افزایش می‌یابد) و فاصله بین گره V_i با همسایگانش (که از

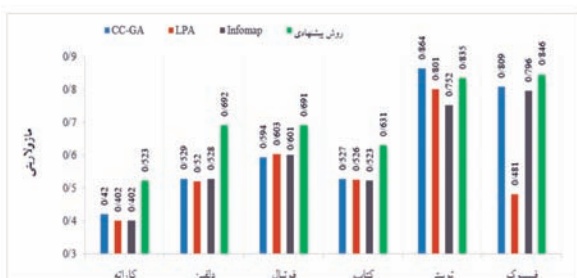


شکل ۱: فلوچارت روش پیشنهادی

جدول ۲: مقادیر حاصل برای پارامتر ماژولاریتی

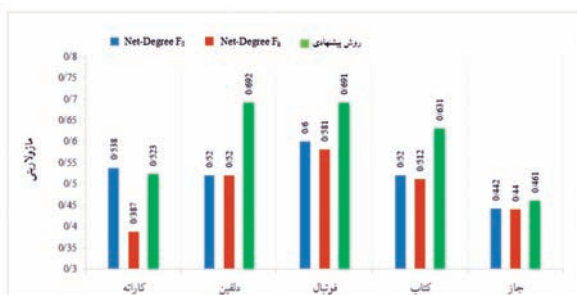
روش پیشنهادی	رقابت استعماری پایه	ژنتیک	
کارانه	٪۴۸	٪۶۰	
دلفین	٪۵۳	٪۴۴	
فوتبال	٪۵۹	٪۶۸	
کتاب	٪۵۰	٪۴۶	
جاز	٪۴۱	٪۳۵	
توییت	٪۶۱	٪۶۰	
فیسبوک	٪۷۱	٪۶۴	

در شکل (۲) مقادیر ماژولاریتی حاصل از الگوریتم CC-GA، LPA و INFOMAP [۶] و مقدار ماژولاریتی روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌های مختلف نشان داده شده است. مقدار حاصل برای شاخص ماژولاریتی در روش پیشنهادی در مجموع داده‌های کارانه، دلفین، فوتبال، کتاب و فیسبوک به ترتیب برابر ۰/۵۲۳، ۰/۶۹۲، ۰/۶۹۱، ۰/۶۳۱، ۰/۸۴۶ بوده که از نتایج سایر الگوریتم‌های معرفی شده در روش رقیب بهتر می‌باشد. (در روش Infomap مقدار ماژولاریتی برای مجموعه داده جاز محاسبه نشده است.)



شکل ۲: مقایسه مقدار ماژولاریتی حاصل از روش پیشنهادی و الگوریتم infomap و LPA، CC-GA

در شکل (۳)، مقدار حاصل از شاخص ماژولاریتی توسط الگوریتم‌های Net-Degree F0 و f_k [21] و مقدار ماژولاریتی روش پیشنهادی نشان داده شده است. مقدار ماژولاریتی محاسبه شده در روش پیشنهادی برای مجموعه داده‌های دلفین، فوتبال، کتاب، جاز، و کارانه، به ترتیب برابر ۰/۶۹۲، ۰/۶۹۱، ۰/۶۳۱، ۰/۴۶۱ و ۰/۵۲۳ بوده که برای تمام موارد به جز مجموعه داده کارانه، بهتر از روش‌های رقیب بوده است.



شکل ۳: مقایسه مقدار ماژولاریتی حاصل از روش پیشنهادی و الگوریتم Net-Degree F0 و f_k

شکل (۴)، مقدار ماژولاریتی حاصل از الگوریتم Memetic [23] و حاصل از روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است در این مقاله، مقدار ماژولاریتی فقط برای مجموعه داده‌های کارانه، دلفین و

شش فاصله اپسیلونی ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ استفاده شده است) تعداد خوشه‌ها مشخص می‌گردد. بر این اساس، کشورها که همان جمعیت اولیه بوده و هر یک نحوه‌ای خاص از خوشه‌بندی داده‌های ورودی شبکه‌های اجتماعی را نمایش می‌دهند، به وجود خواهند آمد.

۳-۳- مقدار دهی اولیه به استعمارگران

در این مرحله، به ازاء هر جمعیت اولیه (کشور) تابع هدف محاسبه می‌شود. سپس این کشورها به ترتیب نزولی از بیشترین مقدار تا کمترین مقدار هدف، مرتب شده و ۱۰ کشور اولیه که بیشترین میزان تابع هدف را دارند، به عنوان استعمارگر و مابقی کشورها به عنوان مستعمرات در نظر گرفته می‌شوند.

۳-۴- اجرای الگوریتم رقابت استعماری با تابع هدف پیشنهادی (تمرکز بر شباهت درون خوشه‌ای)

در این مرحله، با توجه به توضیحات بخش ۱-۲، الگوریتم رقابت استعماری برای ایجاد خوشه‌های متراکم مناسب اجرا می‌شود.

۳-۵- شرط توقف-پایان حلقه

پس از انجام مراحل آزمون و خطا در محدوده ۴۰ تا ۲۰۰ بار اجرای الگوریتم، تعداد برنامه جهت رسیدن به جواب بهینه، برابر با ۱۰۰ انتخاب گردید، چرا که در این حالت خوشه‌بندی بهینه توسط الگوریتم ارائه شده، استخراج گردید.

۳-۶- ارزیابی خوشه‌بندی نهایی

در نهایت، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با استفاده از معیار ماژولاریتی ارزیابی خواهند شد.

۴- یافته‌ها و نتایج

هدف اصلی این تحقیق، ارائه روشی جهت تولید جوامع منسجم از داده‌های شبکه‌های اجتماعی بوده است. بنابراین در این بخش، به بررسی نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با الگوریتم‌های CC-GA، LPA و InfoMap [6]، NetDegree F0 و f_k [21] و همچنین Memetic [23] پرداخته شده است.

در نخستین آزمایش، به منظور بررسی تاثیر استفاده از الگوریتم رقابت استعماری در تعیین انتخاب جمعیت اولیه بر اساس مقدار خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، در مقایسه با روش‌های خوشه‌بندی کاملاً تصادفی همانند الگوریتم ژنتیک و همچنین رقابت استعماری پایه، عمل خوشه‌بندی برای مجموعه داده‌های موجود در هر سه روش انجام گرفت. جدول (۲) نتایج حاصل برای پارامتر محاسبه شده ماژولاریتی در این آزمایش را نشان می‌دهد. مقادیر بزرگتر به دست آمده برای این پارامتر در روش پیشنهادی در بیشتر موارد، بیانگر کاراتر بودن این روش در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری رقیب دیگر است.

پس از آزمایش نخست و مشخص شدن برتری روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، آزمایش‌های دیگری بر روی مجموعه داده‌ها موجود با شرایط مشابه با سایر روش‌های رقیب صورت گرفت. در شکل (۲) تا (۵)، مقادیر حاصل از شاخص ماژولاریتی مربوط به هفت مجموعه داده باشگاه کارانه زاکاری، دلفین، مدرسه فوتبال امریکایی و کتاب‌های سیاسی ایالت متحده امریکا، فیسبوک، توییت و جاز نمایش داده شده است. شاخص ماژولاریتی بیانگر انسجام درونی خوشه‌بندی است و مقدار بیشتر این پارامتر، بیانگر خوشه‌بندی مناسب‌تر روش مربوطه خواهد بود.

در آن‌ها، جهت انجام تحقیقات متنوع دیگری نیز مورد استفاده قرار گرفت.

چالش خوشه‌بندی شامل یافتن روش‌های مناسب جهت خوشه‌بندی و همچنین سرعت در اجرای دسته‌بندی بهینه می‌باشد. با در نظر داشتن موارد گفته شده، این پژوهش با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری سعی بر بهبود خوشه‌بندی و به دست آوردن بهترین دسته‌ها در یک شبکه اجتماعی را داشته است. استفاده از الگوریتم رقابت استعماری با استفاده از خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی جهت تعیین جواب‌های اولیه، روند خوشه‌بندی داده‌های شبکه‌های اجتماعی را به طور میانگین روی مجموعه داده‌های ورودی (به خصوص داده‌های حجیم تر مانند فیسبوک و توئیتر) بهبود بخشیده است. این ادعا با محاسبه پارامتر معروف ماژولاریتی بر روی هفت مجموعه داده معروف در حوزه شبکه‌های اجتماعی، به‌عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی و نتایج حاصل از الگوریتم‌های LPA, CC-GA, Infomap, الگوریتم Net-degree تک هدفه و دو هدفه و الگوریتم Memetic اثبات شده است. در برخی مجموعه داده‌ها، مانند مجموعه داده کاراته، الگوریتم Memetic بهتر عمل کرده و آن هم به دلیل رویکرد دو هدفه بودن و رفتارشناسی این الگوریتم است. با بررسی روش پیشنهادی بر روی داده‌های شبکه اجتماعی توئیتر، فیسبوک و جاز، در برخی از موارد نتایج بهتر و یا نزدیک به روش‌های دیگر است و می‌توان ادعا نمود با دیگر موارد، به خوبی رقابت کرده و نتایج مناسبی را تولید نموده است.

به‌طور کلی روش پیشنهادی توانسته در مجموع داده فیسبوک، بر اساس شاخص ماژولاریتی خوشه‌بندی را تا دقت ۰/۸۴۶ ارتقا و خوشه‌های منسجم‌تری را تولید نماید. همچنین روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری پایه در هفت مجموعه داده کاراته، دلفین، فوتبال، کتاب، جاز، توئیتر و فیسبوک توانسته به طور میانگین ۲۱/۴۵٪ مقدار ماژولاریتی را افزایش داده و جوامع منسجم‌تری را استخراج نموده است. با توجه به نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی در جوامع بسیار بزرگ مانند فیسبوک و توئیتر بهتر عمل نموده و توانسته خوشه‌بندی بهتری ایجاد کند.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Social Networks
- 2 Evolutionary Algorithms
- 3 Optimization
- 4 Clustering
- 5 Density-based Clustering
- 6 Goal Function
- 7 Cost Function
- 8 Fitness Function
- 9 Heuristic Algorithms
- 10 Meta-heuristic Algorithms
- 11 Local Optima
- 12 Imperial Competitive Algorithm
- 13 Modularity
- 14 Particle Swarm Optimization

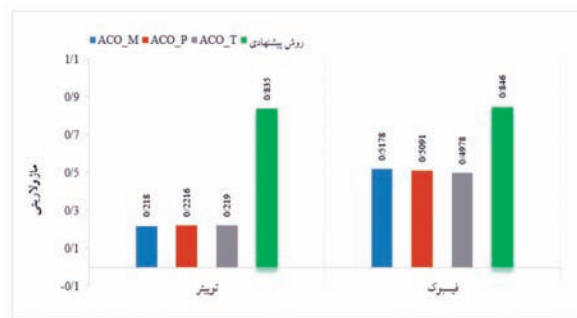
مراجع

- [1] مصطفی حسنونند، حسن نادری، فردین ابدالی «رایه مدلی برای خوشه‌بندی برای خوشه‌بندی شبکه‌های اجتماعی پویا»، همایش ملی مهندسی رایانه و مدیریت فناوری اطلاعات، تهران، شرکت علم و صنعت طلوع فرزین، ۱۳۹۳.
- [2] M.H Jajeer and D.Dipankar, "Distributed genetic algorithm to big data clustering", IEEE Symposium series on Computational Intelligence(SSCI), 2016.
- [3] A.K. Jain, M. Narasimha Murty, and P.J Flayn, "Data clustering: a review", ACM computing surveys(CSUR), 264-323, 1999.
- [4] آتشپز گرگری، اسماعیل، توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن، پایان

فوتبال محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، روش پیشنهادی برای مجموعه داده‌های دلفین و فوتبال توانسته میزان انسجام خوشه‌ها را افزایش دهد. لیکن از آنجا که الگوریتم Memetic روشی مبتنی بر رفتارشناسی است، توانسته در مجموع داده کاراته، که داده‌های آن افراد هستند، خوشه‌های منسجم‌تری تولید نماید.



شکل ۴: مقایسه ماژولاریتی حاصل از روش پیشنهادی و الگوریتم Memetic جهت مقایسه دو مجموعه داده فیسبوک و توئیتر، که ابعاد بزرگتری نسبت به مجموعه داده‌های قبلی دارند، مقایسه دیگری با تحقیق سانچز و دوارت [۱۹] صورت گرفت. در آن مقاله، مقدار ماژولاریتی حاصل از الگوریتم‌های ACO_T, ACO_P, ACO_M، که اساس کار آن‌ها الگوریتم تکاملی کلونی مورچگان است، برای مجموعه داده فیسبوک و توئیتر محاسبه شده است. در شکل (۵) مقادیر حاصل از الگوریتم‌های بالا در مقایسه با روش پیشنهادی مقایسه شده است. در این مقایسه مقدار ماژولاریتی برای روش پیشنهادی در مجموعه داده توئیتر برابر با ۰/۸۳۵ و در مجموعه داده فیسبوک برابر با ۰/۸۴۶ بدست آمد که نشان می‌دهد این روش، برای مجموعه داده شبکه‌های اجتماعی با ابعاد بزرگ می‌تواند نتایج تشخیص جوامع را بسیار بهبود بخشد.

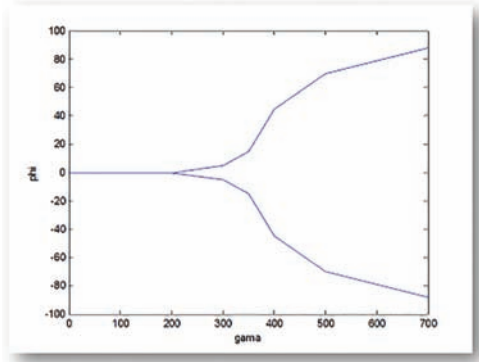


شکل ۵: مقایسه مقدار ماژولاریتی حاصل از روش پیشنهادی و الگوریتم‌های ACO_T, ACO_P, ACO_M

۵- مرور و نتیجه‌گیری

در تحلیل شبکه‌های اجتماعی، هر فرد را به صورت راس یک گراف و روابط اجتماعی وی را به صورت یال نشان می‌دهند. انواع مختلفی از یال‌ها می‌توانند میان رئوس وجود داشته باشند. می‌توان از مفهوم شبکه‌های اجتماعی در بسیاری از سطوح فردی و اجتماعی به منظور شناسایی مسایل و تعیین راه حل آن‌ها، برقراری روابط اجتماعی، اداره امور تشکیلاتی، سیاست‌گذاری و رهنمون‌سازی افراد در مسیر دستیابی به اهداف استفاده نمود. شاید در ابتدا هدف ایجاد شبکه‌های اجتماعی، برقراری ارتباط بین افراد و به اشتراک گذاری داده‌های تصویری، متنی و ویدئویی بود. اما در گذر زمان، داده‌های موجود

سوپر کریتیکال (فوق بحرانی) می‌باشد. که در آزمایشگاه برای معرفی انشعاب مفید است. در ادامه به‌عنوان پیشنهاد می‌توان برای سیستم ساخته شده در آزمایشگاه، کنترل کننده طراحی کرد یا شناسایی سیستم انجام داد. همچنین برای بررسی بیشتر انشعاب‌ها می‌توان سیستم مهره روی سیم مورب را به‌عنوان موضوع مقالات آتی در نظر گرفت.



شکل ۱۸: دیاگرام انشعاب سیستم حلقه و مهره به‌دست آمده از طریق آزمایشگاه

پی‌نوشت‌ها

- 1 Chaos Theory
- 2 Bifurcation
- 3 saddle-node bifurcation
- 4 Transcritical Bifurcation
- 5 Pitchfork Bifurcation
- 6 supercritical
- 7 subcritical
- 8 HOPF bifurcation

مراجع

[1] H. strogatz, S. NONLINEAR DYNAMICS AND CHAOS. New York.. 1994.
 [۲] اهاشمی گلپایگانی، سیدمحمد رضا. آشوب و کاربردهای آن در مهندسی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۱۳۹۸.
 [۳] کلانتری، محمد. سهرابی، سکینه. رشیدیکنعان، حمیدرضا. کرمی، حسین. الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ابرکروی مبتنی بر نظریه آشوب. نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۶، شماره ۲. ۱۳۹۷. صص ۱۲۱-۱۳۰.
 [۴] به‌نیا، سهراب. ضیائی، جاوید. خداوردی زاده، مهدی. سرکوب سیگنال‌های آشوبناک قلبی با استفاده از روش کنترل پویا. لیزر در پزشکی، شماره ۱. ۱۳۹۶. صص ۲۶-۳۱.
 [5] B. Patwari M, R. Manza R, M. Rajput Y, Saswade M, Deshpande N. Personal Identification algorithm based on Retinal Blood Vessels Bifurcation. International Conference on Intelligent Computing Applications. 2014.
 [6] Ludwig, D., Jones, D. D., and Holling, C. S. Qualitative analysis of insect outbreak systems: the spruce budworm and forest. J. Anim. Ecol. 47, 3 15. 1978.
 [7] Muratori S, Rinaldi S. Catastrophic bifurcations in a second-order dynamical system with application to acid rain and forest collapse. (13)12, 674-681. 1989.
 [8] Liu, F., Mei, Q., Sun, F., Wang, X., O Wang, H. Stability and Neimark-Sacker bifurcation analysis for single gene discrete system with delay. Proceedings of the 37th Chinese Control Conference. 2018.
 [9] Lv, S., Ma, Y., Zhou, X., Gao, Z. Voltage Stability Analysis of Power System Based on Bifurcation Theory. International Conference on Mechatronics and Automation August 5 - 8, Changchun, China. 2018.
 [۱۰] مجدی، نیما، ولایتی، محمدحسین. بررسی تأثیر مدل‌های بار، پارامترهای سیستم تحریک و محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت در حد دینامیکی پایداری ولتاژ با استفاده از یک آنالیز ترکیبی. مجله مدل سازی مهندسی. ۲۰(۸)، (بهار ۱۳۸۹). صفحات ۳۹-۵۵.
 [11] Sun, k., Wang, X., Yin, L., Zhu, C. Chaos and bifurcations of the fractional-order unified system. International Workshop on Chaos-Fractal Theory and its Applications. 2010.

نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران. ۸۸۳۱.
 [5] M.E. Newman, 'modularity and community structure in networks'. Proc. Of the national academy of sciences, 103.23, 8577-8582, 2006.
 [6] A.Said, R.A. Abbasi, O.maqbool, A. Daud and N.R Aljohani, "CC-GA: A clustering coefficient based genetic algorithm for detecting communities in social networks", Applied Soft Computing, 63, pp.59-70,2018.
 [7] A. Biswas and B.Biswas, "Defining quality metrics for graph clustering evaluation", Expert Systems with Applications, Vol.71, pp.1-17,2017.
 [8] A.A Bara'a and H.S Khoder, "A new multi objective evolutionary framework for community mining in dynamic social networks", Swarm and Evolutionary Computation, Vol.31, pp. 90-109,2016.
 [9] M. Girvan and M.E. Newman, "Community structure in social and biological network", Proc. Of the national academy of sciences, 7821-7826,2002.
 [10] D. Greene, D. Doyle and P. Cunningham, "Tracking the evolution of communities in dynamic social networks", Int. Conf. on advances in social networks analysis and mining. IEEE, 2010.
 [11] Z. Shi, W. Chen, L. Yue, J. Han and L. Feng, "User relation predication based on matrix factorization and hybrid particle swarm optimization", Proc. Of the 26th Int. conf. on Wold Wider Web Companion. 2017.
 [12] E. Zamudio, L.S. Berdun and A.A. Amandi, "Social networks and genetic algorithms to choose committees with independent members", Expert Systems with Applications, Vol. 43, pp. 261-270,2016.
 [13] G.Rossetti, L.Papparardo, D.Pedreschi and F. Ginnotti, "Tiles: on online algorithm for community discovery in dynamic social networks", Machine Learning, Vol. 106.8, pp.1213/1241,2017.
 [14] M.E.J. Newman, "Community detection in networks: Modularity optimization and maximum likelihood are equivalent", Phys. Rev. E 94, 052315, Nov 2016.
 [15] S.S Hoseini and S.H. Abbasi, "A new method for community detection in social networks based on message distribution", Int J.I of Computer Science and Network Security, Version 17, pp. 298-308,2017.
 [16] C.Xu, H. Zhang, B Lu and S. Wu, "Local Community Detection Using Social Relations And Topic Features in Social Networks", Chinese Computatinal Linguistics and Natural Language Processing Based on Naturally Annotated Big Data. Springer, Cham, pp. 371-383,2017.
 [17] F.Ullah and S. Lee, "Community clustering based on trust modeling weighted by user interests in online social networks", Chaos, Solitons & Fractals, Version 103, pp. 194-204,2017.
 [18] K.M. cogan r and A.R.M Jcob, "A fast DBSCAN clustering algorithm by accelerating neighbor searching using Groups method", Pattern Recognition, Vol. 58, pp. 39-48,2016.
 [19] J.Sanchez-Oro and A. Duarte, "Iterated Greedy algorithm for performing community detection in social networks", Future Generation Computer Systems, 2018.
 [20] A.Azad, G.A. Pavlopoulos, C.A. Ouzounis, N.C. Kyrpidis and A. Buluc, "HipMCL: a high-performace parallel implementation of the Markov clustering algorithm for large-scale networks", Nucleic acid research, 46.6, e33-e33, 2018.
 [21] K.R. Zalik, "Evolution Algorithm for Community Detection in Social Networks Using Node Centrality", In Intelligent Methods and Big Data in Industrial Applications, Springer, Cham, pp. 73-87,2019.
 [۲۲] افاطمه ترشیزی نژاد، مهرداد جلالی، داوود بهره پور «روش‌های تشخیصی جوامع در شبکه‌های اجتماعی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری»، دومین کنگره بین المللی فن آوری، ارتباطات و دانش، مشهد، ۵۱۰۲KCTCI، 4931.
 [23] K.R. Zalik and B. Zalik, "Multi-objective evolutionary algorithm using problem-specific generic operations for community detection in networks", Neural Computing and Applications, pp.1-14,2017.



مقاله علمی-مروری

یافته‌های گذشته و مسیرهای آینده روش‌های تعیین قابلیت انتقال توان در دسترس بخش نخست: مفاهیم و روش‌های ایستا

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

چکیده

با توجه به ترویج بازار برق به صورت پایدار و رقابتی در اغلب کشورها، تحقیقات درباره توانایی انتقال توان در دسترس به شدت افزایش یافته است و با توجه به افزایش مصرف و عدم گسترش شبکه انتقال، بیشتر اجزاء سیستم قدرت در مرز محدوده‌های مجاز خود قرار دارند که موجب کاهش کارایی آن‌ها می‌شود، از این رو تعیین مقدار دقیق قابلیت انتقال توان در دسترس (ATC) برای برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل سیستم قدرت بسیار مهم می‌شود که باعث شده است؛ روش‌های متعددی برای محاسبه ATC ارائه شود. الگوریتم‌های ارائه شده یا سریع هستند و دقیق نیستند و یا دقیق هستند و سرعت کافی ندارند. این مقاله، یک بررسی جامع از روش‌های مختلف برای تعیین ATC را در دو حالت ایستا و پویا ارائه می‌دهد. ابتدا مفاهیم و تعاریف مختلف مورد نیاز برای درک بهتر ATC ارائه می‌شود سپس در دو قسمت مجزا، ابتدا روش‌های ایستا و سپس روش‌های پویا بررسی می‌شوند. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که همزمان با توسعه روش‌های استاتیکی، روش‌های دینامیکی نیز گسترش پیدا کرده‌اند. این مقاله هم برای کسانی که در این زمینه کار می‌کنند مفید است و هم برای کسانی که می‌خواهند به این حوزه تحقیقاتی وارد شوند.

کلمات کلیدی: قابلیت انتقال توان در دسترس، توانایی انتقال توان، پایداری ولتاژ، مفاهیم ATC

Past Findings and Future Directions of Available Transfer Capability Part One: Static Concepts and Methods

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

Abstract

Due to the development of electricity market in a sustainable and competitive way in most countries, investigating the ability to transfer power has increased dramatically. Also, the increasing consumption and the lacking expansion of the transmission network have left most components of the power system within their authorized limits, which reduces the efficiency. Therefore, determining the exact amount of available transfer capability (ATC) is crucial for planning, operating and controlling the power system. There are many ways to calculate the ATC. The algorithms are either fast but not precise or accurate but not fast enough. This paper provides a comprehensive review of the various methods for determining ATC

in both static and dynamic methods. First, the concepts and definitions essential to a better understanding of ATC are presented then in two separate parts the, static methods and dynamic methods are examined. These studies show that simultaneously with the development of static methods, dynamic methods have been also developed. This paper is useful both for those who already work in this field and also those willing to enter the field.

Keywords: ATC, power transfer, voltage stability, ATC concepts

۱- مقدمه

از زمانی که در تمام دنیا بازار برق شکل گرفت؛ رقابت در سطوح مختلف خدمات انرژی گسترش یافت. تمام ذی‌نفعان سعی می‌کنند بیشترین سود را از این تجارت کسب کنند که این کار باعث افزایش تراکم سیستم انتقال شده و به طبع آن باعث نقص محدودیت‌های ولتاژ، پایداری ولتاژ، محدودیت‌های حرارتی و... می‌شود و در نتیجه امنیت سیستم را تهدید می‌کند [۱]. بنابراین برای حل این مشکلات باید قابلیت انتقال توان در دسترس (ATC) با بیشترین دقت و کمترین زمان، تخمین و محاسبه شود. تخمین بیش‌ازحد باعث ناپایداری شبکه می‌شود و تخمین کمتر ATC، باعث از دست رفتن سرمایه موجود می‌شود. به‌عنوان مثال، خاموش شدن شمال ایالت متحده و انتاریو در سال ۲۰۰۳ به دلیل تخمین بیش‌ازحد ATC بود. بنابراین نتایج برآورد بیشتر و یا کمتر ATC، اثرات نامطلوبی برای شبکه دارد.

روش‌های تعیین ATC به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: ایستا و پویا. در روش‌های ایستا، تغییرات زمانی متغیرهای سیستم در نظر گرفته نمی‌شود و در روش‌های پویا، از مدل‌های دینامیکی و استاتیکی سیستم قدرت، به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود. برای هر کدام از این روش‌ها، ماشین محاسبه^۲، معیارهای توقف، مزایا، معایب و نقایص آن‌ها آورده شده است. بعضی از این ماشین‌های محاسبه عبارت‌اند از: پخش بار متوالی، پخش بار بهینه و تحلیل حساسیت. به تمام حدودی که باعث توقف افزایش توان انتقالی در هنگام تعیین ATC می‌شوند معیار توقف گفته می‌شود. بعضی از این محدودیت‌ها عبارت‌اند از: حد حرارتی خطوط، حد پایداری استاتیک، واگرایی پخش بار DC و AC، حد ولتاژ در باس، ناپایداری دینامیکی ولتاژ و ناپایداری گذرا [۱]. برای درک بهتر روش‌های تعیین ATC، ابتدا در بخش دوم این مقاله، مفاهیم و تعاریف مختلف از پارامترهای وابسته به ATC به‌طور خلاصه آورده شده است تا با اصطلاحات تعیین ATC آشنا شوند. سپس در بخش سوم مقاله، روش‌های تعیین ATC ایستا و مراجع مربوط به بهبود ATC آورده شده است. در مقاله بعدی ATC پویا بررسی می‌شود [۱].

۲- تعاریف مربوط به ATC

به‌طور خلاصه در این بخش، مفاهیم مرتبط با ATC آورده شده است که به‌طور کلی از گزارش‌های ATCWG^۳ و یا NERC^۴ گرفته شده‌اند [۷-۲].

۲-۱- قابلیت انتقال^۵

قابلیت انتقال مقدار توانی است که با حفظ محدودیت‌های شبکه، خطوط و تجهیزات موجود در شبکه از یک ناحیه به ناحیه دیگر منتقل می‌شود. قابلیت انتقال یک کمیت جهت‌دار است یعنی قابلیت انتقال از ناحیه A به ناحیه B، همیشه مساوی قابلیت انتقال از ناحیه B به A نمی‌باشد.

۲-۲- ظرفیت انتقال^۶

ظرفیت انتقال، نرخ تحمل تجهیزات موجود در شبکه می‌باشد و برخلاف قابلیت انتقال، ظرفیت انتقال یک کمیت بدون جهت است و به‌طور کلی، ظرفیت انتقال یک خط نمی‌تواند نشان‌دهنده قابلیت انتقال آن خط باشد.

۲-۳- محدودیت‌های قابلیت انتقال

به محدودیت‌های شبکه، خطوط و تجهیزات موجود در شبکه معیار توقف گفته می‌شود که عبارت‌اند از محدودیت‌های حرارتی، محدودیت‌های ولتاژ، محدودیت‌های پایداری (ایستا و پویا) و نیازهای قراردادی. بین بعضی از فراهم‌کنندگان انتقال^۷، موافقت‌هایی به‌صورت قراردادی وجود دارد و در هنگام محاسبه قابلیت انتقال، این موافقت‌ها باید در نظر گرفته شود.

۲-۴- مبدأ و مقصد در تعیین قابلیت انتقال

برای تعیین قابلیت انتقال، مبدأ و مقصد را به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌نمایند: باس به باس؛ برای بستن قراردادهای دوطرفه بین یک مصرف‌کننده و یک تولیدکننده، گروه به باس؛ بین چند تولیدکننده و یک مصرف‌کننده، باس به گروه؛ برای یک تولیدکننده و چند مصرف‌کننده و گروه به گروه؛ بین دو ناحیه.

۲-۵- مسیرهای موازی

به مسیرهای غیرمستقیم بین دو ناحیه که توان انتقالی از آن‌ها نیز عبور می‌نماید مسیرهای موازی^۸ گفته می‌شود.

۲-۶- اصول ATC

این اصول به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته نخست اصولی که توسط NERC تصویب شده و دسته دوم اصولی است که هر ناحیه، مستقل از نواحی دیگر تصویب نموده و فراهم‌کنندگان انتقال همان ناحیه، ملزم به رعایت آن‌ها می‌باشند.

۲-۶-۱- اصول مشترک ATC

محاسبات ATC باید یک شاخص قابل اعتماد و معقولی از قابلیت انتقال توان را برای بازار برق ارائه دهد.

در محاسبه ATC باید شارهای متغیر با زمان کل شبکه انتقال در نظر گرفته شود علاوه بر این، باید تأثیر انتقال توان به‌صورت هم‌زمان^۹ و غیرهم‌زمان^{۱۱} از مسیرهای موازی نیز در نظر گرفته شود.

هنگام محاسبه ATC باید وابستگی آن به نقاطی که توان به آن‌ها تزریق و یا در آن‌ها مصرف می‌شود در نظر گرفته شود به همین دلیل باید، همه اطلاعات کافی برای محاسبه ATC فراهم شود.

برای ارسال و دریافت اطلاعاتی که مقدار ATC شبکه انتقال را مشخص می‌کند؛ یک هماهنگی منطقه‌ای لازم است.

ATC باید با معیارها و اهداف برنامه‌ریزی قابلیت اطمینان سیستم و خط‌مشی بهره‌برداری NERC در نواحی، زیر نواحی، سیستم تبادل اشتراکی و سیستم‌های خصوصی منطبق باشد.

باید در تعیین ATC، عدم قطعیت‌های معقول در متغیرهای سیستم در نظر گرفته شود تا یک برنامه‌ریزی قابل انعطاف و مطمئن از

بهره‌برداری شبکه فراهم شود.

۲-۶-۲- اصول ATC مربوط به نواحی

مسئولیت محاسبه ATC با در نظر گرفتن همه شرایط سیستم، با فراهم‌کنندگان انتقال می‌باشد.

اعضای یک ناحیه، مسئولیت هماهنگی برای تعیین ATC و ارسال اطلاعات به شبکه را بر عهده دارند.

ATC محاسبه‌شده باید در دسترس نواحی دیگر و مشتریان قرار گیرد.

۲-۷- فرآیند هماهنگی ATC

فراهم‌کنندگان انتقال، ملزم به محاسبه ATC مسیره‌های ارسالی، به‌روزرسانی و ارسال آن‌ها برای مشتری‌ها می‌باشند. برای به‌روز رساندن این اطلاعات، مسیره‌های ارسالی به دو دسته مسیره‌های محدودیت‌دار و مسیره‌های بدون محدودیت تقسیم می‌شوند. در مسیره‌های محدودیت‌دار، ارسال اطلاعات به‌صورت ماهیانه انجام می‌شود و برای مسیره‌های بدون محدودیت، ارسال ATC به‌صورت روزانه، روز آینده و ۶ روز بعد از آن انجام می‌شود.

۲-۸- تعریف مفاهیم مختلف ATC

۲-۸-۱- قابلیت انتقال غیر همزمان

قابلیت انتقال غیرهمزمان، به قابلیت انتقال بین دو ناحیه‌ای گفته می‌شود در صورتی که بین نواحی دیگر، تبادل توان وجود نداشته باشد.

۲-۸-۲- قابلیت انتقال همزمان

قابلیت انتقال همزمان، به قابلیت انتقال بین دو ناحیه، در صورتی که بین نواحی دیگر، تبادل توان وجود داشته باشد؛ گفته می‌شود.

۲-۸-۳- قابلیت انتقال کل (TTC)

قابلیت انتقال کل، به مقدار توان الکتریکی گفته می‌شود که می‌تواند در یک مسیر خاص و شرایط زیر تعیین شود: قابلیت اطمینان بالا، حفظ شرایط بهره‌برداری عادی، امکان حذف نوسانات توان، حفظ نرخ بارگذاری همه تجهیزات، در نظر گرفتن محدودیت‌های حرارتی، محدودیت‌های ولتاژ، محدودیت‌های پایداری و محدودیت‌های ناشی از موافقت‌های قراردادی.

قابلیت انتقال کل را می‌توان از رابطه زیر و شکل (۱) به دست آورد: در شکل (۱)، فقط محدودیت ولتاژ، حد حرارتی و پایداری در نظر گرفته شده است.

$$TTC = \min \{TL, VL, SL\} \quad (1)$$

۲-۸-۴- حاشیه اطمینان انتقال (TRM)

حاشیه اطمینان انتقال، مقدار قابلیت انتقالی است که همیشه باید

در سیستم باقی بماند تا در هنگام بهره‌برداری و مواجهه‌شدن با عدم قطعیت‌های موجود در سیستم، امنیت سیستم تضمین شود. عدم قطعیت‌ها عبارت‌اند از: خطای پیش‌بینی بار، خطای توزیع بار، تغییر بارگذاری تجهیزات به علت متعادل کردن تولید و مصرف در یک ناحیه کنترلی، پیش‌بینی عدم قطعیت‌ها در توپولوژی سیستم، تأثیر مسیره‌های موازی، عکس‌العمل خطوط بر یکدیگر، تغییر در توزیع تولید، عملکرد کوتاه‌مدت اپراتورها^{۱۴}.

۲-۸-۵- حاشیه مفید ظرفیت (CBM)

به مقدار قابلیت انتقالی که توسط نهادهای تأمین‌کننده بار، به‌منظور اطمینان از دریافت توان تولیدی در شبکه به‌هم‌پیوسته، به‌صورت ذخیره در نظر گرفته می‌شود شاخص CBM گفته می‌شود که به‌صورت محلی ارزیابی می‌گردد.

۲-۸-۶- افق بهره‌برداری و برنامه‌ریزی

منظور از افق بهره‌برداری^{۱۵}، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت برای یک ساعت تا ۳۱ روز آینده است و منظور از افق برنامه‌ریزی^{۱۶}، برنامه‌ریزی بلندمدت برای یک تا ده سال آینده است.

۲-۸-۷- ذخیره و برنامه‌ریزی قابل قطع و غیرقابل قطع

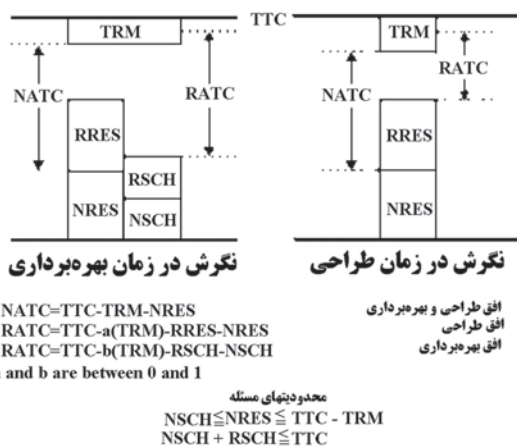
سرویس‌های انتقال شامل ذخیره غیرقابل قطع (NRES)^{۱۷}، ذخیره قابل قطع (RRES)^{۱۸}، برنامه‌ریزی غیرقابل قطع (NSCH)^{۱۹} و برنامه‌ریزی قابل قطع (RSCH)^{۲۰} می‌باشند. به مقداری از ظرفیت موجود که برای استفاده یک ناحیه نگاه‌داشته می‌شود توان ذخیره گفته می‌شود و به مقدار توانی که از شبکه انتقال عبور خواهد کرد و با توجه به شرایط موجود در شبکه، مقدار بار شبکه و تولید هر ناحیه تعیین شود؛ توان برنامه‌ریزی شده می‌گویند.

۲-۸-۸- قابلیت انتقال در دسترس (ATC)

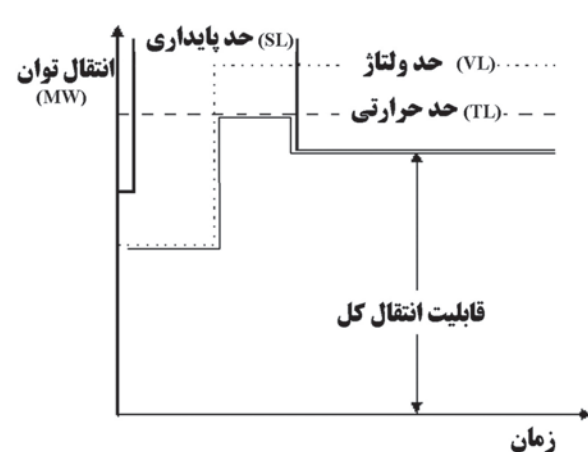
ATC، مقدار توان باقی‌مانده در سیستم انتقال بین دو ناحیه می‌باشد که با حفظ محدودیت‌های شبکه، خطوط و تجهیزات موجود در شبکه مبادله می‌شود. قابلیت انتقال در دسترس، از نظر ریاضی به‌صورت قابلیت انتقال کل، منهای حاشیه اطمینان انتقال، منهای مجموع تعهدات سیستم انتقال (که خود شامل حاشیه مفید ظرفیت نیز می‌باشد) تعریف می‌شود. در این تعریف تعهدات موجود^{۲۱} (EC) شامل همه قراردادهای بلندمدت و کوتاه‌مدت قابل قطع می‌باشد. بنابراین داریم:

$$ATC = TTC - TRM - CBM - EC \quad (2)$$

این تعریف کلی ATC می‌باشد که خود به انواع دیگری تقسیم می‌شود.



شکل ۲: خلاصه تمام مفاهیم ATC و مقایسه آن‌ها [۱]



شکل ۱: محاسبه قابلیت انتقال کل [۱]

۲-۸-۸-۱- قابلیت انتقال افزایشی در نخستین پیشامد^{۲۲} (FCITC)

FCITC، قابلیت انتقالی است که می‌تواند از سیستم انتقال پیش از خطا با حفظ قابلیت اطمینان شبکه عبور کند به شرطی که در مقابل آشفته‌گی‌های موجود، بعد از قطع یکی از عناصر سیستم، پایدار بماند.

۲-۸-۸-۲- قابلیت انتقال کل در نخستین پیشامد (FCTTC)

FCTTC، ماکزیمم توانی است که بین دو ناحیه، با حفظ قابلیت اطمینان و شرایط FCITC، مبادله می‌شود و یا به توانایی انتقال کلی گفته می‌شود که توان بحرانی مربوط به نخستین اتفاق از آن کاسته شده باشد [۸]

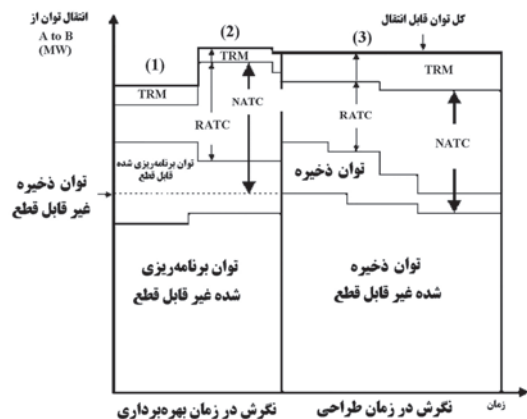
۲-۸-۸-۳- قابلیت انتقال در دسترس غیر قابل قطع^{۲۳} (NATC)

NATC، از نظر ریاضی به صورت قابلیت انتقال کل، منهای حاشیه اطمینان انتقال، منهای سرویس‌های ذخیره قابل قطع (که شامل حاشیه مفید ظرفیت نیز می‌باشد) تعریف می‌شود (شکل ۲).

۲-۸-۸-۴- قابلیت انتقال در دسترس قابل قطع^{۲۴} (RATC)

RATC، از نظر ریاضی به صورت قابلیت انتقال کل، منهای حاشیه اطمینان انتقال، منهای سرویس‌های ذخیره قابل قطع (که شامل حاشیه مفید ظرفیت نیز می‌باشد) و منهای سرویس‌های ذخیره غیر قابل قطع، تعریف می‌شود.

حالت‌های مختلفی می‌تواند برای قابلیت انتقال قابل قطع و غیر قابل قطع رخ دهد که در شکل (۳)، سه حالت آن نشان داده شده است. این حالت‌ها برای یک لحظه از زمان می‌باشند. توان تعیین شده توسط برنامه‌ریزی قابل قطع، دارای بالاترین تقدم می‌باشد. این توان نباید قطع شود مگر قابلیت اطمینان سیستم تهدید شود یا سیستم در حالتی باشد که کل توان تعیین شده توسط برنامه‌ریزی قابل قطع، مقدار قابلیت انتقال را کاهش دهد. برای همه حالت‌های نشان داده شده در شکل (۳) این موضوع صادق است.



شکل ۳: حالت‌های مختلف قابلیت انتقال قابل قطع و غیر قابل قطع [۱]

۳- روش‌های تعیین ATC ایستا

قدیمی‌ترین روش محاسبه ATC، روش ایستا می‌باشد و مهم‌ترین روش‌های محاسبه، پخش بار، پخش بار بهینه و روش‌های حساسیت (خطی سازی) می‌باشند. ابتدا روش‌های بهبود ATC و سپس روش‌های تعیین ATC مرور می‌شوند.

۳-۱- مراجع مربوط به بهبود ATC

در سال ۱۹۹۱، الکساندروف مقاله‌ای تحت عنوان «بهبود راندمان خطوط ۲۵ تا ۲۲۰ کیلوولت» [۹] داد. در این مقاله بیان شده است که حد نسبت توان انتقالی به ظرفیت خط^{۲۵} (SIL) باید کمتر یا مساوی یک باشد. برای این کار از باندل کردن خطوط و کاهش فاصله بین فازها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، برای افزایش ظرفیت

خطوط ۲۵ تا ۲۲۰ کیلوولت استفاده شده است. در سال ۱۹۹۸ سائر، «ارتباط بین جبران بارگذاری انتقال^{۲۶} (TLR) و ATC» را مشخص کرد [۱۰]. وقتی اطلاعات ATC غلط و یا نادرست باشد؛ ایمنی سیستم کاهش می‌یابد و کاربران و طراحان سیستم برای محاسبه TLR به زحمت می‌افتند. در این مقاله علاوه بر مشخص کردن ارتباط بین TLR و ATC، روش‌های ممکن برای کاهش اثر ATC بر TLR و بهبود سودمندی سیستم انتقال ارائه شده است.

«اجرای کنترل و تحقیق در پخش بار برای بهبود توانایی انتقال و استفاده از UPFC^{۲۷} برای بهبود توانایی انتقال» در سال ۱۹۹۸ توسط موریوکا [۱۴] انجام شده است. در این مقاله یک نمونه کوچک از UPFC برای مطالعه سیستم مدل زده شده است. ساختار کنترلی مدل، نحوه کنترل و حفاظت آن برای بهبود توانایی انتقال با شبیه‌سازی نشان داده شده است. قسمت‌های سری UPFC از سه بخش کنترل ولتاژ، کنترل امپدانس و کنترل زاویه ولتاژ تشکیل شده‌اند که در کنترل پخش بار و یا پایداری سیستم قدرت استفاده می‌شود. آزمایش‌های مختلفی برای مقایسه این کنترل‌کننده با وسایل کنترلی دیگر انجام شده و نشان داده شده است که این کنترل‌کننده نسبت به نوع کنترل آن، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین کنترل‌کننده است.

در همین سال، راجرمان و همکاران مقاله‌ای تحت عنوان «تعیین موقعیت خازن جبران‌ساز برای افزایش توانایی انتقال تان» ارائه کردند [۱۲]. در این مقاله یک روش تحلیلی برای تشخیص موقعیت و مقدار خازن جبران‌ساز سری، برای افزایش توان در سیستم قدرت ارائه شده است. از آنجا که محدودیت انتقال توان خطوط، یکی از معیارهای توقف در تعیین ATC می‌باشد؛ تعیین خطوط بحرانی، تعیین مقدار خازن و مکان آن برای افزایش ATC، از مهم‌ترین کارهای انجام شده در این مقاله می‌باشد. روش ارائه شده بر روی یک سیستم کوچک ۶ باسه و دو ژنراتور امتحان شده است.

وانگ در سال ۱۹۹۹، «چگونگی توزیع دوباره تولید برای افزایش حاشیه ایمنی سیستم قدرت» را ارائه کرد [۱۳]. روش ارائه شده در این مقاله علاوه بر افزایش حاشیه ایمنی سیستم قدرت، ولتاژ باس‌ها را نیز، با توزیع دوباره توان ژنراتورها بهبود می‌بخشد. روش ارائه شده بر اساس استفاده از یک بردار نرمال در محدوده فروپاشی ولتاژ و یا محدوده ولتاژ کم (LVB^{۲۸}) استوار است. این بردار به‌عنوان شاخصی برای تغییر توان تولیدی ژنراتورها و برای دور شدن از محدوده ولتاژ کم استفاده می‌شود. روش ارائه شده بر روی چندین سیستم آزمایش شده است. همچنین راهنمایی‌های فنی برای چگونگی استفاده از این روش در سیستم دسترسی آزاد آورده شده است.

با بهبود کارایی ادوات فاکتس، بهبود ATC با وجود ادواتی از جمله TCSC [۱۴] و TCR [۱۵] در سال‌های اخیر گسترش یافته است و در جدیدترین مقاله [۱۶]، از تحلیل حساسیت خطی برای تعیین ATC ایستا و از روش^{۲۹} (MEEPSO) برای تعیین بهترین مکان ادوات فاکتس برای بهبود ATC استفاده شده است. همچنین نشان داده شده است روش ارائه شده از روش‌های قبلی^{۳۰} ACPTDF^{۳۰} و DCPTDF^{۳۱} در شبیه‌ساز^{۳۲} PWS سریع‌تر است. در ادامه، روش‌های محاسبه ATC آورده می‌شود.

۳-۲- روش‌های محاسبه ATC

۳-۲-۱- ماشین محاسبه روش‌های ایستا

برای همه روش‌های آورده شده در این قسمت، ماشین محاسبه تعیین شده است.

۳-۲-۱-۱- پخش بار متوالی CPF

در این روش محاسبه ATC، تولید و مصرف برای هر قرارداد آن قدر

افزایش می‌یابد تا یک خط به محدودیت MVA و یا سیستم به هر حد ایستای دیگر برسد. تولید می‌تواند به نسبت اینرسی ژنراتورها افزایش یابد. استفاده از پخش بار و یا پخش بار متوالی برای تعیین توانایی انتقال، از قدیمی‌ترین روش‌های محاسبه ATC به شمار می‌آید. در مراجع قدیمی (تا سال ۱۹۷۲)، روش‌های بهبود پخش بار برای افزایش سرعت و دقت محاسبه توانایی انتقال استفاده شده است [۱۷-۱۸]؛ ولی تاکید بیشتر نویسندگان در سال‌های بعد بر نحوه بارگذاری بوده است؛ به طوری که بتوان بدون اینکه به محدودیت‌های شبکه رسید؛ بیش‌ترین بارگذاری انجام شود. با آنکه این موضوع به طور مستقیم در محاسبه ATC دخالت ندارد؛ ولی روش‌های بکار رفته، بعد از آن برای محاسبه ATC استفاده شده‌اند [۱۹].

در سال ۱۹۹۲ آجاراپو [۲۰]، نخستین روش پخش بار تداومی کلاسیک را تحت عنوان «پخش بار تداومی، یک ابزار برای بررسی پایداری ولتاژ در حالت ایستا» ارائه داد. در این مقاله از روش تداومی پارامتری شده محلی^{۳۳} استفاده شده است که در ردیف روش‌های حل معادلات جبری غیرخطی قرار می‌گیرد و به روش‌های دنبال‌کننده مسیر^{۳۴} معروف هستند.

لیک در سال ۱۹۹۷ مقاله‌ای تحت عنوان «ATC و مقدار آن در سیستم دسترسی آزاد» ارائه کرد [۲۱]. در این مقاله از نظریه شبکه‌های غیرخطی برای تعیین شرط‌های کلیدی در محاسبه و بررسی ATC استفاده شده است. همچنین برای تعیین ATC ایستا، سیستم‌های قدرت را به دو نوع یکنواخت^{۳۵} و غیریکنواخت^{۳۶} تقسیم کرده است. در سیستم‌های غیریکنواخت، ATC را نمی‌توان مستقل از بقیه قراردادهای در سیستم محاسبه کرد. به عبارت دیگر، ATC بین یک تولیدکننده و مصرف‌کننده در ازای یک قرارداد خاص، از بقیه قراردادهای مستقل نیست. ولی در سیستم‌های یکنواخت، وابستگی بین ATC و قراردادهای مختلف قابل صرف‌نظر کردن است و معادلات آن‌ها را می‌توان به راحتی به دست آورد. در این مقاله، روابط مورد نیاز اثبات و تحلیل شده است و بر روی یک سیستم ۶ باسه، تفاوت تعیین بررسی ATC سیستم‌های یکنواخت و غیریکنواخت نشان داده شده است.

اجیب و همکاران در سال ۱۹۹۸ مقاله‌ای تحت عنوان «محاسبه ATC» ارائه دادند [۲۲]. در این مقاله یک برنامه کامپیوتری برای محاسبه ATC با در نظر گرفتن محدودیت‌های پخش بار AC، اثر توان موهومی، حدود ولتاژ، فروپاشی ولتاژ و حد حرارتی ارائه شده است. در روش ارائه شده، برای محاسبه قابلیت انتقال، از افزایش پله‌ای بار و تولید، تا رسیدن به حدود بیان‌شده در تعریف قابلیت انتقال، استفاده شده است. در این نوع CPF، برای پیدا نمودن طول گام، از شیب منحنی توابع پخش بار نسبت به پارامتر تغییر توان لاند استفاده شده است. قابلیت انتقال به گونه‌ای تعیین شده است که امنیت سیستم با پیشامدهای ممکن در آن تضمین شود. در این مقاله دو روش به نام‌های سری و موازی برای تعیین قابلیت انتقال و بررسی پیشامدهای سیستم ارائه شده است که در روش سری، برای تک‌تک پیشامدها، CPF به صورت جداگانه انجام می‌شود و برای هر پیشامد ممکن سیستم، قابلیت انتقال تعیین می‌شود. کمترین قابلیت انتقال به عنوان قابلیت انتقال سیستم معرفی می‌شود. در روش موازی بر عکس روش سری، با افزایش یک گام در تولید و مصرف، تمام پیشامدها برای نقطه کار جدید بررسی می‌شوند. این افزایش تولید و مصرف آن قدر ادامه می‌یابد تا یکی از پیشامدها به محدودیت برسد. در این مرحله، توان انتقالی همه پیشامدها مقایسه می‌شوند. اگر قابلیت انتقال در پیشامد محدودکننده، از توان انتقالی در پیشامدهای دیگر کمتر

باشد؛ این قابلیت انتقال، قابلیت انتقال مطلوب می‌باشد و در غیر این صورت باید مراحل قبل را برای پیشامدهایی که محدودیت ایجاد نمی‌کنند؛ ادامه داد تا قابلیت انتقال محاسبه شود. مزیت این روش، افزایش کارایی روش CPF و ارائه یک الگوریتم جدید برای تعیین ATC ایستا می‌باشد.

همود در سال ۲۰۰۰ مقاله‌ای تحت عنوان «تعیین ATC سیستم انتقال» ارائه داد [۲۳] که در آن یک روش برای تعیین ATC بین دو ناحیه و یا چند ناحیه ارائه شده است. این روش در قالب یک نرم‌افزار تحت عنوان PROCOS^{۳۷} بیان شده است. نرم‌افزار PROCOS نه تنها برای محاسبه قابلیت انتقال، بلکه برای شناسایی تجهیزاتی که قابلیت انتقال را محدود می‌کنند؛ ابزاری قدرتمند است. این نرم‌افزار از پخش بار DC برای محاسبه نقطه کار سیستم استفاده می‌کند و در تحلیل خود، خروج واحدها، پخش بار اقتصادی، خروج تجهیزات و محدودیت‌های سیستم را در نظر می‌گیرد. محدودیت‌های شبکه که با پیش‌بینی به دست می‌آیند عبارت‌اند از: محدودیت حرارتی، محدودیت ولتاژ و محدودیت‌های پایداری. در PROCOS نحوه برنامه‌ریزی واحدها، سطح بار، توپولوژی شبکه و محدودیت‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود.

مزیت PROCOS برای محاسبه قابلیت انتقال این است که از روش‌های تکرار، استفاده نمی‌نماید و در نتیجه سرعت آن بالا می‌باشد. عیدیانی و همکاران ابتدا پیشنهاد کردند که روش CPF با استفاده از روش حداقل پس‌ماند (GMRES^{۳۸}) بهبود یابد تا در تعیین سریع پایداری ولتاژ کمک کند [۲۴]. همچنین به جای استفاده از روش نیوتن-رافسون معمولی NR، از روش NRS (نیوتن-رافسون-سایدل) استفاده شود که روشی سریع‌تر و دقیق‌تری نسبت به NR است. نشان داده شده است که این روش برای تعیین پایداری ولتاژ و ATC ایستا دارای سرعت و دقت بیشتری نسبت به روش‌های قبلی است [۲۵].

در سال ۲۰۱۱، عیدیانی و همکاران [۲۶] روش جدیدی به نام MD^{۳۹} برای تعیین پایداری ولتاژ و ATC ایستا ارائه دادند که در آن با سرعت و دقت کافی، فاصله بین نقطه کار تا مرز پایداری سیستم، در هنگام افزایش تولید و مصرف تخمین زده می‌شود.

در همین سال، عیدیانی [۲۷] روشی در تعیین پایداری ولتاژ ارائه داد که می‌توان این روش را برای شبکه‌های توزیع و انتقال به طور همزمان استفاده کرد. ترکیب الگوریتم‌های NRS، DH^{۴۰}، GMRES-CPF و حذف پارامترهای مثلثاتی در پخش بار و ماتریس ژاکوبین، باعث افزایش سرعت و دقت محاسبات شده است.

در سال ۲۰۱۶، نیرک‌شانا و همکاران [۲۸]، ATC ایستا را با حضور و جایابی ادوات فاکتس محاسبه و افزایش دادند. در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی گریه^{۴۱} برای یافتن مکان بهینه ادوات فاکتس استفاده می‌کند. بالاخره در سال ۲۰۲۰ و در مقاله [۲۹]، یک روش جدید در تعیین ارزیابی توانایی انتقال توان احتمالی (PTTC^{۴۲}) با وجود انرژی‌های تجدیدپذیر به نام (DDSPCE^{۴۳}) ارائه شده است. نشان داده شده است که روش ارائه شده می‌تواند با وجود تعداد زیادی ورودی تصادفی همگرا شود ولی این روش هنوز مشکل افزایش ابعاد مساله را حل نکرده است.

۲-۱-۲-۳-OPF، پخش توان بهینه (بهینه‌سازی خطی و غیر خطی)
برای هر قرارداد، تولید و مصرف به صورت بهینه آن قدر افزایش می‌یابد تا توان انتقالی بین دو ناحیه به بیشینه خود برسد. مراجع قدیمی این قسمت، بر پخش بار بهینه سیستم قدرت برای کنترل تبادل انتقال توان، توانایی بارگذاری بهینه سیستم و ارتباط بین توانایی انتقال توان و محدودیت پایداری ولتاژ و ... تأکید دارند [۳۰].

در سال‌های اخیر، بر روی محاسبه مستقیم ATC تأکید شده است. «پیشنهادی برای محاسبه حاشیه اطمینان انتقال (TRM) در ATC»، ارایه شده در سال ۱۹۹۸ توسط سائر [۳۱]، یکی از این مقاله‌ها است. از آنجا که در زمان ارایه مقاله، نظریه‌های توسعه‌یافته برای محاسبه TRM در ATC خیلی کم بوده است؛ چندین روش مختلف برای محاسبه TRM پیشنهاد و ارزیابی شده است. این محاسبات بر اساس یک برنامه OPF انجام شده است. نویسنده مقاله، TRM را مقدار عدم قطعیت در شرایط کاری استفاده شده در تعیین TTC می‌داند که این عدم قطعیت‌ها ممکن است به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامترها مانند امیدانس خطوط، خطای پیش‌بینی بار و یا اطلاعات باس‌ها به وجود آمده باشد.

در همین سال، ملیاپالاس [۳۲] مقاله «تخمین احتمالی توانایی انتقال در یک محیط خصوصی شده» را ارایه داد که یک روش احتمالی برای محاسبه ATC می‌باشد. در این مقاله، تمام نواحی به سه گروه تقسیم شده‌اند: (الف) ناحیه مورد مطالعه، (ب) نواحی شرکت‌کننده در انتقال توان و (ج) نواحی خارجی که هیچ‌گونه قرارداد مستقیم یا غیرمستقیمی با ناحیه مورد مطالعه ندارند. همچنین رتبه‌بندی پیشامدها را بر اساس استفاده از یک OPF انجام داده و توزیع احتمالی توانایی انتقال همزمان را بر اساس مدل مارکو محاسبه کرده است؛ که نقطه قوت این مقاله به شمار می‌آید. روش ارایه شده بر روی شبکه ۲۴ باس IEEE و همچنین یک سیستم واقعی دارای ۲۱۸۲ باس و ۸ ناحیه، امتحان شده و نتایج قابل قبولی گرفته شده است.

«محاسبه ATC در سیستم قدرت خصوصی شده» ارایه شده در سال ۱۹۹۸ توسط شبان [۳۳]، یکی دیگر از این نوع مراجع است. در این مقاله، TTC با استفاده از یک نوع OPF محاسبه می‌شود. هدف در پخش بار بهینه، بیشینه کردن مجموع تولید فرستاده شده و بار دریافت شده در باس‌های مشخص می‌باشد. همچنین محدودیت‌هایی از جمله پخش بار AC و حدود بهره‌برداری از سیستم در آن گنجانده شده است. در روش بهینه‌سازی این مرجع، از برنامه‌نویسی درجه دو پی در پی استفاده شده است. روش ارایه شده بر روی سیستم ۳۰ باس IEEE امتحان شده است. نتایج کامپیوتری نشان می‌دهد که روش ارایه شده بسیار مؤثر بوده و همگرایی خوبی دارد.

در سال ۱۹۹۹، گرواینر و همکاران مقاله‌ای ارایه دادند که در آن بر محاسبه ATC و اجزای تأثیرگذار بر آن -با بیشینه کردن توان انتقالی به وسیله برنامه‌ریزی غیرخطی- تأکید شده است [۳۴]. در این روش برای محاسبه قابلیت انتقال از افزایش پله‌ای بار و تولید، تا رسیدن به حدود بیان شده در تعریف قابلیت انتقال استفاده شده است. در این مقاله برای محاسبه قابلیت انتقال، فقط محدودیت‌های حرارتی خطوط و افت ولتاژها در نظر گرفته شده است. ابتدا تولید و مصرف به صورت پله‌ای در دو ناحیه افزایش می‌یابد تا وقتی که توان انتقالی خطوط به حد حرارتی برسد. پس از تعیین قابلیت انتقال با توجه به محدودیت‌های حرارتی، محدودیت‌های ولتاژ بررسی می‌شود. در صورتی که قابلیت انتقال به دست آمده باعث تجاوز ولتاژ از حد تعیین شده نشود؛ این مقدار قابلیت انتقال، قابلیت انتقال دلخواه است. اما اگر قابلیت انتقال به دست آمده باعث افزایش ولتاژ از حدود تعیین شده شود؛ این مقدار قابلیت انتقال باید کاهش داده شود تا محدودیت‌های ولتاژ برآورده شود.

در سال ۱۹۹۹، سائر مقاله‌ای ارایه داد که در آن ATC با در نظر گرفتن توان موهومی محاسبه می‌شود [۳۵]. در این مرجع، رابطه بین توان موهومی و انتقال توان سیستم خطی شده آورده شده است. از آنجا که حدود حرارتی خط انتقال به صورت ولت-آمپر بیان شده

و در بقیه روش‌ها با تقریب به‌عنوان حد مگاوات استفاده می‌شود؛ در نظر گرفتن توان موهومی در مقاله جدید، دقت محاسبه ATC را بالا برده است. چرا که در روش‌های قبلی در هنگام تعیین ATC، اثر ولتاژ باس‌ها و توان موهومی خطوط در نظر گرفته نمی‌شود و ATC چنان محاسبه می‌شود که توان حقیقی خطوط به حد حرارتی MVA برسد. در این مقاله بر روی دو سیستم کوچک ۳ و ۷ باسه ولی با اطلاعات کامل، نشان داده شده است که دقت این روش از روش‌هایی که توان موهومی را در نظر نمی‌گیرند؛ بیشتر است. این نویسنده روش فوق را برای یک سیستم بزرگ در سال ۲۰۰۳ دوباره امتحان کرده است [۳۶].

مرجع دیگر مورد بررسی در این قسمت، مقاله «توانایی انتقال min-max، max، یک مفهوم جدید» است که توسط گان در سال ۲۰۰۱ ارایه شده است [۳۷]. در این مقاله یک مفهوم جدید و یک الگوریتم برای توانایی انتقال ارایه شده است. الگوریتم ارایه شده بر اساس جستجوی میانه استوار است و با الگوریتم شاخه و کران^{۴۴} که روش استاندارد در حل مساله min-max است؛ مقایسه شده است و نشان داده شده است که الگوریتم جدید جستجوی میانه، ساده‌تر و مؤثرتر است. این مساله بر روی سیستم ۱۱۸ باس IEEE امتحان شده است. به نظر نویسندگان، اگر توانایی انتقال در یک محدوده مثل $[P_{min_max}, P_{max}]$ مشخص شود؛ بهتر از مشخص کردن آن با یک عدد مثل Pmax است. حد پایین این فاصله را توانایی انتقال min-max تعریف می‌کنند.

مقاله «محاسبه ATC با محدودیت‌های حالت پایدار با استفاده از تجزیه انحنای^{۴۵}» در سال ۲۰۰۳ ارایه شده است [۳۸]. در این مقاله با استفاده از الگوریتم قدیمی تجزیه انحنای، روشی برای تعیین TTC ارایه شده است. روش ارایه شده دارای دقت به نسبت خوبی است و بر روی سیستم‌های ۴ و ۳۰ باسه IEEE امتحان شده است.

در مقاله [۳۹] نشان داده شده است که محاسبه ATC با توجه به ناهموازی در محدودیت‌های پایداری سیگنال کوچک SSSC-ATC^{۴۶}، محاسبه ATC ایستا با روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی بسیار دشوار است. از این‌رو در این مقاله از یک روش برنامه‌نویسی درجه دوم به همراه نمونه‌گیری شیب تطبیقی (AGS^{۴۷}) استفاده کرده است. نشان داده شده است این روش از تمام روش‌های تکراری دیگر سریع‌تر عمل می‌کند.

اتفاقی که در سال‌های اخیر افتاده است تغییر روند محاسبه پخش بار بهینه معمولی با تکنیک‌های هوش مصنوعی^{۴۸} (AI) است [۴۰]. روش‌های AI برای جلوگیری از گرفتار شدن در یک راه‌حل بهینه محلی، مخصوصاً برای سیستم‌های بسیار غیرخطی استفاده می‌شود. بعضی از روش‌های مختلف AI در تعیین ATC عبارت‌اند از: شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم زنبور عسل (BA)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و برنامه‌ریزی تکاملی (EP)، گرگ خاکستری (GWO^{۴۹}) و الگوریتم جستجوی فاخته^{۵۰} (CSA [۴۱]). مقاله تعیین ATC برای بازار برق با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته در سال ۲۰۲۰ ارایه شد [۴۱]. در این مقاله نشان داده شده است که این روش، از روش‌های تکراری PSO و GWO برای تعیین ATC مناسب‌تر است. در جدیدترین مقاله [۴۲] نیز با کمک شبکه عصبی، ATC ایستا در زمان واقعی محاسبه شده است و برای این کار از اطلاعات برخط PMU استفاده می‌کند و ثابت کرده است این روش برای تخمین ATC ایستا بسیار مناسب است.

با آنکه روش‌های AI بسیار سریع هستند و معمولاً پاسخ بهینه کلی را پیدا می‌کنند ولی این روش‌ها، مشکل بزرگ شدن مسأله و مشکل انتخاب روش مناسب آموزش را دارند همچنین به اطلاعات زیادی

برای آموزش نیاز دارند.

۳-۱-۲-۳- تحلیل حساسیت، خطی سازی، پخش بار DC

تمام مراجعی که در این قسمت گردآوری شده‌اند از خطی سازی مدل در مساله محاسبه ATC استفاده کرده‌اند. در مراجع قدیمی (تا سال ۱۹۹۶) که هنوز مفهوم ATC مورد توجه مستقیم قرار نگرفته بود؛ مقاله‌ها بر روی توانایی تبادل انتقال توان، تبادل توان بهینه، حداکثر بارگذاری و ... با استفاده از تحلیل حساسیت تأکید داشته‌اند [۴۳]. در بین این مقاله‌های قدیمی، مرجع [۴۴] کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند. این دو مرجع، روش‌های تحلیل حساسیت V-Q و تحلیل مدل V-Q را توصیف کرده‌اند. این دو روش برای تحلیل پایداری ولتاژ سیستم‌ها بکار گرفته می‌شوند. مزایای این روش‌ها این است که ناحیه‌ای را که به صورت بالقوه مشکل پایداری دارد؛ مشخص می‌کنند و روش تحلیل مدل این مزیت اضافی را نیز دارد که اطلاعاتی را در خصوص چگونگی ناپایداری به دست می‌دهد.

اولین مقاله در زمینه ATC که از تحلیل حساسیت استفاده می‌کند؛ مقاله آقای گرین و همکاران است که در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است [۴۵]. همین روش برای یک سیستم واقعی ۳۳۵۷ باس، دوباره در سال ۱۹۹۹ امتحان شده است [۴۶]. در این مقاله جدید، یک رابطه کارآمد محاسباتی، برای تعیین حساسیت درجه اول توانایی انتقال، نسبت به تغییرات تمام پارامترها، ارائه شده است. روش ارائه شده از پخش بار DC استفاده می‌کند. نشان داده شده است که روش فوق سرعت بیشتر و دقت بهتری نسبت به روش‌های قبلی دارد.

گراونر در سال ۱۹۹۹ مقاله‌ای تحت عنوان «توانایی انتقال قابل دسترس و حساسیت درجه اول» ارائه کرد [۴۷] که در این مقاله، اثرات درجه اول تغییرات متغیرهای شبکه در محاسبه ATC شناسایی شده‌اند. همچنین با در نظر گرفتن حدود ولتاژ و حدود حرارتی، از پخش بار خطی و غیرخطی استفاده شده است و مهم‌ترین قسمت مقاله، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هایی مانند خطای پیش‌بینی بار و خطای اطلاعات در محاسبه ATC می‌باشد. همچنین در این مقاله، مفاهیم مختلف ATC به طور خلاصه تعریف شده‌اند و یک الگوریتم کلی برای چگونگی جستجوی جواب در پخش بار تداومی ارائه شده است. از آنجا که پیش‌بینی بار از مهم‌ترین عدم قطعیت‌های سیستم قدرت می‌باشد؛ در این مقاله، خطای پیش‌بینی بار در هنگام تعیین انتقال توان همزمان، بررسی شده است. الگوریتم‌های ارائه شده برای شبکه PJM امتحان شده و نشان داده شده است که خطای روش ارائه شده کمتر از ۱۰٪ است.

در سال ۲۰۰۰، اجیب و همکاران مقاله‌ای تحت عنوان «محاسبه سریع ATC خطی» ارائه کرده‌اند [۴۸] که در آن از پخش بار خطی استفاده شده و با در نظر گرفتن حد حرارتی خطوط و تعداد زیادی از پیشامدها، ATC محاسبه شده است. این روش به «روش حساسیت شبکه»^{۵۱} مشهور است. در این مقاله، به کمک یک مثال، اثرات فیزیکی انتقال توان بر روی شبکه بررسی شده است. این روش از ابتدایی‌ترین روش‌های محاسبه قابلیت انتقال می‌باشد و برای محاسبه آن فقط محدودیت‌های حرارتی خطوط انتقال را در نظر می‌گیرد. ولی چون از روش‌های تکراری استفاده نمی‌کند؛ دارای سرعت بالایی می‌باشد. در این مقاله عبارات‌های زیر تعریف شده و رابطه ریاضی برای آن‌ها مشخص شده است؛ ضرایب توزیع وقفه‌های خطوط^{۵۲}، ضرایب توزیع انتقال توان^{۵۳} و ضرایب توزیع وقفه‌های ژنراتور^{۵۴}. روش ارائه شده برای سیستم‌های مترکم، که در آن‌ها مصرف‌کننده‌ها و تولیدکننده‌ها به کمک خطوط انتقال به شدت به هم گره خورده‌اند؛ استفاده می‌شود. در چنین شبکه‌هایی، مسیرهای بحرانی انتقال برای یک انتقال خاص

قابل تعیین نمی‌باشد و این مسیرها وابستگی شدیدی به شرایط موجود در زمان برنامه‌ریزی انتقال دارند. عیب عمده این روش در این است که محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این روش، بسیار کم است و با جواب‌های به دست آمده، با در نظر گرفتن محدودیت‌های بیشتر (استاتیکی و دینامیکی) فاصله دارد.

در سال ۲۰۰۰، زیو و سونگ مقاله‌ای تحت عنوان «ارزیابی ATC به وسیله برنامه‌نویسی تصادفی»^{۵۵} ارائه داده‌اند [۴۹] که در آن با مدل تصادفی، عدم قطعیت‌های بار، ژنراتور و خط مشخص شده و ATC محاسبه شده است. روش ارائه شده ترکیبی از دو روش (SPR^{۵۶}) و (CCP^{۵۷}) می‌باشد که شامل متغیرهای گسسته و متغیرهای پیوسته است. روش ارائه شده بر روی یک سیستم ۲۹ باس و ۶۹ خط امتحان شده است و نشان داده شده است که با وجود عدم قطعیت‌های زیادی که در سیستم وجود دارد؛ روش ارائه شده، جواب قابل قبولی ارائه می‌دهد.

دای و همکاران [۵۰] با استفاده از الگوریتم نقطه درونی^{۵۸}، بیش‌ترین توانایی بارگذاری سیستم را محاسبه کرده‌اند. در این مقاله علاوه بر تعریف بیش‌ترین توانایی بارگذاری بر اساس منطقه، روشی ارائه شده است که برای انواع مساله تعیین بیش‌ترین توانایی بارگذاری کاربرد دارد. روش ارائه شده برای سیستم ۶۰ باس IEEE امتحان شده است. در این مقاله روابط بیش‌ترین توانایی بارگذاری توسعه داده شده تا برای محاسبه ATC بکار رود. این کار با آزاد گذاشتن تولید در باس منبع و مصرف در باس بار و تثبیت کردن بقیه تولیدات و مصرف، انجام شده است. سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی نقطه درونی، مساله بهینه‌سازی بیش‌ترین توانایی بارگذاری حل شده است. از آنجا که روش نقطه درونی در برنامه‌ریزی خطی، روشی جدید و سریع می‌باشد؛ سرعت روش ارائه شده در این مقاله بسیار خوب است.

در سال ۲۰۰۶ [۵۱]، نشان داده شد که به دلیل پیچیدگی و وقت‌گیر بودن پخش بار AC، بهتر است از پخش بار DC استفاده شود. در این مرجع از تلفات و توان موهومی صرف‌نظر شده و معادله خطی زیر را برای کل سیستم استفاده می‌کند:

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n B_{ij} (\theta_i - \theta_j)$$

که p تون تولیدی در باس i ام، B_{ij} سوسپتانس بین باس i و j و θ_{ij} ، اختلاف زاویه بین ولتاژ باس i و j است.

در سال ۲۰۱۱، آقای کوک و همکاران [۵۲] پیشنهاد استفاده از یک روش فازوری خطی را برای جبران مشکلات پخش بار DC، در مقابل پخش بار AC دادند در این روش، از توان اکتیو و راکتیو به صورت همزمان استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش عدم قطعیت در تولید به خاطر افزایش تولید بادی، افزایش تعداد خودروهای برقی، و در کل افزایش تعداد منابع تجدیدپذیر هم در سطح انتقال و هم در سطح توزیع، عدم قطعیت در تمام پارامترهای الکتریکی سیستم قدرت بسیار نمایان شده است. در مراجع جدید [۵۳-۵۴] از روش مونت کارلو و یک روش جایگزین تقریب درجه پایین (LRA^{۵۹}) برای کاهش محاسبات استفاده شده است. با روش LRA، عدم قطعیت در تولید بادی، بار و خروج تجهیزات به راحتی مدل می‌شود. اثربخشی این روش بر روی شبکه ۱۱۸ باس IEEE تأیید شده است

۳-۲-۲- معیارهای توقف ایستا

در این قسمت معیارهایی آورده شده است که باعث توقف الگوریتم افزایش انتقال توان می‌شود:

سرعت محاسبات استفاده شده است و این فرض‌ها همیشه واقع‌گرایانه نیستند و به‌طور معمول هر یک از آن‌ها تأثیر قابل توجهی بر دقت ATC دارند. به همین دلیل، نتایج به دست آمده برای شبکه واقعی مناسب نیست. در مقاله بعدی، روش‌های تعیین ATC پویا بررسی شده است و در آنجا نشان داده می‌شود که روش‌های ATC ایستا را می‌توان به‌عنوان حدس اولیه خوبی در تعیین ATC پویا استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Available Transfer Capability
 - ۲ به چگونگی تعیین ATC، ماشین محاسبه می‌گوییم.
- 3 ATC Working Group
- 4 North American Electric Reliability Council
- 5 Transfer Capability
- 6 Transfer Capacity
- 7 Transmission Provider
 - فراهم‌کنندگان انتقال، شرکت‌هایی عمومی می‌باشند که یا صاحب تجهیزات انتقال می‌باشند و یا بر تجارت بین منطقه‌ای توان الکتریکی نظارت دارند.
- 8 Parallel Paths
- 9 Simultaneous ATC
- 10 Non-Simultaneous ATC
- 11 Total Transfer Capability
- 12 Transmission Reliability Margin
- 13 Short-Term Operator Response
- 14 Capacity Benefit Margin
- 15 Operating Horizon
- 16 Planning Horizon
- 17 Non-Recallable Reserved
- 18 Recallable Reserved
- 19 Non-Recallable Scheduled
- 20 Recallable Scheduled
- 21 Existing Commitment
- 22 First Contingency Incremental Transfer Capability
- 23 Non-Recallable Available Transfer Capability
- 24 Recallable Available Transfer Capability
- 25 Surge Impedance Loading
- 26 Transmission Loading Relief
- 27 Unified Power Flow Controller
- 28 Low Voltage Boundary
- 29 Metaheuristic Evolutionary Particle Swarm Optimization
- 30 AC Power Transfer Distribution Factors
- 31 DC Power Transfer Distribution Factors
- 32 Power World Simulator
- 33 Locally Parameterized
- 34 Path-Following
- 35 Monotonic
- 36 Non-Monotonic
- 37 The Ontario Hydro's Probabilistic Composite System
 - Evaluation Program
- 38 General Minimal Residual
- 39 Minimum Distance
- 40 Down-Hil
- 41 Cat optimization algorithm
- 42 Probabilistic TTC
- 43 Data-Driven Sparse Polynomial Chaos Expansion
- 44 Branch and Bound
- 45 Bender Decomposition
- 46 ATC with small-signal stability constraint
- 47 Adaptive Gradient Sampling

۳-۲-۱- محدودیت‌های انتقال توان از خطوط مانند حد حرارتی و حد پایداری ایستا

ساده‌ترین و پرکاربردترین محدودیت در انتقال توان، محدودیت حرارتی خط و حد پایداری استاتیک می‌باشد. از این دو حد، آنکه کمتر باشد به‌عنوان محدودیت اصلی استفاده می‌شود.

۳-۲-۲- واگرایی پخش بار DC

پخش بار DC ساده‌ترین نوع پخش بار می‌باشد و وقتی استفاده می‌شود که بخواهیم با سرعت زیاد، جواب تقریبی برای پخش بار داشته باشیم.

۳-۲-۳- واگرایی پخش بار AC (از جمله فروپاشی ولتاژ)

پخش بار DC دارای دقت کافی برای حل دقیق مساله پخش بار نمی‌باشد. اگر در محاسبات انتقال توان بخواهیم از دقت بیشتری در محدودیت پخش بار استفاده کنیم؛ می‌توان از انواع مختلف پخش بار (نیوتن رافسون، جداسده و جداسده سریع) استفاده کرد.

۳-۲-۴- حدود ولتاژ در هر باس

اگر تغییرات ولتاژ در محاسبه انتقال توان در نظر گرفته شود؛ ابتدایی‌ترین حد ولتاژ، حد ولتاژ باس است؛ بطوریکه هر باس از مقدار نامی خود نباید بیشتر از ۵ درصد تغییرات داشته باشد.

۳-۲-۳- مزایا

با آنکه هر روش و هر مقاله‌ای مزایای مربوط به خود را دارد ولی در اینجا، مزایای مشترک روش‌های ایستا آورده شده است و عموماً با روش‌های دینامیکی که در مقاله بعدی آورده می‌شود مقایسه شده‌اند.

۳-۲-۱- سادگی مساله

عدم استفاده از معادلات دیفرانسیل در روش‌های ایستا باعث شده است که قیودی مانند پایداری گذرا و پایداری دینامیکی ولتاژ در نظر گرفته نشوند و لذا در این روش‌ها، مساله محاسبه ATC ساده و زمان لازم برای محاسبه آن کم شده است.

۳-۲-۲- واضح بودن

به همان دلایل فوق، مساله ATC ایستا علاوه بر سادگی، واضح نیز شده است؛ به این معنی که مهندسین، بر روی مساله تسلط بیشتری دارند و امکان دنبال کردن حل مساله و تغییر در مساله برای بهتر شدن جواب، وجود دارد.

۳-۲-۳- انعطاف‌پذیری

روش‌های ایستا انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش‌های دینامیکی در هنگام تغییر سیستم دارند.

۳-۲-۴- سرعت

به همان دلایل فوق، روش‌های ایستا سرعت بیشتری نسبت به روش‌های دینامیکی برای رسیدن به جواب دارند.

۳-۲-۴- معایب و نقایص

در این قسمت نیز مهم‌ترین معایب و نقایص مشترک روش‌های ایستا آورده شده است.

۳-۲-۱- جواب‌های غیردقیق

به دلیل در نظر نگرفتن حدود دینامیکی برای تعیین ATC، جواب‌های به دست آمده از روش‌های ایستا، همیشه غیر دقیق و خوش‌بینانه می‌باشند (نسبت به روش‌های پویا). به عبارت دیگر اگر در روش ایستا، ATC در یک سیستم P به دست بیاید حتماً به روش پویا، جواب ATC کمتر از P خواهد بود چرا که حدود بیشتری را در نظر می‌گیرد. همچنین به دلیل ساختار غیرخطی سیستم قدرت، امکان جواب نداشتن بعضی از روش‌های ایستا، برای برخی از سیستم‌ها وجود دارد.

۴- نتیجه

در روش‌های تعیین ATC ایستا، از فرضیات ساده‌کننده‌ای برای افزایش

- energy information and communication (ICCPEIC), pp. 375-380, 2018.
- [16] Divya Gupta, Sanjay Kumar Jain, "Available Transfer Capability Enhancement by FACTS Devices Using Metaheuristic Evolutionary Particle Swarm Optimization (MEEPSO) Technique", *Energies*, 14, 869, DOI: 10.3390/en14040869, 2021.
- [17] Britton, Jay, "Newton's Method Load Flow, Improved Area Interchange Control", *IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems*, T-PAS-69, pp. 1577-1581, Oct. 1969.
- [18] Landgren, G.L.; Terhune, H.L.; Angel, R.K., "Transmission Interchange Capability Analysis by Computer", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Sys.*, Vol. PAS-91, No. 6, pp. 2405-2414, Nov/Dec 1972.
- [19] Galiana, F.D., "Limitations on Power and Voltage Variables Imposed By Network Structure", *IEEE Transactions on Power and Apparatus System*, Vol. PAS-95, pp. 1016-1022, Jul/Aug. 1976.
- [20] Ajarapu, V.; Lee, B., "Bibliography on Voltage Stability", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 13, No. 1, pp.115-125, Feb. 1998.
- [21] Ilic, M.D.; Yoon, Y.T.; Zobian, A., "Available Transmission Capacity (ATC) and its Value under Open Access", *IEEE Transactions on Power Systems*, VOL.12, pp.636-645, May 1997.
- [22] Ejebe, G.C.; Tong, J.; Frame, J.; Wang, X.; Tinney, W.F., "Available Transfer Capability Calculations", Preprint Order Number: PE-321-PWRS-0-10-1997, Discussion Deadline: March 1998.
- [23] Hamoud, G., "Assessment of Available Transfer Capability of Transmission Systems", Preprint Order Number: PE-002PRS (09-99), Discussion Deadline: February 2000.
- [24] Eidiani, Mostafa, "Assessment of voltage stability with NEW NRS", 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), Dec. 1-3, Johor Baharu, Malaysia, pp. 494-496, 2008. DOI: 10.1109/PECON4762525.2008..
- [25] Eidiani, Mostafa, "Exact and Efficient Approach in Static Assessment of Available Transfer Capability (ATC)", *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010)*, Nov 18-Dec 1, 2010, , pp. 189- 194, Kuala Lumpur, Malaysia. 2010.
- [26] Eidiani, Mostafa, "Minimum Distance, a Quick and Simple Method of Determining the Static ATC", *Journal of Electrical Engineering: Volume 11, Edition: 2, paper 16*, pp. 95-101, 2011.
- [27] Eidiani, Mostafa, "A Reliable and efficient method for assessing voltage stability in transmission and distribution networks", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol.33, Issue 3, pp. 453-456, March 2011.
- [28] Nireekshana, T, Rao, GK, Raju, SS. "Available transfer capability enhancement with FACTS using cat swarm optimization", *Ain Shams Eng J.* 7(1): 159-167, 2016.
- [29] Xiaoting Wang, Xiaozhe Wang, Hao Sheng, Xi Lin, "A Data-Driven Sparse Polynomial Chaos Expansion Method to Assess Probabilistic Total Transfer Capability for Power Systems with Renewables", *IEEE Transactions on Power Systems*, Early Access, DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3034520, 28 October 2020.
- [30] Dobson, I.; Lu, L., "Computing an Optimum Direction in Control Space to Avoid Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37, pp.1616-1620, No. 10, October 1992.
- [31] Sauer, P. W., "Alternatives for Calculating Transmission Reliability Margin (TRM) in Available Transfer Capability (ATC)", "Proceeding of the Thirty-First Annual (1998) Hawaii International Conference on System Sciences, Vol III, Kona, Hawaii, January, 6-9 p, 89. .1998
- [32] Meliopoulos, A.P.S.; Kang, S.W.; Kokkinides, G., "Probabilistic Transfer Capability Assessment in a Deregulated Environment", *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Copyright (c) 1998 Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- [33] Shaaban, M.; Ni, Y.; Felix, F.Wu., "Transfer Capability Computations in Deregulated Power Systems", *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Copyright (c) 1998 Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- [34] Gravener, M.H., Nwankpa, C.; Yeoh, T.S., "ATC Computational Issues", *Proceeding of the 32nd Hawaii International Conference on System Science*, 1999.
- [35] Grijalva, S.; Sauer, P.W., "Reactive Power Considerations in Linear ATC Computation", *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Science*, 1999.
- 48 Artificial Intelligence techniques
49 Grey Wolf Optimizer
50 Cuckoo Search Algorithm
51 Network Sensitivity Method
52 Branch Outage Distribution Factor
53 Power Transfer Distribution Factor
54 Generator Outage Distribution Factor
55 Stochastic
56 Stochastic Programming With Recourse
57 Chance Constrained Programming
58 Interior Point
59 canonical Low-Rank Approximation

مراجع

« ادامه در صفحه ۶۹

تحلیل و بهبود پراکندگی ساختارهای فراسطح زیر طول موجی

تحلیل دیود تونلی مبتنی بر گرافن

محمدرضا ملک‌فر
اساتید راهنما: دکتر میر مجتبی میر صالحی، دکتر مهرداد شکوه‌صارمی
دانشگاه فردوسی مشهد

مهدی خوش‌باطن
استاد راهنما: دکتر سیدابراهیم حسینی
دانشگاه فردوسی مشهد

با استفاده از برهم‌کنش نور و ماده می‌توان مشخصات نور را کنترل کرد. در این راستا، کاهش تلفات نوری در حین این برهم‌کنش و همچنین کوچک‌سازی ساختار مورد استفاده، از اهمیت بالایی برخوردار است. در بسیاری از این کاربردها نیاز به استفاده از موادی است که در طبیعت یافت نمی‌شوند. بنابراین مباحث مربوط به تحقق و ساخت مواد مصنوعی نیز اهمیت می‌یابد. تغییر ویژگی‌های نوری در عبور از یک سطح با ضخامت بسیار کمتر از طول موج که می‌توان آن را فراماده دوبعدی یا فراسطح نامید نویددهنده آینده‌های روشن برای طراحی و ساخت ادوات نوری در کاربردهای مختلف است.

تحلیل و بهبود پراکندگی از فراسطح‌ها در طول سالیان اخیر همواره مورد توجه بوده است. در این رساله به منظور کاهش تلفات نوری تلاش شده است با تحلیل‌های ریاضی و عددی ابتدا مسئله پراکندگی از یک نانوذره عایق مجزا را مطالعه کرده سپس با ارایه روشی برای مطالعه آرایه‌های متناوب با عناصر زیر طول موجی، بتوان نگاهی عمیق‌تر به پراکندگی از ساختارهای نوری زیر طول موجی متناوب یک‌بعدی/دوبعدی نامحدود کرد. در این رساله، نانودیسک سیلیکونی تمام عایق با ابعاد زیر طول موج به‌عنوان عنصر واحد اصلی در کنترل مشخصات نور در نظر گرفته شده است. ابتدا با استفاده از روش توسعه یافته تقریب دوقطبی گسسته، رفتار دو مد اولیه تشدید یک نانودیسک سیلیکونی مجزا برای حالتی که این تشدیدها در طول موج‌های نزدیک به هم اتفاق می‌افتند بررسی و نشان داده می‌شود که بین ابعاد نانودیسک سیلیکونی و مشخصات تشدیدهای دوقطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی رابطه معنی‌داری وجود دارد. در ادامه با دست یافتن به دانش مذکور یک فراسطح هویگنسی طراحی می‌شود که همزمان با پوشش محدوده فاز $0-\pi$ رادیان مورد نیاز برای سطح هویگنسی، ضریب عبور بیش از ۹۹٪ در کل محدوده فاز را داشته باشد.

تمرکز مطالعات به تک نانوذره و سپس استفاده از نتایج تحلیل آن در یک آرایه، طراح را با محدودیت‌هایی مواجه می‌سازد. برای مثال نادیده گرفتن اثر تزویج مدها در یک آرایه، احتمال تغییر رفتار پراکندگی تک نانوذره، وقتی که در یک آرایه متناوب قرار می‌گیرد را ممکن می‌سازد. بنابراین به منظور یافتن روشی که بتواند رفتار پراکندگی ناشی از مدهای تشدید را در آرایه‌های متناوب مطالعه کرده و تاثیر عوامل مختلف را در آن بسنجد، مطالعات این رساله برای آرایه‌های متناوب از نانوذرات تمام عایق زیر طول موجی گسترش داده می‌شود. ابتدا با استفاده از روش تئوری مد تزویج شده زمانی اثر تشدیدهای الکتریکی و مغناطیسی در ضریب‌های عبور و بازتاب از آرایه‌های متناوب تحلیل می‌شود. سپس با معرفی روش بسط چندقطبی تقریب گسسته دوقطبی ساختارهای متناوب (MPDDA) به مطالعه ساختارهای فراسطح زیر طول موجی تمام عایق متناوب بررسی می‌شود. به این ترتیب که در چهارچوب تقریب دوقطبی گسسته، بسط چندقطبی دکارتی به‌صورت تئوری به یک آرایه متناوب از نانوذرات عایق اعمال می‌شود. این روش زمینه را فراهم می‌کند تا سهم تشدیدهای چندقطبی، از جمله تشدیدهای چنبره‌ای، در طیف پراکندگی آرایه‌ای از نانوذرات با

در این رساله، به طراحی ساختارهای دیود تونلی بر مبنای مواد دوبعدی به ویژه گرافن به همراه تحلیل و مدل‌سازی نتایج خروجی آنها می‌پردازیم. ساختارهای پیشنهادی بر مبنای گرافن، با یبستی بتوانند ویژگی‌های مطلوب را در ابعاد کوچک‌تر محقق نمایند. به عبارت دیگر، دستیابی به دیودهایی که دارای مزیت‌های ابعاد کوچک، جریان قله بالا، جریان دره کم، نسبت جریان قله به دره بالا و حساسیت کم به نقص باشد، از اهدافی است که در این رساله سعی در برآوردن آنها داریم.

در این راستا، دو پیکربندی کلی افقی و عمودی (نشان دهنده جهت غالب عبور جریان) پیشنهاد شده است. چهار ساختار افقی پیشنهادی (با شکل سد تخت، پایبونی ناقص و کامل و لوزی)، مزایای حساسیت کمتر به نقص، PVR بالا، کاهش اثر حالت‌های لبه با انتخاب نوع شکل سد و اثر خازنی کوچک را به دست می‌دهد. در طرف مقابل، دو ساختار عمودی پیشنهادی (با چاه پتانسیل و سد مثلثی)، دارای مزیت‌های جریان حداکثر بالا، انعطاف در بکارگیری نوع ماده سد و حجم اشغالی کوچک است.

شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر تابع گرین نشان می‌دهند که در پیکربندی افقی با پهنا ۱۱، در ساختار با شکل سد پایبونی ناقص به حداکثر جریان ۴۵۰ نانوآمپر و PVR حدود ۴۵۰۰ (به دلیل جریان حالت خاموش بسیار کوچک) و در ساختار با شکل سد لوزی به حداکثر جریان ۱۲۰۰ نانوآمپر با PVR حدود ۳۰۵، به دست می‌آید. مدل ارائه شده‌ی تحلیلی، با معرفی رابطه‌ی اصلاح شده‌ی تخمین WKB به صورت احتساب ضریب تضعیف ناشی از شکل سد و ضریب عدم تقارن، ارایه شده است. همچنین مدل خازنی ساختارها جهت اصلاح موقعیت جریان حداکثر ارایه شده است. در ادامه، با اعمال نقص‌های مختلف فضای خالی لبه، فضای خالی درون صفحه و آرایش خارج صفحه به ساختارهای پیشنهادی، مشاهده می‌گردد که شیب منفی همچنان در نمودار I-V قابل مشاهده است و بنابراین ساختارهای معرفی شده پایداری بالایی دارند.

در پیکربندی عمودی نیز دستیابی به جریان ۱۰ میکروآمپر به همراه PVR حدود ۳ الی ۳٫۵، از نتایج به دست آمده بوده است. در این رساله به موضوع جدید اثرات ترمیونیک حالت‌های واسط می‌پردازیم. بحث در خصوص ریشه‌های شکل‌گیری این نتایج و اثر تغییر پارامترهای مختلف روی نتایج خروجی، از دیگر مباحث مورد توجه در این رساله است. همچنین مدل‌سازی مولفه‌های جریانی با ترکیب معادلات تونل‌زنی و ترمیونیک، از دیگر نوآوری‌های انجام شده است. بررسی پدیده‌های نامتجانس از قبیل کاهش وابستگی جریان به لبه‌های ساختار افقی و نیز اثرات تداخل غیرسازنده ناشی از چندین نانونوار گرافنی در ساختار عمودی با یک سد مسفرین با تحلیل توامان و جدید حوزه انرژی و فضایی ممکن شده است.

کلمات کلیدی:

دیودهای تونلی تشدید، گرافن، فسفرین، ساختارهای افقی، ساختارهای عمودی

◀◀ ادامه در صفحه ۵۱

کنترل گشتاور محرکه موتور القایی دو سیم پیچه با رتور قفس سنجابی بدون حسگر مکانیکی شامل سرعت صفر

مجتبی ایاز خوش هوا
استاد راهنما: دکتر حسین ابوترابی زارچی
دانشگاه فردوسی مشهد

طراحی رویتگر مد لغزشی دینامیکی مقاوم برای ردهای از سیستم‌های غیرخطی با کاربرد در توربین‌های بادی

مهنوش شجیعی
اساتید راهنما: دکتر سید کمال حسینی ثانی، دکتر محمد باقر نقیبه سیستانی
دانشگاه فردوسی مشهد

ماشین‌های القایی قفس سنجابی دو سیم‌پیچ‌های که دارای دو دسته سیم‌پیچ سه‌فاز با تعداد قطب‌های نابرابر بر روی استاتور هستند، توانسته‌اند بر مشکلات مربوط به ناحیه سرعت صفر در ماشین‌های القایی سه‌فاز فایق آیند. این مهم با عملکرد مستقل سیم‌پیچ‌ها و امکان حفظ فرکانس آنها در یک مقدار حداقلی حاصل می‌شود. اما باید در نظر داشت که در صورت استفاده از فریم یکسان، این دسته از ماشین‌های القایی در مقایسه با ماشین‌های القایی سه‌فاز معمولی توان نامی کمتری دارند. این واقعیت، اساسی‌ترین عیب ماشین‌های القایی دو سیم‌پیچه محسوب می‌شود.

در گام نخست این رساله روشی برای طراحی این دسته از ماشین‌های القایی پیشنهاد می‌گردد که در آن ضمن حفظ قابلیت‌های ارزشمند این ماشین، معضل کاهش توان آن تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. درستی این روش با انجام شبیه‌سازی‌هایی در محیط نرم‌افزار ANSYS/MAXWELL و نیز ساخت یک نمونه آزمایشگاهی تصدیق خواهد شد. در ادامه سیستم محرک‌های برای ماشین ساخته شده پیشنهاد می‌شود که حساسیت آن نسبت به تغییر پارامترهای ماشین حداقل باشد. این سیستم کنترل شار و سرعت، بر پایه روش غیرخطی کنترل مود لغزشی درجه دو بوده و طراحی کنترل‌کننده آن با اثبات پایداری لیاپانوف صورت می‌گیرد. همچنین، سیستم پیشنهادی نیازی به حسگرهای مکانیکی سرعت و موقعیت نداشته و مجهز به یک مشاهده‌گر شار و سرعت مبتنی بر روش کنترل مود لغزشی است. به علاوه، در این سیستم شرایط شار بهینه با روشی جدید از طریق انتخاب زاویه تغییر قاب مرجع مناسب تضمین می‌گردد. در سیستم محرکه پیشنهادی به‌منظور کاهش تلفات، سه حالت کاری طراحی شده است: حالت آنسکرون برای کار در ناحیه سرعت صفر، حالت تک سیم‌پیچه برای کار در نواحی غیرصفر و توان‌های کمتر از توان نامی سیم‌پیچ بزرگتر و حالت سنکرون برای توان‌های بالاتر از آن. لازم به ذکر است در این سیستم، مقادیر شار مرجع هر سیم‌پیچ توسط یک الگوریتم MTPA مبتنی بر روش جستجو تعیین می‌گردد. کارایی سیستم محرکه پیشنهادی با پیاده‌سازی عملی آن روی ماشین ساخته شده در یک مجموعه آزمایشگاهی مبتنی بر پردازنده TMS320F28335 بررسی می‌گردد.

بخش پایانی این رساله به ارائه یک مدار معادل الکتریکی دقیق برای ماشین‌های القایی دو سیم‌پیچه با رتور قفس سنجابی می‌پردازد. مدل پیشنهادی در حالت‌های کاری و قاب‌های مرجع مختلف برقرار بوده و با استفاده از آن می‌توان تخمین دقیقی از تلفات هسته در این دسته از ماشین‌های الکتریکی به‌دست آورد. صحت این مدل با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی روی ماشین ساخته شده و شبیه‌سازی مدل الکتریکی آن در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی:

ماشین‌های القایی دو سیم‌پیچه با رتور قفس سنجابی، کنترل مود لغزشی درجه دو، طراحی بهینه با هدف حداقل کاهش توان نامی، استراتژی حداکثر گشتاور به ازای جریان ثابت، سیستم محرکه بدون حسگر سرعت، تخمینگر سرعت مبتنی بر کنترل مود لغزشی، مدل‌سازی تلفات هسته.

در این رساله روش جدیدی برای طراحی رویتگر غیرخطی در قالب تئوری برای سیستم‌های غیرخطی لیبیشیتز پیشنهاد شده است و به همین منظور ساختار دینامیکی جدیدی که همگرایی مجانبی خطای تخمین حالات را تضمین می‌کند ارائه شده است. نوآوری پژوهش، استفاده از بهره دینامیک در طراحی رویتگر مد لغزشی و تضمین شرط پایداری مجانبی است. درجه آزادی اضافی پیشنهادی با این ساختار دینامیکی، برای مواجهه با عامل غیرخطی به کار می‌رود. برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به رویتگرهای مرسوم با بهره ثابت و نیز رویتگر لوبینرگر دینامیکی بررسی شده است. همچنین اثر نوبز فرآیند و نوبز اندازه‌گیری در طراحی نیز مورد توجه قرار گرفته است. طراحی رویتگر برای توربین به دلیل ماهیت غیرخطی دینامیک پره مسئله‌ای چالش برانگیز می‌باشد. با استفاده از پروفایل باد واقعی روند طراحی بر روی توربین صد کیلو وات پژوهش‌کننده هواخورشید با نرم‌افزار شبیه‌سازی توربین بادی (FAST) مورد ارزیابی و آزمون قرار گرفت. با استفاده از طراحی رویتگر مد لغزشی دینامیکی که تا به حال برای توربین بادی به کار نرفته است، ثابت لیبیشیتز افزایش داده شد که معادل افزایش محدوده کاری و افزایش مقاومت رویتگر نسبت به عامل غیرخطی است.

کلمات کلیدی:

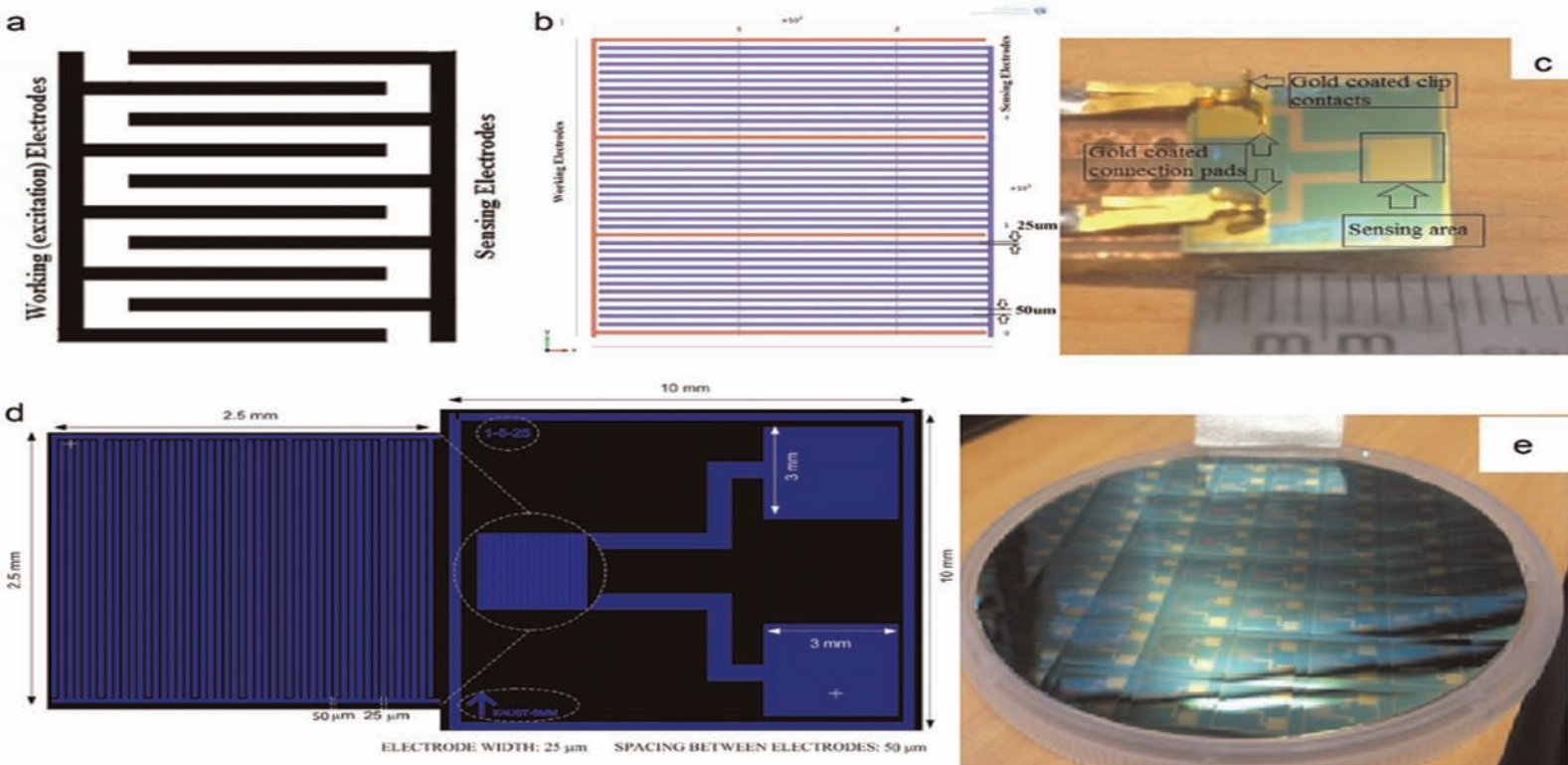
رویتگر مد لغزشی دینامیکی، مقاوم، سیستم غیرخطی لیبیشیتز، سنتز، توربین بادی،

« ادامه از صفحه ۵۰

شکل دلخواه در ساختارهای متناوب نامتناهی یک بعدی یا دوبعدی تجزیه و تحلیل شوند. فرمول‌بندی این روش بر اساس بسط تیلور در سیستم مختصات دکارتی تا پنجمین جمله است که شامل ۱۶- قطبی مغناطیسی و ۳۲- قطبی الکتریکی است. برای بررسی کارایی و دقت روش، مثال‌هایی از یک بازتاب‌دهنده و عبور دهنده پهن باند متشکل از نانودیسک‌های سیلیکون در طول موج فرسرخ مطالعه می‌شود. روش MPDDA ارائه شده در این رساله مسیر جدیدی را برای طراحی و تحلیل انواع جدیدی از ساختارهای فراسطح زیر طول موجی هموار می‌کند.

کلمات کلیدی:

فراسطح‌ها، نانوذرات زیر طول موجی، بسط چندقطبی، تقریب گسسته دوقطبی، آرایه‌های متناوب



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر کاربرد خازن‌های بین انگشتی در سنسورهای خازنی

■ زینب ورع، آزمایشگاه RF MEMS و بیونانو الکترونیک، بخش مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، nazaninzeinab.varaa@yahoo.com

■ مهدیه مهران، آزمایشگاه RF MEMS و بیونانو الکترونیک، بخش مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، m.mehran@uk.ac.ir

چکیده

سنسور المانی است که یک کمیت فیزیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. سنسورهای خازنی به دلیل عملکرد خوب، داشتن حساسیت عالی، طراحی و ساخت آسان و... بیشتر از سنسورهای دیگر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با افزایش تقاضا برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های الکترونیکی بر روی تراشه و نیاز به کوچک‌سازی سنسورها، سنسورهای خازنی مبتنی بر خازن بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. خازن بین انگشتی، از تعدادی زوج الکتروود شانه‌ای بر روی بستر عایق تشکیل می‌شود. این خازن‌ها متداول‌ترین ساختار خازنی مورد استفاده در حوزه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی هستند که ظرفیت و حساسیت آنها در مقایسه با سایر خازن‌ها به نسبت بالاتر است. مزایای خازن‌های بین انگشتی، آن‌ها را به گزینه‌ای محبوب برای کاربرد در سنسورهای مختلف تبدیل کرده است. این مقاله به مروری بر کاربرد خازن‌های بین انگشتی در سنسورهای خازنی مختلف، پرداخته است.

کلمات کلیدی: خازن‌های بین انگشتی، سنسورهای خازنی، سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی

A Review on Application of Interdigital Capacitors in the Capacitive Sensors

■ Zeinab Varaa, RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE) Lab, Department of Electrical Eng., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, nazaninzeinab.varaa@yahoo.com

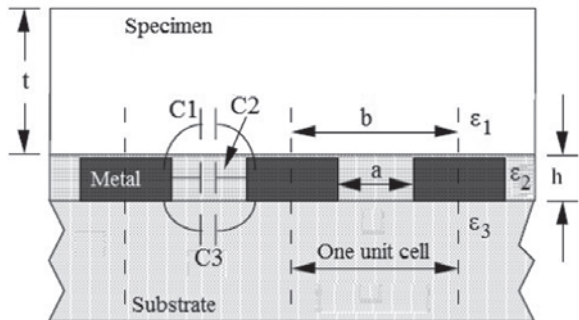
■ Mahdiyeh Mehran, RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE) Lab, Department of Electrical Eng., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, m.mehran@uk.ac.ir

Abstract

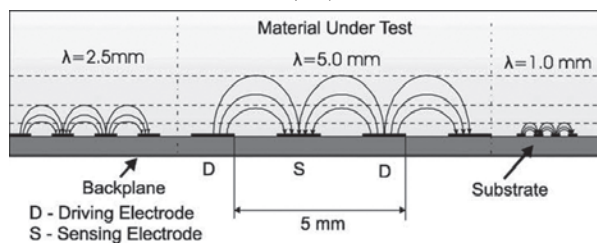
Sensor is a device that converts signals from one physical energy domain to electrical domain. Capacitive sensors have gain lots of attention because of their good performance, excellent sensitivity, easy-to-use principles, ease of manufacturing, etc. Due to the growing demand for the integrated on-chip electronic systems and need for the sensor downscaling, interdigital capacitor type of the sensors has become increasingly popular. These capacitors are the most common used capacitor structures in the micro electro-

mechanical systems and are multi-finger periodic structures on an insulating substrate. Sensitivity and capacitance of the IDTs are relatively higher in comparison with the other capacitors that makes them to an attractive candidate in the sensor applications. This study reviews application of IDTs in the capacitive sensors.

Keywords: Interdigital capacitor, Capacitive sensors, MEMS.



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) مقطع عرضی خازن‌های بین انگشتی [۶] و (ب) خطوط میدان در خازن‌های بین انگشتی برحسب عرض و فاصله بین الکترودها برای سه خازن متفاوت [۸]

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \quad (4)$$

$$k = \frac{a}{b} \quad (5)$$

uc : unit cell*

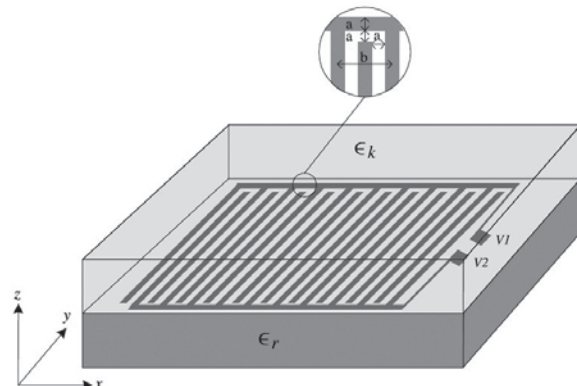
در این روابط h ، L ، C ، N و a به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت کل، تعداد، طول، ضخامت و فاصله بین الکترودها و b مجموع عرض و فاصله بین الکترودها (Pitch) در خازن بین انگشتی نشان داده شده در شکل (۲-الف)، هستند. ϵ_0 ، ضریب گذردهی الکتریکی خلاء، ϵ_1 و ϵ_2 ضرایب گذردهی الکتریکی نسبی ماده قرار گرفته بر رو و بین الکترودها و ϵ_3 ، ضریب گذردهی الکتریکی نسبی بستر را بیان می‌کنند. $K(k)$ تابع انتگرال بیضوی کامل نوع اول است و آرگمان آن با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۷].

در این خازن‌ها حداکثر عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی از سطح الکترودها (λ)، با استفاده از رابطه ۶، محاسبه می‌شود [۸]. با توجه به کاربرد و ابعاد سنسور، برای الکترودها، عرض و فاصله مناسبی انتخاب می‌گردد تا سنسور نسبت به ارتفاع خاصی از ماده دی‌الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودها حساس باشد. شکل ۲-ب، حداکثر عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی در سه خازن بین انگشتی متفاوت با توجه به عرض و فاصله بین الکترودها، نشان داده شده است [۸].

$$\lambda = b \quad (6)$$

۱- مقدمه

سنسورهای خازنی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر خطی بودن خروجی، حساسیت عالی، اصول عملکردی خوب، طراحی و ساخت آسان، کم هزینه بودن و... بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و با تغییر در ظرفیت خازن، پارامترهای مورد نظر را اندازه‌گیری می‌کنند. علاوه بر این سنسورها در برابر دما، رطوبت و اختلالات مکانیکی مقاومند [۱-۳]. با افزایش تقاضا برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های الکترونیکی بر روی تراشه و نیاز به کوچک‌سازی سنسورها، سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. خازن‌های بین انگشتی متداول‌ترین ساختار خازنی مورد استفاده در حوزه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی (Micro electromechanical systems) هستند که نسبت به سایر خازن‌ها (خازن‌هایی که الکترودهای آن‌ها موازی یا برهم عمود هستند) دارای ظرفیت بزرگتری می‌باشند. شکل (۱)، یک ساختار خازن‌های بین انگشتی را نشان می‌دهد [۴ و ۵]. در ادامه به مرور برخی از سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی، می‌پردازیم.



شکل ۱: یک ساختار خازن بین انگشتی [۵]

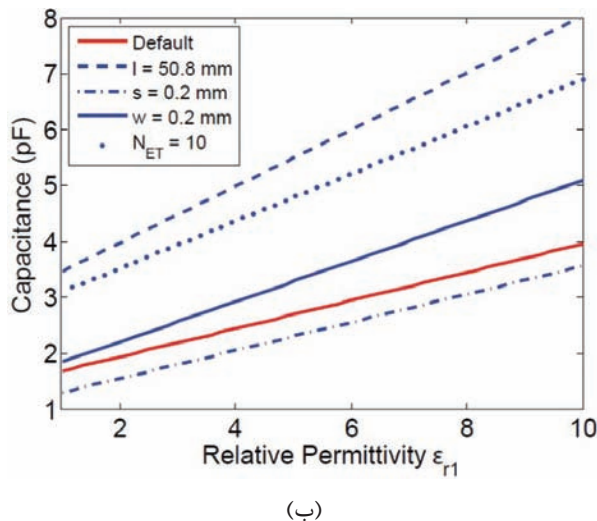
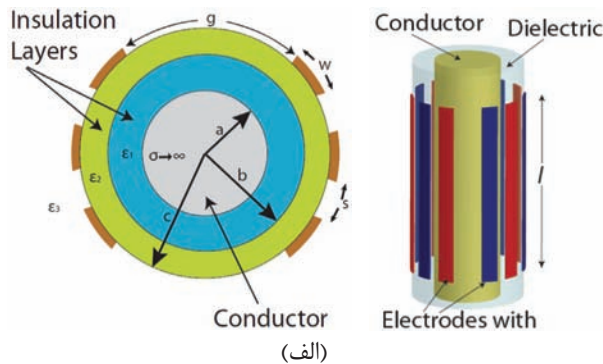
۱-۱- ظرفیت خازن‌های بین انگشتی

با اعمال ولتاژ ترمینال و زمین به الکترودهای خازن بین انگشتی، خطوط میدان الکتریکی از طریق بستر و ماده‌ی دی‌الکتریکی که بین الکترودها و بر روی آنها قرار گرفته است، بسته می‌شوند که خازن‌های کوچکی به وجود می‌آیند. ظرفیت خازن‌های بین انگشتی مجموع همین خازن‌های کوچک است. با اعمال ولتاژ به الکترودها، بین هر دو الکترودهای متوالی خازن بین انگشتی، سه خازن کوچکتر (C_1 ، C_2 و C_3) به وجود می‌آیند که در شکل (۲-الف)، نشان داده شده‌اند. ظرفیت خازن بین انگشتی را می‌توان با استفاده از روابط ۱ تا ۵، به دست آورد [۶].

$$C = C_{uc} (N-1)L \quad (1)$$

$$C_{uc} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2)$$

$$C_1 + C_3 = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K\sqrt{1-k^2}}{K(k)} \quad (3)$$



شکل ۳: (الف) سنسور خازنی بین انگشتی برای تشخیص معیوب بودن عایق سیم و (ب) تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب ضریب گذردهی نسبی عایق (به طور پیش فرض $l=50.8\text{mm}$, $N_{ET}=10$, $w=s=0.2\text{mm}$, $\epsilon=25.4$) [۱۰].

می‌گردد. تغییر در ضریب گذردهی نسبی عایق کابل‌ها، سبب تغییر در شدت میدان و ظرفیت خازن‌های بین انگشتی می‌شود؛ بنابراین، با اندازه‌گیری ظرفیت خازن می‌توان میزان رطوبت، ضخامت، تراکم و دیگر خواص فیزیکی عایق کابل را شناسایی کرد. نمودار شکل (۴-ب)، تغییرات ظرفیت خازنی، طول یکسانی از ۳ کابل را برای حالت‌هایی که حفره‌های عایق با آب و یا هوا پر شده‌اند، نسبت به حالتی که عایق کابل سالم است را نشان می‌دهد [۱۱].

۲-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسورهای رطوبت‌سنج

سنسورهای رطوبت‌سنج به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند هواشناسی، کشاورزی، کنترل صنعتی، پزشکی و غیره استفاده می‌شوند. اندازه‌گیری و کنترل رطوبت در فرآیندهای صنعتی، محصولات کشاورزی و آزمایش‌های تحقیقاتی از اهمیت زیادی برخوردار است. انواع مختلف سنسورهای رطوبت‌سنج براساس روش‌هایی نظیر خازنی، مقاومتی و غیره توسعه یافته‌اند. با این حال علم و فناوری در حال پیشرفت به سمت سنسورهای رطوبت‌سنجی با حساسیت بهتر، محدوده اندازه‌گیری وسیع‌تر، پاسخ سریع‌تر، زمان بازیافت کوتاه‌تر و هزینه کمتر است [۱۲].

اندازه‌گیری رطوبت به‌صورت نسبی انجام می‌شود. رطوبت نسبی (RH)، نسبت رطوبت مطلق (Pv) به رطوبت اشباع (Ps) در یک دما، می‌باشد. به‌عبارت دیگر نسبت بخار آب موجود در حجم معینی از هوا در یک دما، به بیشترین بخار آبی که می‌توان در همان حجم و دما داشت. رطوبت نسبی یک مقدار وابسته به دما است و اندازه‌گیری آن

۲- سنسورهای خازنی بین انگشتی با الکتروود ثابت

در بسیاری از سنسورهای خازنی بین انگشتی هر دو الکتروود خازن بین انگشتی بر روی بستر، ثابت هستند و قابلیت جابه‌جایی ندارند. روابط (۱)، (۳) و (۴)، نشان می‌دهند ظرفیت خازن‌های بین انگشتی با ضریب دی‌الکتریک قرار گرفته بر رو و بین الکتروودها (ϵ_1 و ϵ_2) و طول الکتروودها (L) رابطه‌ی مستقیم دارد. با تغییر در طول الکتروودها یا ضریب دی‌الکتریک قرار گرفته بر رو و بین آنها، ظرفیت این خازن‌ها تغییر می‌کند و با توجه به تغییرات ظرفیت خازن می‌توان برخی از پارامترها را اندازه گرفت. در برخی از سنسورهای خازنی بین انگشتی با استفاده از دی‌الکتریک مایع می‌توانند برخی از پارامترها نظیر ارتفاع و ثابت دی‌الکتریک مایعات، میزان قند در محلول قندی و... را اندازه‌گیری کنند [۹].

بخش‌های بعدی به تعدادی از این قبیل سنسورهای خازنی بین انگشتی می‌پردازد.

۲-۱- استفاده از خازن بین انگشتی برای تشخیص آسیب عایق سیم و کابل

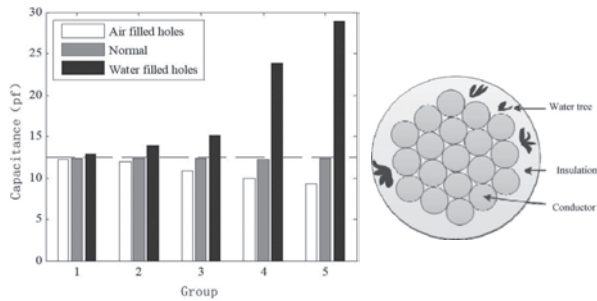
۲-۱-۱- تشخیص معیوب بودن عایق سیم

سیم‌های عایق‌دار در طول زمان استفاده، در معرض انواع مختلف تاثیرات مخرب از قبیل رطوبت، دمای شدید و فشارهای مکانیکی هستند. معیوب شدن سیم‌ها در برخی از دستگاه‌ها و مکان‌ها مانند راکتورهای هسته‌ای، هواپیما و غیره می‌تواند بسیار خطرناک و حتی کشنده باشد، زیرا این سیم‌ها می‌توانند حامل سیگنال‌های هدایت و کنترل باشند. برای بررسی ویژگی عایق‌بندی سیم‌ها تعداد کمی از تست‌کننده‌های تجاری در دسترس‌اند. در برخی از تکنیک‌های تشخیص معایب عایق‌بندی یک سیم، نیاز به دسترسی هادی مرکزی است که ممکن است به دلیل ولتاژ بالای آن، امکان‌پذیر نباشد یا عایق سیم در طی فرایند تشخیص معیوب بودنش، بیشتر تخریب شود.

با استفاده از خازن بین انگشتی می‌توان معیوب بودن عایق سیم را تشخیص داد. شکل (۳-الف)، نمایی از این سنسور را نشان می‌دهد. الکتروودهای خازن بین انگشتی بر روی عایق قرار می‌گیرند. اگر عایق سیم معیوب شود، ضریب گذردهی نسبی آن تغییر می‌کند. تغییر در ضریب گذردهی نسبی عایق سیم‌ها سبب تغییر در ظرفیت خازن می‌شود. این سنسور مستقل از ولتاژ اعمالی به الکتروودها بوده و نیاز به دسترسی مستقیم به هادی مرکزی ندارد که یکی از مزیت‌های آن محسوب می‌شود. با توجه به حساسیت سیستم تعداد، عرض و فاصله الکتروودها را می‌توان متفاوت انتخاب کرد. نمودار شکل (۳-ب)، ظرفیت خازن بین انگشتی را بر حسب گذردهی نسبی عایق به ازای مقادیر مختلف و مشخص طول (l)، عرض (w)، تعداد (N) و فاصله (s) بین الکتروودها، نشان می‌دهد [۱۰].

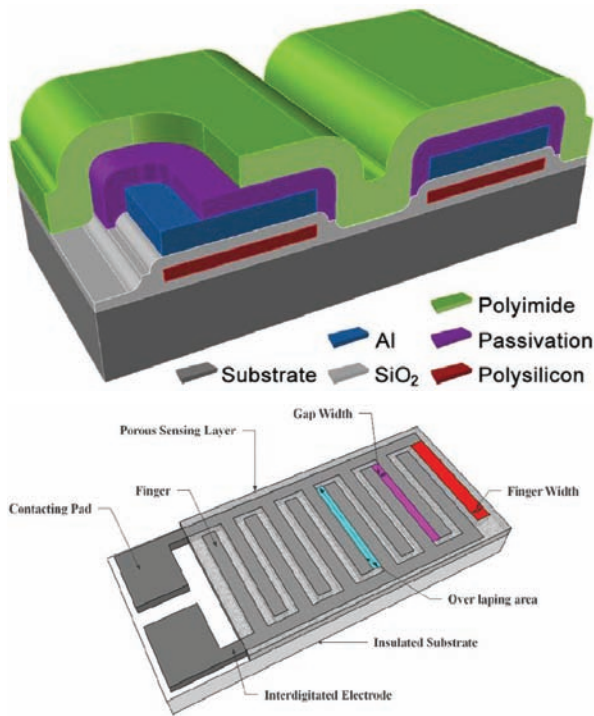
۲-۱-۲- تشخیص آسیب در عایق کابل‌های برق

کابل‌های برق بر امنیت شبکه‌های برق تاثیرگذار هستند. عایق کابل‌ها بر اثر رطوبت، استرس مکانیکی و برخی از عوامل القاء، ممکن است دچار تخریب شوند. برای مثال شکل (۴-الف)، نشان‌دهنده آب در میان عایق کابل برق است. می‌توان با به‌کارگیری روش‌هایی نظیر تخلیه جزئی، ابرسانی یا جریان‌نشستی، معیوب بودن کابل را تشخیص داد که نیاز به تجهیزات خاص و عملیات پیچیده دارد. استفاده آسان و کارآمد از سنسور خازنی بین انگشتی در شناسایی آسیب کابل‌های برق، آن را نسبت به سایر روش‌های تشخیص متمایز کرده است [۱۰]. الکتروودهای خازن‌های بین انگشتی بر روی بدنه کابل‌ها قرار گرفته و سیگنال تحریک با یک فرکانس خاصی به آنها اعمال می‌شود، در نتیجه بین الکتروودهای خازن بین انگشتی میدان الکتریکی برقرار

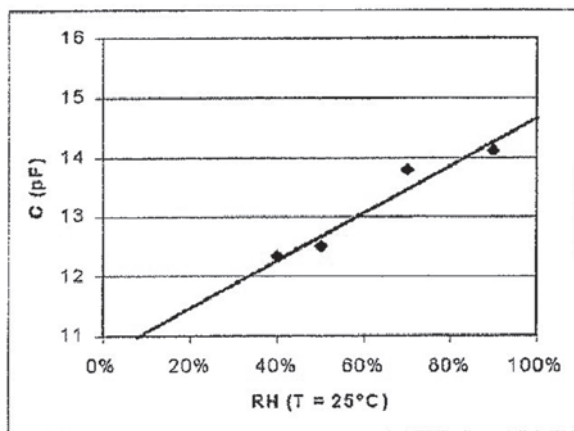


(الف) (ب)

شکل ۴: (الف) حضور آب درون کابل و (ب) مقایسه ظرفیت خازنی برای سه حالت، کابل سالم و کابلی که عایق آن با هوا یا آب پر شده باشد [۱۱]



(الف)



(ب)

شکل ۵: (الف) سنسور رطوبت-سنج با استفاده از لایه جاذب رطوبت [۱۳، ۱۲] و (ب) ظرفیت خازن برحسب رطوبت نسبی موجود در دمای ۲۵°C [۱۵]

به صورت درصد و مطابق با رابطه (۷)، بیان می‌شود [۱۳].

$$RH\% = \frac{P_p}{P_s} \times 100 \quad (7)$$

انواع مختلفی از سنسورهای رطوبت-سنج برای کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی ساخته شده‌اند. در این میان، سنسورهای رطوبت خازنی به دلیل حساسیت بالا، کم‌مصرف بودن و هزینه پایین بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بخش‌های بعدی به نمونه‌هایی از رطوبت-سنج‌های مبتنی بر خازن‌های بین‌انگشتی می‌پردازیم.

۲-۲-۱- سنسور رطوبت-سنج با استفاده از یک لایه جاذب

در این نمونه از سنسورهای رطوبت-سنج، الکترودهای خازن بین‌انگشتی بر روی یک بستر شیشه‌ای یا سرامیکی قرار داده می‌شوند. بر روی الکترودها یک ماده جاذب رطوبت نظیر پلی‌آمید (لایه حساس به رطوبت) قرار می‌گیرد. ضریب گذردهی لایه حساس، با جذب رطوبت افزایش می‌یابد. با توجه به میزان رطوبت محیط، ظرفیت خازن تغییر می‌کند. قسمت‌های (الف) و (ب) از شکل (۵)، به ترتیب ساختار یک سنسور رطوبت-سنج خازنی و نمودار ظرفیت خازن بین‌انگشتی برحسب رطوبت اندازه‌گیری شده در دمای ۲۵°C را نشان می‌دهد [۱۲-۱۵].

۲-۲-۲- سنسور رطوبت-سنج بر روی بستر اکسید آلومینیوم

در نمونه‌ای دیگر از رطوبت-سنج‌های خازنی بین‌انگشتی، الکترودها بر روی بستری از اکسید آلومینیوم (لایه حساس به رطوبت) که دارای حفره‌های نانومتری است، قرار می‌گیرند. شکل (۶-الف)، ساختار این سنسور را نشان می‌دهد. حفره‌های نانومتری بستر، سطح بزرگ‌تری را برای جذب رطوبت ایجاد می‌کنند. با ضخیم شدن لایه‌ی اکسید آلومینیوم سطح تماس افزایش می‌یابد که سبب بیشتر شدن حساسیت سنسور می‌شود. همچنین اگر الکترودها نیز متخلخل شوند، حساسیت سنسور نسبت به الکترودها بدون تخلخل، بیشتر می‌شود. الکترودها می‌توانند به صورت مستطیلی یا مارپیچی بر روی بستر قرار گیرند. پسماند مغناطیسی (Hysteresis) در حالتی که الکترودها مستطیلی شکل هستند نسبت به حالت مارپیچی، بیشتر است اما در این حالت حساسیت بیشتر می‌باشد. اگر بتوان پسماند مغناطیسی را در حالتی که الکترودها مستطیلی شکل هستند، با کنترل عوامل طراحی یا گرمایش کاهش داد، زمان پاسخ و وابستگی سنسور به دما، بهبود می‌یابد [۱۶]. خروجی این سنسور رطوبت-سنج در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود.

۲-۲-۳- سنسور رطوبت SAW مبتنی بر اکسید گرافن

سنسورهای SAW (Surface acoustic wave)، از دو خازن بین‌انگشتی قرار گرفته بر روی یک بستر پیزوالکتریک ایجاد می‌شوند. اگر به موادی با خاصیت پیزوالکتریک نیروی خارجی (کشش، فشار و...) اعمال شود دو قطبی‌های این مواد تحریک و سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شوند. این خاصیت به صورت معکوس نیز در این مواد وجود دارد. از مواد پیزوالکتریک در مبدل‌ها یا وسایلی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند یا برعکس، استفاده می‌شود. زمانی که یک سیگنال الکتریکی با دامنه و فرکانس معین به خازن اول اعمال می‌شود، در سطح بستر پیزوالکتریک یک موج سطحی منتشر می‌شود. این موج از طریق بستر پیزوالکتریک به خازن دوم منتقل می‌شود. هنگامی که سیگنال به خازن دوم می‌رسد، دامنه و فرکانس آن در شرایط نرمال (هیچ اثر مکانیکی از خارج بر بستر پیزوالکتریک وارد نشود) به طور تقریبی برابر با سیگنال اعمال شده به خازن اول است. اما با اعمال کمیت‌هایی نظیر فشار، کشش، دما و... بر بستر پیزوالکتریک، فرکانس و دامنه سیگنال دریافتی در خازن

دوم متناسب با تغییر مکانیکی اعمال شده به بستر پیزوالکتریک تغییر می‌کند. حال اگر بر روی بستر پیزوالکتریک بین دو خازن، ماده جاذب آنالیت مورد نظر قرار گیرد، بسته به میزان آنالیت موجود در محیط، فرکانس سیگنال دریافتی در خازن دوم نسبت به فرکانس سیگنال اعمالی به خازن اول تغییر می‌کند. از این رو می‌توان طیف وسیعی از سنسورها را طراحی کرد [۱۷-۱۹].

ساختار سنسور رطوبت SAW، در شکل (۷-الف)، قابل مشاهده است. دو خازن بین انگشتی بر روی یک بستر پیزوالکتریک قرار دارند و بین آنها لایه‌ای جاذب رطوبت (اکسید گرافن) قرار داده می‌شود. سیگنالی با دامنه و فرکانس معلوم به خازن اول اعمال می‌شود. با توجه به میزان رطوبت محیط، لایه جاذب رطوبت، (اکسید گرافن) باعث تغییر مکانیکی در بستر پیزوالکتریک می‌شود. به این ترتیب فرکانس دریافتی در خازن دوم تغییر می‌کند که از روی میزان تغییرات در فرکانس سیگنال دریافتی در خازن دوم، می‌توان میزان رطوبت نسبی را اندازه‌گیری کرد. نمودار شکل (۷-ب)، تغییرات فرکانس دریافتی را بر حسب رطوبت نسبی محیط نشان می‌دهد. در بسیاری از برنامه‌های کاربردی به دلیل طراحی ساده و حساسیت عالی سنسورهای رطوبت SAW مبتنی بر اکسید گرافن، از آن‌ها استفاده شود [۲۰].

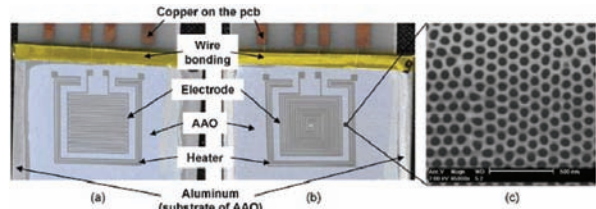
۳-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور گاز

سنسورهای گاز خازنی، دارای زمان پاسخ‌دهی کوتاهی هستند. این سنسورها به دما وابسته‌اند و برای آن‌ها، باید دمای کاری مناسبی تعریف کرد. سنسورهای خازنی بین انگشتی می‌توانند گازهای بسیار خطرناک مونوکسید کربن و دی اکسید گوگرد را در محیط شناسایی کنند. در این سنسورها، از گروه‌های آمینو به‌عنوان لایه حساس، استفاده شده است که بر رو و بین الکترودها لایه نشانی می‌شود. شکل (۸-الف)، ساختار سنسور گازی را با استفاده از خازن بین انگشتی، نشان می‌دهد. زمانی که گاز مورد نظر به درون محفظه پمپ می‌شود، ضریب گذردهی نسبی لایه حساس با جذب گاز مورد نظر، تغییر کرده و باعث تغییر در ظرفیت خازن بین انگشتی می‌شود که با توجه به آن می‌توان، غلظت گاز مورد نظر در محفظه را اندازه گرفت. حساسیت این سنسورهای خازنی گاز را می‌توان با تغییر در هندسه آن‌ها بهبود بخشید. در حالت بهبود داده شده، لایه حساس را فقط بین دو الکتروود قرار می‌دهند. شکل (۸-ب) خروجی یک سنسور گاز را بر حسب غلظت‌های مختلف گاز دی اکسید گوگرد با توجه به فاصله بین الکتروودها، نشان می‌دهد [۲۱-۲۳].

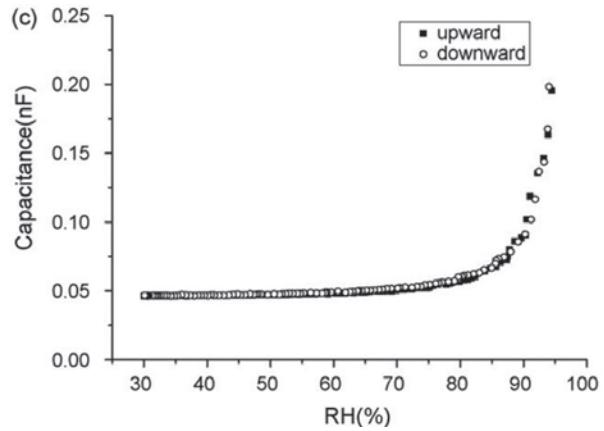
۴-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور شیمیایی

گونه‌های مختلف شیمیایی نظیر اتم‌ها، مولکول‌ها و یون‌ها را که در یک فرآیند شیمیایی تولید می‌شوند می‌توان با استفاده از روش‌هایی نظیر تغییر در مقاومت و خازن، تغییر در فرکانس رزونانس کانتیلور (cantilever) و... شناسایی کرد. در روش خازنی، لایه‌ای نازک از پلیمر بر روی صفحات خازن قرار می‌گیرد. استفاده از خازن بین انگشتی پوشش داده شده با پلیمر، یکی از ساده‌ترین ابزارها برای سنسورهای شیمیایی است، همچنین هزینه ساخت آن‌ها کم بوده و به حداقل پردازش نیاز دارند. شکل (۹-الف)، ساختار کلی سنسور شیمیایی با استفاده از خازن بین انگشتی را، نشان می‌دهد [۲۴].

در این سنسور، لایه‌ای نازک از پلیمر، بر روی الکترودهای خازن بین انگشتی قرار می‌گیرد. با قرار گرفتن سنسور در معرض آنالیت مورد نظر، ضریب دی‌الکتریک پلیمر تغییر کرده و باعث تغییر در ظرفیت خازن بین انگشتی می‌شود. شکل (۹-ب)، نمودار خروجی سنسور را در غلظت‌های مختلف و برای چهار ماده‌ی (متانول، اتانول، بخار آب و بخارات تولوئن)، ارایه می‌دهد [۲۴].

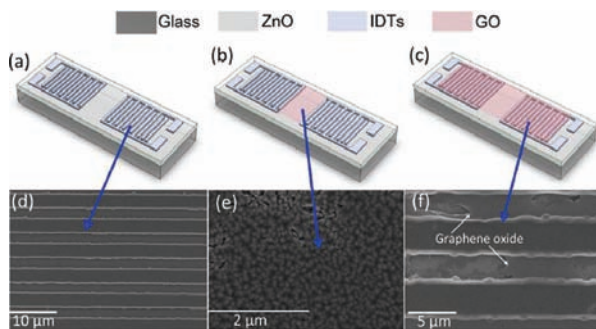


(الف)

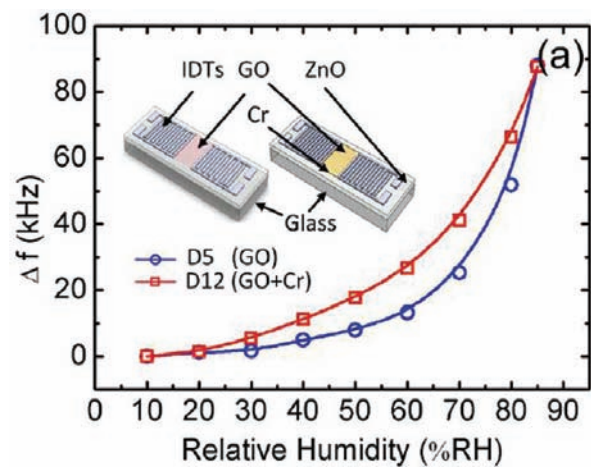


(ب)

شکل ۶: (الف) قرارگیری الکترودهای خازن بین انگشتی بر روی بستر اکسید آلومینیوم و (ب) نمودار تغییرات ظرفیت خازن بر حسب رطوبت محیط [۱۶]

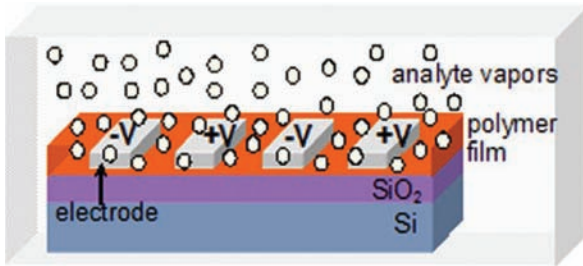


(الف)

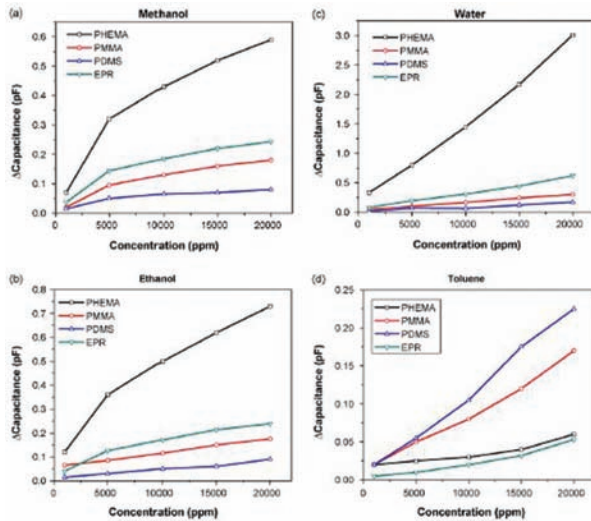


(ب)

شکل ۷: (الف) تصویری از سنسور رطوبت‌سنج SAW و (ب) تغییرات فرکانس بر حسب میزان رطوبت نسبی محیط [۲۰]



(الف)



(ب)

شکل ۹: (الف) تصویری از سنسور شیمیایی با استفاده از خازن بین انگشتی و (ب) نمودارهای تغییرات ظرفیت خازن در غلظت‌های مختلف برای چهار ماده متانول، اتانول، بخار آب و بخارات تولوئن [۲۴]

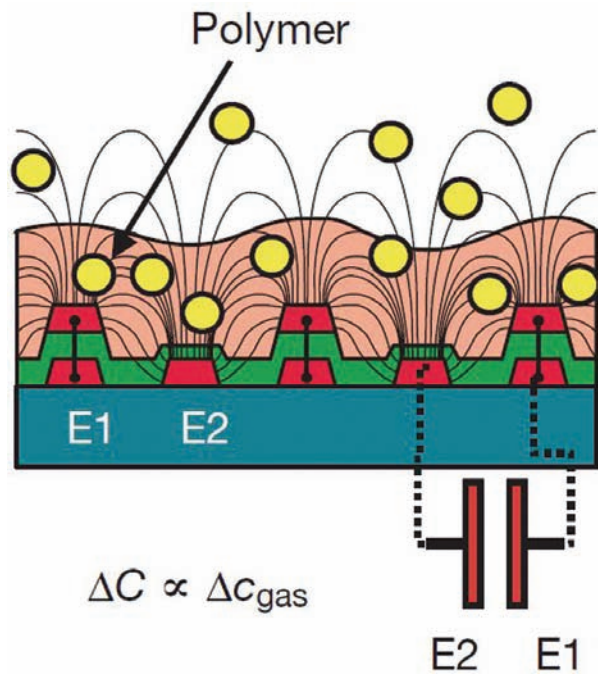
موردنظر دست یافت [۲۵-۲۸].

شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب تصویری از سطح بیوسنسور و خروجی آن بر حسب غلظت باکتری موجود در محیط در سه فرکانس متفاوت را نشان می‌دهد [۲۷-۲۸].

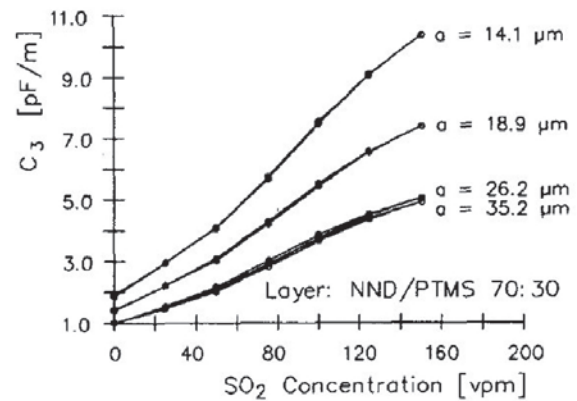
۲-۶- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور جابه‌جایی

از سنسورهای جابه‌جایی برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی یک جسم متحرک یا اندازه‌گیری طول و عرض یک جسم استفاده می‌شود. در این سنسورها از خازن بین انگشتی می‌توان بهره برد. شکل (۱۱-الف)، تصویری از سنسور جابه‌جایی با استفاده از خازن بین انگشتی را نشان می‌دهد. این سنسور با استفاده از فناوری ساخته شده است [۲۹].

LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramics) در دو طرف خازن دو نگهدارنده قرار دارد که با کمک آن‌ها، صفحه دی الکتریک قرارگرفته بر روی خازن، قابلیت تحرک می‌یابد و تشخیص جابه‌جایی با تغییر موقعیت این صفحه، انجام می‌پذیرد. زمانی که صفحه متحرک به الکترودهای خازن نزدیک یا از آن‌ها دور می‌شود، خطوط میدان الکتریکی عبوری از آن تغییر کرده و باعث تغییر در ظرفیت خازن می‌شود. اما باید توجه داشت که این سنسور توانایی اندازه‌گیری فواصل معینی را دارد، زیرا اگر فاصله صفحه دی الکتریک متحرک از خازن بین انگشتی، از یک حد بیشتر شود، خطوط میدان الکتریکی دیگر از این صفحه عبور نمی‌کنند که این امر منجر به ثابت شدن ظرفیت خازن می‌شود. برای مثال در طراحی این سنسور، مجموع عرض و فاصله بین الکترودها (b)، $500 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است؛ بنابراین طبق رابطه ۶، حداکثر میزان عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی



(الف)



(ب)

شکل ۸: (الف) مقطع عرضی از یک سنسور گاز میتنی بر خازن بین انگشتی [۲۳] و (ب) خروجی سنسور برای غلظت‌های مختلف گاز دی اکسید گوگرد به ازای

فاصله بین الکترودهای مختلف [۲۲]

۲-۵- استفاده از خازن بین انگشتی در بیوسنسورها

از خازن‌های بین انگشتی برای شناسایی ویروس‌ها، باکتری‌ها، سموم یا سایر عواملی که مضر بوده و موجب بیماری یا مرگ در افراد، حیوانات و گیاهان می‌شوند، می‌توان استفاده کرد. همچنین با استفاده از آن‌ها می‌توان به بررسی چگونگی وقوع واکنش‌های شیمیایی در سلول‌ها، بافت‌ها و ارگان‌ها پرداخت. با استفاده از آنتی‌ژن‌ها، آنتی‌بادی‌ها یا دنبال کردن DNA می‌توان بیماری‌های ژنتیکی و عفونت‌های ویروسی را تشخیص داد. برای استفاده از خازن‌های بین انگشتی در کاربردهای بیوسنسوری، باید بر روی الکترودهای آنها، لایه‌ای از آنتی‌ژن یا آنتی‌بادی قرار داد. زمانی که این سنسورها در تماس با ماده‌ی تحت بررسی قرار گیرند، آنالیت مورد نظر، جذب آنتی‌ژن‌ها یا آنتی‌بادی‌های قرار گرفته بر روی الکترودها می‌شوند؛ بنابراین ضریب دی الکتریک خازن تغییر می‌کند که این خود سبب تغییر در ظرفیت خازن می‌شود که از روی می‌توان به مقدار آنالیت وجود در محیط

این سنسور افزایش یا کاهش فشار سبب تغییر در طول الکترودهای خازن بین‌انگشتی شده، در نتیجه ظرفیت خازن و فرکانس رزونانس مدار تغییر می‌کند. نتایج آزمون نشان می‌دهند که با افزایش فشار، فرکانس رزونانس به صورت خطی کاهش می‌یابد که در شکل (۱۳-الف) قابل مشاهده است [۳۰].

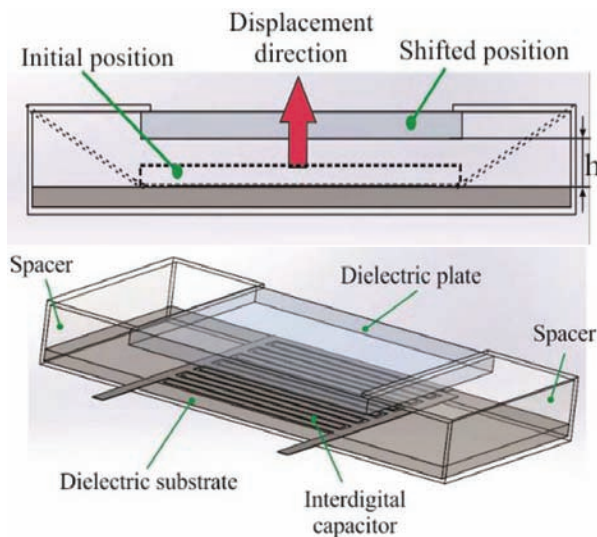
$$L_s = \frac{\mu n^2 d_{avg}}{2} \left[\ln \left(\frac{2.46}{P_s} \right) + 0.2 P_s^2 \right] \quad (8)$$

$$C_s = L_c (N_c - 1) \epsilon_0 \frac{1 + \epsilon_r k \left[(1 - (g_c / (w_c + g_c))^2)^{1/2} \right]}{2K(g_c / (w_c + g_c))} \quad (9)$$

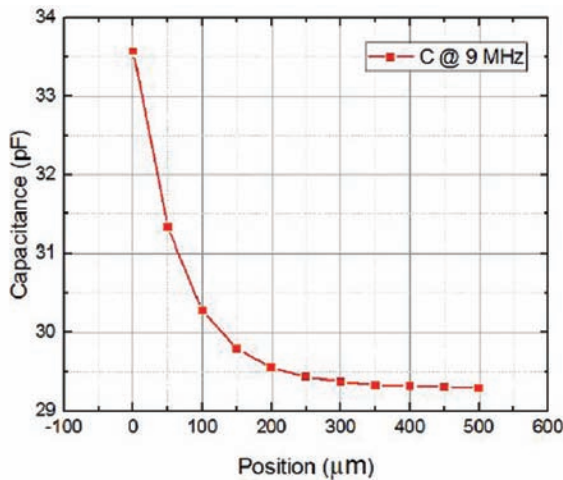
$$P_s = d_{out} - \frac{d_{in}}{d_{out}} + d_{in} \quad (10)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} \quad (11)$$

برای بررسی عملکرد این سنسور فشار در دمای بالا، از سیم تنگستن

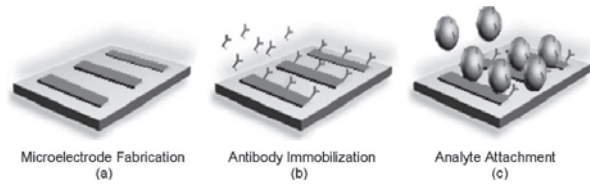


(الف)

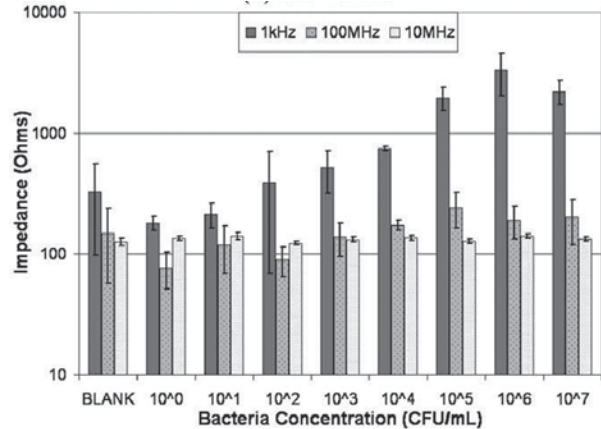


(ب)

شکل ۱۱: (الف) تصویری از یک سنسور جابجایی بر اساس خازن بین‌انگشتی و (ب) خروجی سنسور خازنی برحسب مکان صفحه دی‌الکتریک متحرک [۲۹]



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: (الف) تصویری از سطح بیوسنسور [۲۷] و (ب) خروجی سنسور بر حسب غلظت‌های مختلف باکتری موجود در محیط در سه فرکانس ۱ kHz، ۱۰ MHz و ۱۰۰ MHz [۲۸]

(λ) ۵۰۰ μm است. به منظور اطمینان از بسته شدن خطوط میدان الکتریکی از طریق صفحه دی‌الکتریک متحرک، ضخامت این صفحه، بیش از ۵۰۰ μm در نظر گرفته شده است. شکل (۱۱-ب)، خروجی سنسور خازنی برحسب مکان صفحه دی‌الکتریک متحرک را نشان می‌دهد [۲۹].

۷-۲- استفاده از خازن‌های بین‌انگشتی در سنسور فشار

سنسور فشار خازنی بین‌انگشتی بر پایه فناوری LTCC ساخته شده است. از این سنسور برای اندازه‌گیری فشار در محیط‌های با دمای بالا یا در محیط‌هایی که گاز خطرناک وجود دارد، می‌توان استفاده کرد. ساختار این سنسور شامل یک سلف ثابت و خازن متغیر است و از هیچ‌گونه منبع تغذیه‌ای نظیر باتری، استفاده نمی‌شود، بنابراین احتمال وقوع جرقه الکتریکی در محیط وجود ندارد. قسمت‌های الف و ب در شکل (۱۲)، به ترتیب مدار و ساختار این سنسور را نشان می‌دهد [۳۰].

الکترودهای خازن‌های بین‌انگشتی بر روی یک بستر انعطاف‌پذیر قرار دارند که افزایش یا کاهش فشار سبب تغییر در طول الکترودهای خازن شده و ظرفیت خازنی به صورت خطی و متناسب با آن تغییر می‌کند ولی مقدار سلف ثابت است. روابط (۸) و (۹) به ترتیب بیانگر مقدار سلف ثابت (L_s) و خازن متغیر (C_s) هستند. در رابطه (۸)، μ, n, d_{avg} به ترتیب نشان‌دهنده هدایت مغناطیسی در خلاء، تعداد دورهای سیم پیچ و میانگین قطر خارجی و داخلی سلف هستند. PS با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود که در آن d_{in} و d_{out} به ترتیب قطرهای خارجی و داخلی سلف، هستند. در رابطه (۹)، از طول (L_c)، تعداد الکترودها (N_c)، ضریب گذردهی الکتریکی خلاء (ε₀)، ضریب نسبی گذردهی بستری که الکترودها بر روی آن قرار دارند (ε_r)، فاصله بین الکترودها (g_c)، عرض الکترودها (w_c) و انتگرال بیضوی کامل نوع اول K(k) استفاده شده است. این سنسور تغییرات فشار را با توجه به تغییرات فرکانس رزونانس (f_H) تشخیص می‌دهد. فرکانس رزونانس مطابق با رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. بنابراین در

استفاده شده است. دمای آزمایش بین ۲۵ °C تا ۶۰۰ °C است. رابطه بین فشار و دما در نمودار (۱۳-ب)، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که فرکانس رزونانس سنسور با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد [۳۰].

۳- سنسورهای خازنی بین‌انگشتی با استفاده از الکترومد متحرک

در سنسورهایی که تاکنون در این مقاله مرور شدند، الکترومدهای خازن‌های بین‌انگشتی بر روی بستری ثابت بودند، اما در برخی از کاربردها، یکی از الکترومدهای این خازن‌ها ثابت و دیگری متحرک است که با جابه‌جایی الکترومد متحرک، ظرفیت خازن تغییر می‌کند. در ادامه به مرور نمونه‌ای از این قبیل سنسورها می‌پردازیم.

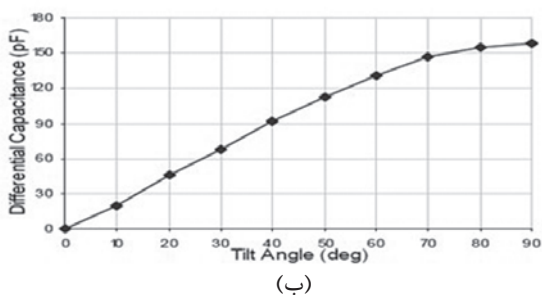
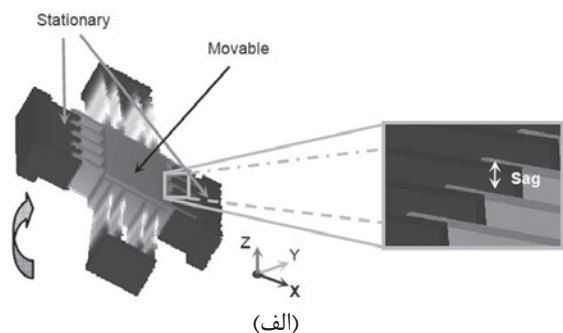
۳-۱- استفاده از خازن بین‌انگشتی در سنسور زاویه

ساختار یک سنسور خازنی شیب در شکل (۱۴-الف)، نشان داده شده است. در این سنسور تعدادی از الکترومدها به یک جرم معلق متصلند که قابلیت حرکت دارند و در مقابل آن‌ها الکترومدهای ثابتی وجود دارند. زمانی که این سنسور در معرض زاویه (شیب) قرار گیرد، نیروی گرانش وارد شده به جرم معلق، باعث جابه‌جایی آن می‌شود. بنابراین الکترومدهای متصل به جرم معلق تغییر موقعیت داده و ظرفیت خازن‌های بین‌انگشتی را تغییر می‌دهند. این جابه‌جایی سبب افزایش ظرفیت خازن در یک جهت و کاهش ظرفیت خازن در طرف مقابل می‌شود. خروجی سنسور را می‌توان با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه کرد که در شکل (۱۴-ب) ارائه شده است [۳۱].

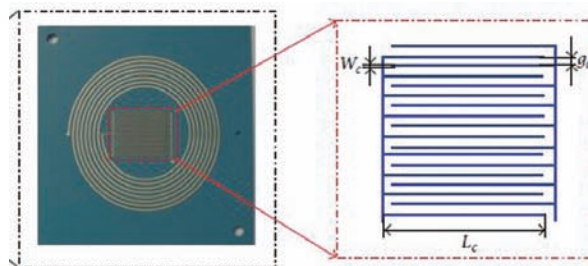
$$C = \frac{(l_0 \pm \Delta x)h\epsilon N}{G} = \frac{A_0\epsilon N}{G} \quad (12)$$

$$\Delta x = mg \sin(\theta) / k_x \quad (13)$$

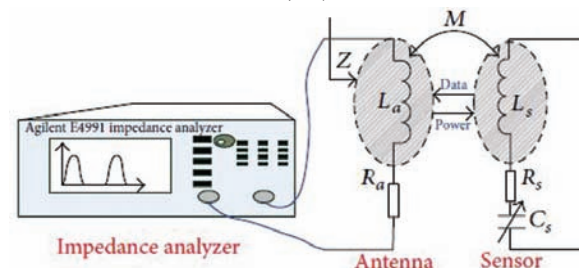
در روابط (۱۲) و (۱۳)، l_0 طول اولیه همپوشانی الکترومدهای خازن، A_0 سطح اولیه همپوشانی و h ضخامت این الکترومدها می‌باشد، ϵ گذرایی دی‌الکتریک به کار رفته در سنسور، Δx میزان جابه‌جایی افقی الکترومدهای خازن، mg نیروی گرانش وارد بر جرم معلق، زاویه شیب، N تعداد الکترومدها و h ثابت فشر هستند [۳۱].



شکل ۱۴: سنسور شیب خازنی، (الف) ساختار و (ب) مشخصه خروجی [۳۱].

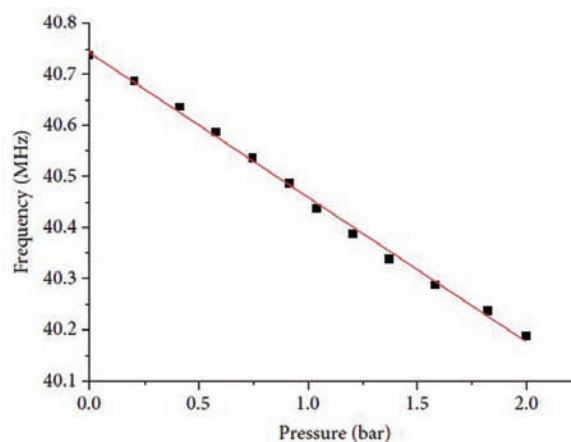


(الف)



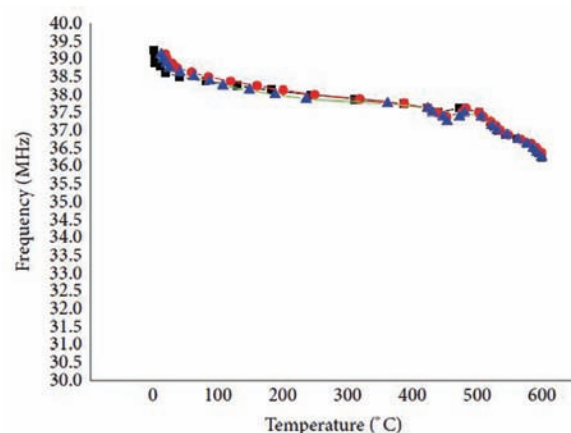
(ب)

شکل ۱۲: (الف) مدار و (ب) تصویر سنسور فشار با استفاده از خازن بین‌انگشتی [۳۰]



■ Measured
— Data fit

(الف)



■ Frequency-1
● Frequency-2
▲ Frequency-3

(ب)

شکل ۱۳: نمودارهای (الف) فرکانس رزونانس برحسب فشار و (ب) فرکانس رزونانس برحسب دما [۳۰].

۴- نتیجه‌گیری

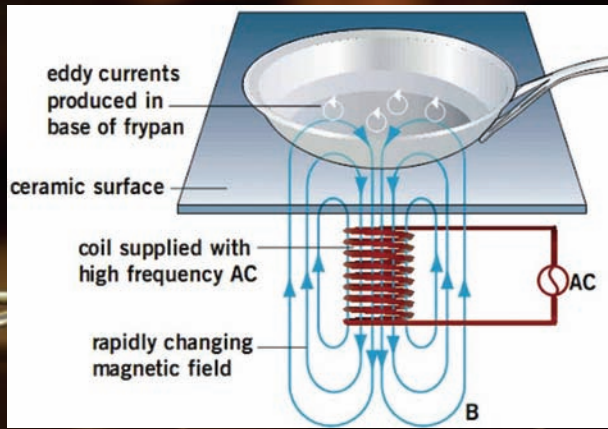
سنسورهای خازنی در مقایسه با سایر سنسورها، دارای مزایای بسیاری از قبیل قابلیت اندازه‌گیری خطی، حساسیت عالی، اصول عملکردی ساده، ساخت آسان و... هستند. ساختار این سنسورها تحت تأثیر دما، رطوبت یا اختلالات مکانیکی قرار نمی‌گیرند. با افزایش تقاضا برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های الکترونیکی بر روی تراشه و نیاز به کوچک‌سازی سنسورها، سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین‌انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

خازن‌های بین‌انگشتی از دو الکتروود شانه‌ای شکل قرار گرفته بر روی یک بستر عایق، تشکیل می‌شوند. هر دو الکتروود خازن بین‌انگشتی در یک صفحه قرار می‌گیرند. این الکتروودها در سنسورهای مختلف بسته به کاربرد، می‌توانند هر دو ثابت یا یکی از آن‌ها ثابت و دیگری متحرک باشند. ظرفیت خازن‌های بین‌انگشتی نسبت به سایر خازن‌ها بزرگتر است و با تغییر در تعداد الکتروودها، ابعاد، فاصله بین الکتروودها و ضریب گذردهی الکتریکی بستر عایق و ماده‌ی دی‌الکتریک بر روی الکتروودها تغییر می‌کند. ظرفیت خازن بین‌انگشتی با طول و ضریب دی‌الکتریک ماده قرار گرفته بر رو و بین الکتروودها رابطه خطی دارد که اساس کار بسیاری از سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین‌انگشتی است.

ویژگی‌های برجسته خازن‌های بین‌انگشتی، آن‌ها را به یک گزینه محبوب برای اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر فشار، جابه‌جایی، رطوبت و... تبدیل کرده است. در این مقاله سعی بر آن شد که نمونه‌هایی از سنسورهای خازنی بین‌انگشتی مورد بررسی قرار گیرند. این سنسورها در تشخیص آسیب عایق سیم و کابل، اندازه‌گیری فشار، جابجایی، زاویه کاربرد دارند. از خازن‌های بین‌انگشتی می‌توان در سنسورهای شیمیایی، گاز، رطوبت سنجی و بیوسنسورها نیز استفاده کرد.

مراجع

- [1] N. Maluf, "An introduction to microelectromechanical systems engineering." Measurement Science and Technology, Vol. 13, NO. 2, pp. 229-235, 2002.
- [2] S. M. Sze, Semiconductor sensors, vol. 55. Wiley New York, 1994.
- [3] P. Hu, J. Guo, and J. Tan, "An annular planar-capacitive tilt sensor with a 360 measurement range," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 4, pp. 2469-2476, 2016.
- [4] G. González, E. S. Kolosovas-Machuca, E. López-Luna, H. Hernández-Arriaga, and F. J. González, "Design and fabrication of interdigital nanocapacitors coated with HfO₂," Sensors, vol. 15, no. 1, pp. 1998-2005, 2015.
- [5] N. Zoric, A. Iavorschi, M. Sireteanu, G. Viziteu, and R. Ciobanu, "Design and Simulations of IDC Sensor Using COMSOL Multiphysics and Dielectric Spectroscopy of LTCC Materials," Bul. AGIR, vol. 3, pp. 63-69, 2013.
- [6] N. Angkawisittpan and T. Manasri, "Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor," Meas. Sci. Rev., vol. 12, no. 1, pp. 8-13, 2012.
- [7]<http://mathworld.wolfram.com/CompleteEllipticIntegraloftheFirstKind.html>
- [8] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, and M. Zahn, "Interdigital sensors and transducers," Proc. IEEE, vol. 92, no. 5, pp. 808-845, 2004.
- [9] زینب ورع و مهدیه مهران «مروری بر خازن‌های بین‌انگشتی ونحوه‌ی عملکرد آنها در سنسورهای مختلف با استفاده از دی‌الکتریک مایع» فصل‌نامه عصر برق، سال ششم، شماره ۱۲، تابستان ۱۳۹۸
- [10] R. T. Sheldon and N. Bowler, "An interdigital capacitive sensor for nondestructive evaluation of wire insulation," IEEE Sens. J., vol. 14, no. 4, pp. 961-970, 2014.
- [11] Y. Liu, Y. Huang, R. Tang, and B. Wang, "Application of inter-
- digital capacitive sensors for detecting power cable insulation damage," in Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on, 2015, pp. 1795-1799.
- [12] C.-L. Zhao, M. Qin, and Q.-A. Huang, "A fully packaged CMOS interdigital capacitive humidity sensor with polysilicon heaters," IEEE Sens. J., vol. 11, no. 11, pp. 2986-2992, 2011.
- [13] H. Farahani, R. Wagiran, and M. Hamidon, "Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review," Sensors, vol. 14, no. 5, pp. 7881-7939, 2014.
- [14] P. Fürjes, A. Kovacs, C. Dúcsó, M. Ádám, B. Müller, and U. Mescheder, "Porous silicon-based humidity sensor with interdigital electrodes and internal heaters," Sensors Actuators B Chem., vol. 95, no. 1-3, pp. 140-144, 2003.
- [15] C. Laville, C. Pellet, and G. N'Kaoua, "Interdigitated humidity sensors for a portable clinical microsystem," in Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International Conference On, 2000, pp. 572-577, 2000.
- [16] Y. Kim, B. Jung, H. Lee, H. Kim, K. Lee, and H. Park, "Capacitive humidity sensor design based on anodic aluminum oxide," Sensors Actuators B Chem., vol. 141, no. 2, pp. 441-446, 2009.
- [17] A. Pohl, "A review of wireless SAW sensors," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol. 47, no. 2, pp. 317-332, 2000.
- [18] M. Penza, F. Antolini, and M. V. Antisari, "Carbon nanotubes as SAW chemical sensors materials," Sensors Actuators B Chem., vol. 100, no. 1-2, pp. 47-59, 2004.
- [19] K. Länge, B. E. Rapp, and M. Rapp, "Surface acoustic wave biosensors: a review," Anal. Bioanal. Chem., vol. 391, no. 5, pp. 1509-1519, 2008.
- [20] W. Xuan et al., "Fast response and high sensitivity ZnO/glass surface acoustic wave humidity sensors using graphene oxide sensing layer," Sci. Rep., vol. 4:7206, pp. 1-9, 2014.
- [21] D. M. Liu, J. Aguilar-Hernandez, K. Potje-Kamloth, and H. D. Liess, "A new carbon monoxide sensor using a polypyrrole film grown on an interdigital-capacitor substrate," Sensors Actuators B Chem., vol. 41, no. 1-3, pp. 203-206, 1997.
- [22] H.-E. Endres and S. Drost, "Optimization of the geometry of gas-sensitive interdigital capacitors," Sensors Actuators B Chem., vol. 4, no. 1-2, pp. 95-98, 1991.
- [23] C. Hagleitner et al., "Smart single-chip gas sensor microsystem," Nature, vol. 414, no. 6861, p. 293-296, 2001.
- [24] M. Kitsara et al., "Single chip interdigitated electrode capacitive chemical sensor arrays," Sensors Actuators B Chem., vol. 127, no. 1, pp. 186-192, 2007.
- [25] S. M. Radke and E. C. Alocijla, "Design and fabrication of a microimpedance biosensor for bacterial detection," IEEE Sens. J., vol. 4, no. 4, pp. 434-440, 2004.
- [26] M. Varshney and Y. Li, "Interdigitated array microelectrodes based impedance biosensors for detection of bacterial cells," Biosens. Bioelectron., vol. 24, no. 10, pp. 2951-2960, 2009.
- [27] S. M. Radke and E. C. Alocijla, "A microfabricated biosensor for detecting foodborne bioterrorism agents," IEEE Sens. J., vol. 5, no. 4, pp. 744-750, 2005.
- [28] S. M. Radke and E. C. Alocijla, "A high density microelectrode array biosensor for detection of E. coli O157: H7," Biosens. Bioelectron., vol. 20, no. 8, pp. 1662-1667, 2005.
- [29] N. Blaž, M. Kisić, Č. Žlebič, G. Mišković, G. Radosavljević, and L. Živanov, "Displacement sensor based on interdigital capacitor," in Electronics Technology (ISSE), 2015 38th International Spring Seminar on, pp. 477-481, 2015.
- [30] Q. Tan et al., "A novel interdigital capacitor pressure sensor based on LTCC technology," J. Sensors, vol. 2014, pp. 1-6, 2014.
- [31] L. Zhao and E. M. Yeatman, "Micro capacitive tilt sensor for human body movement detection," in 4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2007), pp. 195-200, 2007



مقاله علمی-ترویجی

شبیه‌سازی سیستم اجاق گازهای القایی با استفاده از مدار مبدل رزونانسی با هدف بهینه‌سازی راندمان

محمد رضا شیبیا، دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. mohammadreza.shiba@gmail.com

چکیده

میدان مغناطیسی حاصل از جریان گذرنده از سیم پیچ اجاق القایی (دارای مولفه اکتیو با فرکانس بالا) ، درون تابه فلزی جریان‌های گردابی ایجاد کرده و تلفات اهمی ناشی از این جریان‌های گردابی ($R_{eq} * I^2$) باعث ایجاد حرارت در تابه می‌شود از این رو به منظور ایجاد حرارت بیشتر و در نتیجه طبخ سریع غذا لازم است توان اکتیو انتقالی به سیم‌پیچ اجاق القایی افزایش یابد که پیرو آن راندمان سیستم نیز افزایش خواهد یافت. بدین منظور با ایجاد تغییر در ساختار مدار مبدل رزونانسی سری کلاسیک (با استفاده از یک القاگر تقویت کننده ولتاژ در ورودی این مبدل) و همچنین ایجاد تغییر در نحوه کلیدزنی آن ، مبدلی با نام مبدل پیشنهادی در این پژوهش طراحی و مورد بحث و بررسی قرار گرفته که نتیجه آن افزایش راندمان سیستم در حدود ۲۰٪ است.

کلمات کلیدی: مبدل رزونانسی، اجاق القایی، راندمان، توان اکتیو، کلیدزنی

Simulation of Induction Cookers System Using Resonant Converter Circuit With the Aim of Optimizing Efficiency

— Mohammadreza.shiba, Islamic azad university south of thehran branch, Tehran, Iran, mohammadreza.shiba@gmail.com

Abstract

It's known that equalizing inductive reactance (caused by winding inductance) with capacitive reactance (caused by resonance capacitor) and creating resonant frequency is imperative to produce heat in metal pan located on induction cookers' coil fed by classic resonant convertor.

Moreover, the magnetic field induced by the currenxy passing through the induction cooker coil (with an active component and high frequency), produces Eddy currents in the pan and the Ohmic losses resulted from these currents ($R_{eq} \times I^2$) causes heat in the pan.

Thus, in order to produce higher heat and cook faster, there is a need to increase the transitional active power to the cookers' coils of these types and this in turn, raises the system efficiency.

Increasing the transitional active power to the induction cookers' coil means increasing the Ohmic losses caused by Eddy currents produced in the pan. To achieve this, by changing the circuit structure in classic

resonant converter (using a voltage amplifying inductor in the converter input) as well as changing the switching system, a converter named "proposal converter" is developed and studied in this dissertation. This proposal converter increases the system efficiency by about 20 percent.

Keywords: resonant converter, induction cooker, efficiency, active power, switching

۱- مقدمه

تسریع زمان پخت غذا با استفاده از فناوری اجاق القایی از جمله مسایلی است که ذهن بسیاری از پژوهشگران صنعت الکترونیک قدرت را به خود مشغول ساخته چراکه اتلاف هر چه کمتر انرژی در واحد زمان هدف اصلی دنیای پیرامون ماست.

امروزه فناوری اجاق القایی خانگی به علت مزایای مهم از قبیل پاکیزگی، تلفات پایین و راندمان و ایمنی بالای آن به یک گزینه استاندارد تبدیل شده است. فناوری اجاق القایی در پی پیشرفت‌های صنعتی و تکنولوژیکی از اواخر قرن نوزدهم همواره تکامل یافته است [۱]. لازمه ایجاد حرارت در تابه اجاق القایی برابر شدن راکتانس سلفی (ناشی از اندوکتانس سیم‌پیچ) و راکتانس خازنی (ناشی از خازن رزونانسی) با یکدیگر و ایجاد فرکانس رزونانس است. به طوری که با شرایط ایجاد شده جریان فرکانس بالای عبوری از سیم‌پیچ فقط دارای مولفه اکتیو بوده و میدان مغناطیسی حاصل از این جریان، درون تابه جریان‌های گردابی ایجاد می‌کند که تلفات اهمی ($R_{eq} * I^2$) حاصل از این جریان‌های گردابی باعث گرم شدن آن می‌شود. نکته قابل توجه اینکه سیم‌پیچ اجاق القایی هرگز داغ نمی‌شود از این رو در مقایسه با اجاق‌های المنتی سنتی دارای ضریب ایمنی فوق‌العاده‌ای هستند. مزیت دیگر این اجاق‌ها راندمان بالای آنهاست چرا که برخلاف اجاق‌های المنتی سنتی، هیچ‌گونه اتلاف حرارتی در فاصله هوایی بین سیم‌پیچ و تابه فلزی در این اجاق‌ها وجود ندارد.

جهت تغذیه اجاق القایی بهترین روش استفاده از فناوری مبدل‌های رزونانسی سری می‌باشد چرا که این ادوات به دلیل ایجاد فرکانس‌های بالا از طریق سیستم رزونانسی امکان ایجاد حرارت را در تابه اجاق القایی فراهم می‌کنند.

اجاق‌های القایی شامل مدار قدرت، کنترل و بار (شامل سیم‌پیچ و تابه) هستند که بخش قدرت شامل تغذیه و اینورتر تشدید بوده و برای ایجاد تشدید یک خازن به بار متصل می‌گردد. وابسته به نحوه اتصال بار (سیم‌پیچ و تابه) و خازن در مدار تشدید، اجاق‌های القایی به دو صورت سری و موازی ساخته می‌شوند. مستقل از ساختار، اجاق‌های القایی دارای یک سیم‌پیچ گسترده صفحه‌ای هستند که زیر ظرف فلزی قرار گرفته است. عبور جریان فرکانس بالا از سیم‌پیچ در ظرف فلزی جریان گردابی ایجاد کرده که تلفات اهمی حاصل از این جریان گردابی باعث گرم شدن ظرف می‌شود. هر چند افزایش فرکانس باعث افزایش توان تلفاتی در تابه می‌شود اما اگر فرکانس از یک حد مرزی بیشتر شود راندمان سیستم کاهش می‌یابد [۲]. از سوی دیگر، اندازه ظرفیت خازن تشدید نقش تعیین‌کننده‌ای در فرکانس تشدید، ضریب Q، بازه گرمایی و ضریب قدرت مدار مبدل تغذیه‌گر اجاق القایی دارد [۳].

مهمترین مولفه مغناطیسی در سیستم اجاق القایی مربوط به سیستم بار (سیم‌پیچ و تابه) می‌شود [۴]. جهت مدل‌سازی مولفه مغناطیسی در سیستم اجاق القایی تلاش‌های زیادی انجام شده [۵]. و در خصوص مطالعات فنی، پژوهش در زمینه استخراج و مدل‌سازی المان‌های الکتریکی [۶]، [۷]، بهینه‌سازی راندمان [۸] و بهینه‌سازی توزیع حرارت [۹] حایز اهمیت فراوانی بوده است. مهمترین قسمت

یک سیستم اجاق القایی تحت عنوان قطعه کار یا همان تابه شناخته می‌شود که لازم است جهت پخت غذا گرم شود. علاوه بر این، سلف یا سیم‌پیچ که میدان مغناطیسی مورد نیاز برای تولید گرما را ایجاد می‌کند از دیگر بخش‌های مهم اجاق القایی محسوب می‌شود.

همچنین راندمان انتقال انرژی از سیم‌پیچ به تابه یک امر مهم در طراحی سیستم اجاق القایی به شمار می‌رود. از این رو فرکانس کاری و شکل‌های هندسی سیم‌پیچ و تابه دو پارامتر اصلی مؤثر بر راندمان انتقال انرژی از سیم‌پیچ به تابه می‌باشد، بنابراین طراحی دقیق سیستم اجاق القایی مستلزم انتخاب فرکانس مناسب و هندسه سیم‌پیچ خواهد بود [۱۰].

مبدل‌های رزونانسی، به منظور کاهش تلفات ناشی از سویچینگ در بسیاری از انواع مبدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. مبدل‌های رزونانسی با استفاده از خاصیت نوسان جریان یا ولتاژ، تلفات سویچینگ را کاهش می‌دهند. سویچینگ‌ها در لحظاتی که ولتاژ یا جریان صفر می‌شوند، باز و بسته می‌شوند. لازم به یادآوری است که مبدل‌های رزونانسی در حال حاضر در کاربردهای الکترونیک قدرت، بسیار مورد توجه واقع شده‌اند و این امر به دلیل بازده بیشتر و امکان کار در فرکانس‌های بالاتر و در نتیجه اجزای فیلتر کوچکتر نسبت به سایر مبدل‌ها است [۱۱].

از آنجایی که پخت غذا با حرارت ایجاد شده در ظرف فلزی (تابه) صورت می‌پذیرد بنابراین افزایش توان اکتیو انتقالی به بار (سیم‌پیچ و تابه) باعث ایجاد حرارت بیشتر در تابه، افزایش راندمان سیستم و در نتیجه کاهش زمان پخت غذا خواهد شد. بدین منظور در مقاله دو پارامتر مهم مبدل رزونانسی سری کلاسیک شامل توان اکتیو انتقالی به بار سیستم اجاق القایی (سیم‌پیچ و تابه) و همچنین راندمان آن مورد مطالعه قرار گرفته و سپس به منظور افزایش این پارامترها، مبدل رزونانسی جدیدی با نام مبدل پیشنهادی ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در مبدل پیشنهادی با ایجاد تغییر در ساختار مدار مبدل رزونانسی سری کلاسیک، اعمال تغییر در نحوه کلیدزنی و همچنین استفاده از یک اندوکتور در ورودی مبدل، ولتاژ خروجی و توان اکتیو انتقالی به بار (سیم‌پیچ و تابه) به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و از طرفی راندمان بهبود یافته و در نتیجه زمان طبخ غذا به کم‌ترین زمان ممکن می‌رسد.

در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی مبدل کلاسیک و مبدل پیشنهادی در فضای سیمولینک نرم‌افزار متلب آورده شده است.

۲- مواد و روش

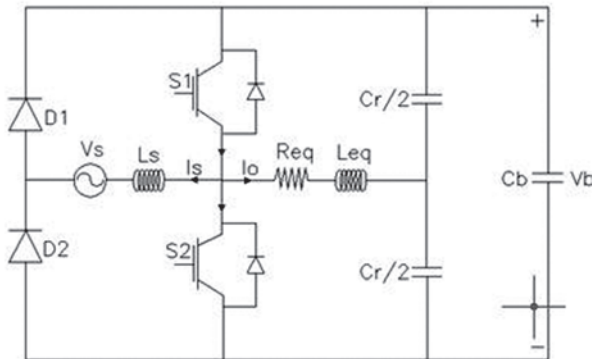
۲-۱- نحوه عملکرد مبدل رزونانسی سری کلاسیک در تغذیه اجاق القایی:

مدار این نوع مبدل در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مدار بار متصل شده به مبدل همان مدل اجاق القایی میباشد که دارای مقاومت معادل R_{eq} و راکتانس سلفی معادل $X_{L_{eq}}$ در سیم‌پیچ خود می‌باشد. به طوری که ملاحظه می‌شود خازن C_{res} به عنوان خازن رزونانس با امپدانس معادل سیم‌پیچ اجاق القایی یعنی

Z_{eq} سری شده است.

مکانیزم قطع و وصل کلیدهای S1 و S2 از طریق فرمان خارجی انجام شده و زمان قطع و وصل این کلیدها به طور مستقیم به ظرفیت خازن C_{res} بستگی دارد به عبارت دیگر در صورتی که زمان شارژ و دشارژ شدن خازن C_{res} را بدانیم می توانیم زمان قطع و وصل کلیدها را تعیین کنیم. بدین منظور ابتدا کلید S1 جهت شارژ خازن C_{res} وصل شده و خازن بیان شده شروع به شارژ شدن می نماید. این کلید تا زمانی در حالت وصل قرار دارد که خازن C_{res} به طور کامل شارژ شده باشد. پس از شارژ کامل کلید S1 قطع و کلید S2 وصل می شود. در این لحظه خازن C_{res} شروع به دشارژ می کند وقتی دشارژ کامل انجام شد در این لحظه کلید S2 قطع و سپس دوباره کلید S1 وصل می شود و سیکل کاری دوباره تکرار می شود. نکته قابل توجه این که در زمان دشارژ خازن ولتاژ نقطه A به دلیل اتصال کوتاه شدن این نقطه (به واسطه وصل کلید S2) صفر خواهد شد.

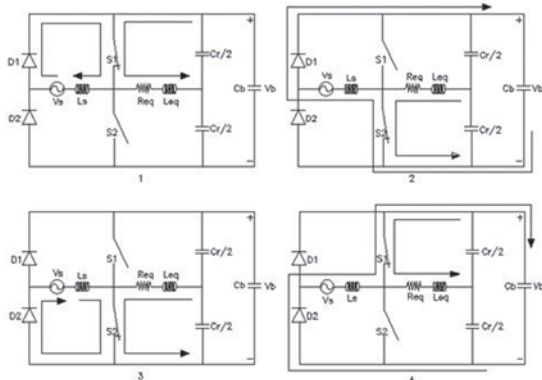
با توجه به شکل (۲) ملاحظه می شود که دیود D1 در نیم سیکل مثبت و دیود D2 در نیم سیکل منفی هایت می کنند در نتیجه فقط یک دیود در هر نیم سیکل فعال بوده و این امر سبب کاهش تلفات هدایتی نسبت به یکسوسازی تمام پل می گردد. همچنین نحوه کلیدزنی نیز در این مبدل با مبدل رزونانسی سری کلاسیک متفاوت است به طوریکه در این مبدل در نیم سیکل مثبت ابتدا کلید S1 و سپس کلید S2 وصل شده و در نیم سیکل منفی ابتدا کلید S2 و سپس کلید S1 وصل می گردد به عبارتی در هر نیم سیکل هر دو کلید به ترتیب وصل می شوند.



شکل ۲: مبدل پیشنهادی

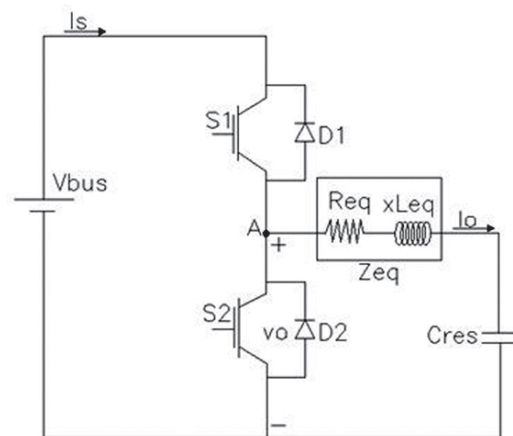
۲-۱- عملکرد مبدل پیشنهادی

بهره برداری از مبدل پیشنهادی را می توان طی ۴ مرحله نشان داده شده در شکل (۳) مورد بررسی قرار داد. عملکرد مبدل پیشنهادی در نیم سیکل مثبت: در حالت ۱ ابتدا کلید S1 وصل شده و منبع ولتاژ ورودی اندوکتور L_s را از طریق این کلید و دیود D1 تغذیه می کند در همین لحظه جریان بار از از اندوکتانس L_{eq} و مقاومت R_{eq} همچنین کلید S1 عبور می کند. قبل از اتمام نیم سیکل مثبت (حالت ۲) بلافاصله پس از قطع کلید S1، کلید S2 وصل می شود. در این لحظه خازن C_b نیز از طریق کلید S2 شارژ شده و این بار جریان بار از اندوکتانس L_{eq} و مقاومت R_{eq} و همچنین کلید S2 عبور می کند. مدارهای شماره (۱) و شماره (۲) مربوط به توضیحات این بخش می باشند.



شکل ۳: حالت های عملکرد مبدل پیشنهادی در یک سیکل کامل

عملکرد مبدل پیشنهادی در نیم سیکل مثبت: در حالت ۱ ابتدا کلید S1 وصل شده و منبع ولتاژ ورودی اندوکتور L_s را از طریق این کلید و دیود D1 تغذیه می کند در همین لحظه جریان بار از از اندوکتانس L_{eq} و مقاومت R_{eq} و همچنین کلید S1 عبور می کند. قبل از اتمام نیم



شکل ۱: مبدل تغذیه کننده اجاق القایی از نوع رزونانسی سری کلاسیک

۲-۲- طراحی مبدل رزونانسی سری با توان و راندمان بالا (مبدل پیشنهادی)

این مبدل بر پایه یکسوسازی نیم پل در ورودی و بهره گیری از اصول کاربری مبدل های رزونانسی سری کلاسیک و همچنین بر پایه مبدل های بوست طراحی شده است. در این مبدل جهت افزایش ولتاژ خروجی اینورتر از یک سیم پیچ تقویت کننده ولتاژ که در شکل (۲) با نماد L_s نشان داده شده استفاده کرده ایم به گونه ای که با تنظیم زمان وظیفه (D) ادوات هدایتگر می توان به ولتاژهای بیشتر از ولتاژ ورودی دست یافت. همچنین در این مبدل سطح پیک جریان نه تنها در خود مبدل بلکه در سیم پیچ اجاق القایی نیز کاهش یافته بنابراین تلفات هدایتی به کمینه رسیده و در نتیجه راندمان سیستم به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. به طوری که در شکل (۲) نشان داده شده ولتاژ AC ورودی توسط یکسوساز نیم موج متشکل از دو دیود و D1 و D2 به ولتاژ DC تبدیل شده و همچنین در خروجی این مبدل از خازن لینک dc با نماد C_b به منظور کاهش ریپل ولتاژ خروجی و همچنین محافظت مدار مبدل در مقابل تولید پلاسما استفاده شده است. (لازم به یادآوری است که در ولتاژهای DC بالاتر از ۶۰۰ ولت تولید پلاسما وجود دارد که استفاده از خازن لینک dc جهت ممانعت از تولید آن ضروریست).

در این مدار اجاق القایی به عنوان یک مدار RL سری متشکل از R_{eq} و L_{eq} مدل شده و از طرفی به منظور کاهش پدیده EMC خازن رزونانسی C_{res} به دو خازن (هر کدام با ظرفیت $C_{r/2}$ تقسیم شده است.

است توان ورودی در رابطه زیر صدق کند:

$$P_{in} > \frac{V_s^2 D T_{sw}}{2L_s}, CCM \quad (2)$$

از رابطه (۳) می‌توان مناسبترین مقدار اندوکتور ورودی را برای محقق شدن شرط هدایت پیوسته انتخاب کرد یعنی می‌توان نوشت:

$$L_s > \frac{V_s^2 D}{2P_{in} f_s} \quad (3)$$

رابطه (۴) برای شرایط مرزی بیان شده است به طوری که به ازای نسبت تغییرات ریبل جریان ورودی به مولفه dc جریان ورودی کمتر از ۲ این رابطه صادق می‌باشد. ممکن است در مسایل مختلف نیاز داشته باشیم مقدار عددی این نسبت را از ابتدا شرط کنیم به عنوان مثال اگر بخواهیم درصد ریبل جریان ورودی مبدل ۲۵٪ باشد آنگاه می‌بایست چنین عمل کنیم:

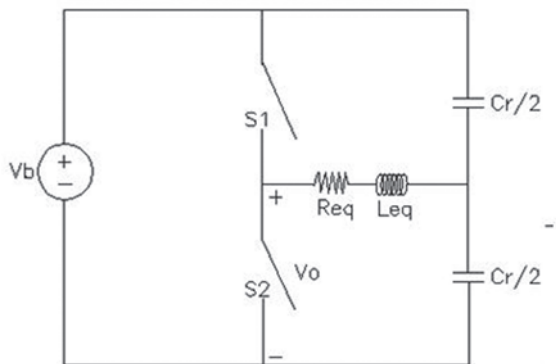
$$\frac{\Delta I_s}{I_s} < 0.25 \Rightarrow I_s > 4 \Delta I_s \quad (4)$$

بنابراین مناسبترین مقدار برای اندوکتور ورودی مبدل از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$L_s > \frac{4V_s^2 D}{P_{in} f_s} \quad (5)$$

۲-۲-۳- تحلیل بخش رزونانسی نیم پل سری کلاسیک

این بخش از مبدل پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود این بخش همان مبدل رزونانسی سری کلاسیک می‌باشد که در ابتدا با آن آشنا شدیم. با کمی دقت درمی‌یابیم که در این بخش منبع تغذیه‌کننده ورودی در واقع همان ولتاژ V_b است که معادل با ولتاژ خروجی بخش تقویت‌کننده مبدل پیشنهادی می‌باشد. همچنین ولتاژ خروجی (V_o) یا ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اجاق القایی همان ولتاژ V_b می‌باشد.



شکل ۶: مدار معادل بخش رزونانسی سری کلاسیک در مبدل پیشنهادی

۲-۲-۴- محاسبه توان خروجی مبدل پیشنهادی

توان خروجی بخش رزونانسی کلاسیک مبدل پیشنهادی را می‌توان مطابق رابطه (۶) چنین نوشت:

$$P_o^p = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{R_{eq}}{r} \left(\frac{V_o^2 / \pi^2 [\sin(\pi h D) + (1 - \cos \pi h D)]^2}{R_{eq}^2 + [\pi f_s h L_{eq} - 1 / \pi f_s h C_{res}]^2} \right) \quad (6)$$

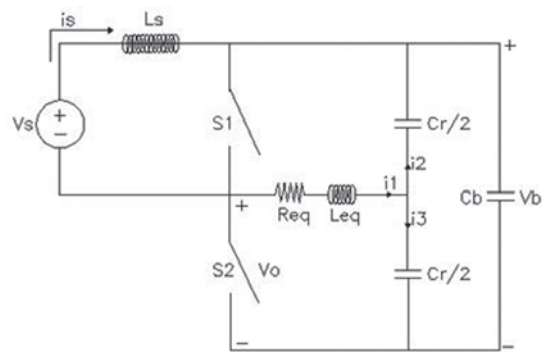
مناسبترین مقدار برای انتخاب مقاومت اهمی سیم‌پیچ اجاق القایی تغذیه شده با این مبدل پیشنهادی مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{eq} < \frac{r V_s^2 (\sin \pi D)^2}{(1-D)^2 \pi^2 P_o^p} \quad (7)$$

سیکل مثبت (حالت ۲) بلافاصله پس از قطع کلید S1، کلید S2 وصل می‌شود. در این لحظه خازن C_b نیز از طریق کلید S2 شارژ شده و اینبار جریان بار از اندوکتانس L_{eq} و مقاومت R_{eq} و همچنین کلید S2 عبور می‌کند. مدارهای شماره ۱ و شماره ۲ مربوط به توضیحات این بخش می‌باشند.

عملکرد مبدل پیشنهادی در نیم سیکل منفی: به محض ورود مبدل به ناحیه عملکردی نیم سیکل منفی (حالت ۳) با توجه به وصل بودن کلید S2 و قطع شدن سریع کلید S1 دیود D2 هدایت کرده و سلف L_s تغذیه می‌گردد تا اینکه قبل از اتمام نیم سیکل منفی بلافاصله پس از قطع کلید S2، کلید S1 وصل می‌شود که دوباره خازن C_b شارژ شده و جریان بار از اندوکتانس L_{eq} و مقاومت R_{eq} و همچنین کلید S1 عبور می‌کند. نکته قابل توجه اینکه زمان قطع یا وصل بودن کلیدها را می‌توان با تنظیم زمان وظیفه به‌طور دلخواه تغییر داد.

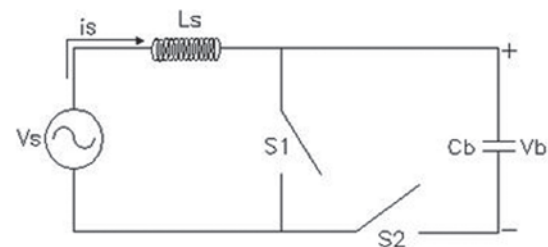
تجزیه و تحلیل توپولوژی مبدل پیشنهادی: به طوری که در شکل (۴) نشان داده شده توپولوژی مبدل پیشنهادی از دو بخش شامل بخش تقویت‌کننده و بخش رزونانسی سری کلاسیک تشکیل شده است از این‌رو به منظور تسهیل در تجزیه و تحلیل جداگانه هر کدام از این قسمت‌ها، عملکرد مبدل در نیم سیکل مثبت و با در نظر گرفتن مقدار موثر ولتاژ تغذیه ورودی بررسی شده است. حال به بررسی هر کدام از این زیربخش‌ها می‌پردازیم:



شکل ۴: مدار معادل مبدل پیشنهادی در نیم سیکل مثبت

۲-۲-۲- بخش تقویت‌کننده ولتاژ در مبدل پیشنهادی

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است عملکرد بخش تقویت‌کننده مبدل پیشنهادی به‌طور دقیق مشابه عملکرد یک مبدل بوست کلاسیک می‌باشد. در این مدار به منظور کمینه کردن ریبل جریان و ممانعت از عبور جریان‌های فرکانس بالای گذرنده از دیودهای یکسوساز، مبدل در حالت مد جریان پیوسته فرض شده است.



شکل ۵: مدار معادل بخش تقویت‌کننده ولتاژ در مبدل پیشنهادی

می‌دانیم که در حالت ماندگار ولتاژ متوسط در یک اندوکتور معادل صفر است از این‌رو داریم:

$$V_s D T_{sw} + (V_s - V_b)(1 - D) T_{sw} = 0 \quad (1)$$

جهت محقق شدن شرط هدایت پیوسته در مبدل پیشنهادی لازم

جدول ۱: مشخصات فنی اجاق القایی نمونه و المان‌های مبدل تغذیه‌کننده آن جهت شبیه‌سازی

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	V_s	۲۳۰	ولت
۲	V_{0max}	۱۲۰۰	ولت
۳	P_{0max}	۳۵۰۰	وات
۴	D_{max}	?	-
۵	R_{eq}	۲۵	اهم
۶	L_{eq}	۱۵۰	میکرو هانری
۷	C_{res}	?	فاراد
۸	$V_{on,D}$	۰/۷۴	ولت
۹	$R_{on,D}$	۰/۰۰۳	اهم
۱۰	$V_{on,S}$	۱/۶	ولت
۱۱	$R_{on,S}$	۰/۰۱۴	اهم
۱۲	$R_{dc,ls} = 500 \mu H$	۰/۱۶	اهم
۱۳	$R_{dc,ls} = 1000 \mu H$	۰/۴۲	اهم
۱۴	L_s	?	هانری
۱۵	$V_{off,s}$	۰/۰۰۰۸۶	ژول
۱۶	F_s	۱۰۰-۱۵۰	کیلوهرتز
۱۷	$\Delta I_s / I_s$	۰/۲۵	-

۴- بحث

۴-۱- محاسبه پارامترهای مجهول

زمان وظیفه ماکزیمم (D_{max}): با توجه به ردیف ۲ جدول (۱) که بیانگر بیشینه ولتاژ مجاز دو سر کلیدهای نیمه‌هادی است ولتاژ خروجی مبدل پیشنهادی نباید از ۱۲۰۰ ولت بیشتر باشد یعنی لازم است داشته باشیم:

$$V_{bmax} < 1200V \quad (15)$$

بنابراین زمان وظیفه بیشینه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{1200}{230} = \frac{1}{1 - D_{max}} \Rightarrow D_{max} = 0.88 \quad (16)$$

بررسی مقاومت اهمی اجاق القایی (R_{eq}): برای مقدار مقاومت اهمی اجاق القایی داشته باشیم:

$$R_{eq} < \frac{2V_s^2 (\sin \pi D_{max})^2}{(1 - D_{max})^2 \pi^2 P_o^2} \quad (17)$$

با جایگذاری مقادیر معلوم جدول شماره (۱) در رابطه بالا، مقاومت معادل اجاق القایی چنین به دست می‌آید:

$$R_{eq} < 26.76 \Omega \Rightarrow R_{eq} = 25 \Omega \quad (18)$$

بنابراین مقدار مقاومت اهمی اجاق القایی (مندرج در جدول شماره ۱) صدق کرده و مناسبترین مقدار است.

محاسبه ظرفیت خازن رزونانسی (C_{res}): با فرض کمینه فرکانس کلیدزنی به میزان ۱۰۰ کیلوهرتز ظرفیت خازن رزونانسی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} \times C_{res}}} \Rightarrow C_{res} = 16.8nF \Rightarrow C_{res} = 15nF \quad (19)$$

توان خروجی مبدل پیشنهادی به ازای هر مقدار از زمان وظیفه بیشتر از توان خروجی مبدل رزونانسی سری کلاسیک خواهد بود. حال داریم:

$$\frac{P_o^P}{P_o^E} = \frac{1}{(1-D)^2} \quad (8)$$

رابطه (۸) نشان می‌دهد که به ازای زمان وظیفه معادل ۰.۵ توان خروجی مبدل پیشنهادی ۴ برابر توان خروجی مبدل رزونانسی سری کلاسیک خواهد بود. این بدین معناست که در شرایط ثابت بودن مصرف انرژی برای طبخ کامل غذا، زمان طبخ آن نسبت به حالتی که از مبدل کلاسیک استفاده شود به یک چهارم تقلیل یافته است.

۲-۲-۵- محاسبه تلفات و راندمان در مبدل پیشنهادی

واضح است که کل تلفات در مبدل پیشنهادی شامل تلفات هدایتی ادوات هدایتگر (مجموع تلفات هدایتی دیودها و کلیدها) و همچنین تلفات سوئیچینگ می‌باشد.

۲-۲-۶- محاسبه تلفات هدایتی کلیدها

با توجه به اینکه جریان عبوری از هر دو کلید S1 و S2 باعث ایجاد تلفات هدایتی می‌شود. بنابراین رابطه تلفات هدایتی کلیدها به صورت زیر خواهد شد:

$$\Delta P_{cond,s} = R_{on,s} \times (I_{s1r}^2 + I_{s1a}^2) + V_{on,s} \times (I_{s1a} + I_{s1r}) \quad (9)$$

و در نهایت پس از انجام محاسبات؛ تلفات هدایتی کلیدها عبارتست از:

$$\Delta P_{cond,s} = R_{on,s} \times \left(\frac{P_o}{R_{eq}} + \frac{P_{in}^2}{V_s^2} \right) + V_{on,s} \times \left(\frac{P_{in}}{V_s} \right) \quad (10)$$

۲-۲-۷- محاسبه تلفات هدایتی دیودها

از آنجایی که فقط یک دیود به‌طور هم‌زمان وصل می‌باشد بنابراین تلفات هدایتی فقط برای یک دیود محاسبه می‌شود پس خواهیم داشت:

$$\Delta P_{cond,D} = R_{on,D} \times I_{sr}^2 + V_{on,D} \times I_s \quad (11)$$

$$\Delta P_{cond,D} = R_{on,D} \times \left(\frac{P_{in}}{V_s} \right)^2 + V_{on,D} \times \left(\frac{P_{in}}{V_s} \right) \quad (12)$$

۲-۲-۸- محاسبه تلفات سوئیچینگ در مبدل پیشنهادی

تلفات سوئیچینگ در مبدل‌ها از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta P_{sw} = f_{sw} \times E_{offs} \quad (13)$$

در نهایت کل تلفات در مبدل چنین است:

$$\Delta P_t = \Delta P_{cond,s} + \Delta P_{cond,D} + \Delta P_{cond,L} + \Delta P_{sw} \quad (14)$$

۳- شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی

در این بخش شبیه‌سازی یک دستگاه اجاق القایی نمونه تغذیه شونده با مبدل رزونانسی سری کلاسیک (شکل ۱) و همچنین تغذیه شونده با مبدل پیشنهادی طراحی شده (شکل ۲) که در شرایط کاری مساوی قرار دارند با استفاده از اطلاعات و مشخصات مندرج در جدول (۱) در نرم‌افزار متلب انجام و سپس نتایج هر کدام بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. در این شبیه‌سازی مقادیر نامی و مشخصات فنی کلیه ادوات و تجهیزات به کار رفته در ساختار مبدل‌های کلاسیک و پیشنهادی (اعم از نیمه‌هادی‌ها، عناصر اکتیو، عناصر پسیو و...) یکسان فرض شده است:

و در نتیجه با توجه به خازن‌های موجود در بازار ظرفیت ۱۵ نانوفاراد انتخاب می‌گردد.

محاسبه اندوکتانس سلف تقویت کننده ورودی مبدل (L_s): با فرض اندک بودن تلفات مبدل و در نتیجه برابر بودن توان ورودی با توان خروجی آن، اندوکتانس سلف تقویت کننده در ورودی مبدل با توجه به ریپل جریان ورودی به میزان ۲۵ درصد، قابل محاسبه است:

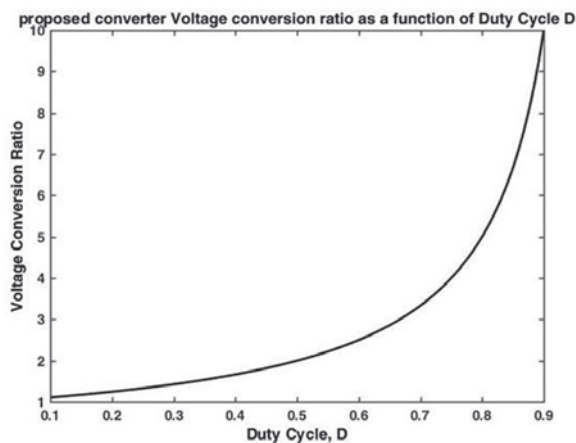
$$L_s > \frac{\frac{1}{2} V_s^2 D}{P_{in} f_s} \Rightarrow L_s > 488 \mu F \Rightarrow L_s \geq 500 \mu F \quad (20)$$

بنابراین انتخاب یک سلف با اندوکتانس ۵۰۰ میکروهنری یا بیشتر جهت تقویت ولتاژ و ورودی مبدل مناسب خواهد بود که البته جهت تعیین ناحیه کاری وسیع‌تر برای مبدل، علاوه بر اندوکتانس ۵۰۰ میکروهنری، از اندوکتور ۱۰۰۰ میکروهنری نیز در شبیه‌سازی استفاده و با یکدیگر مقایسه شده است.

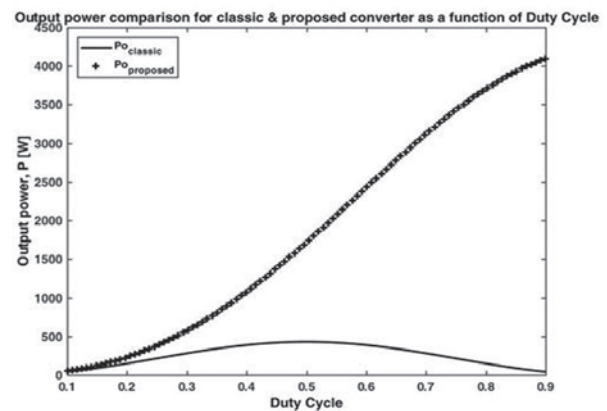
ولتاژ مبدل پیشنهادی نیز سیر صعودی دارد. این در حالی است که در مبدل رزونانسی سری کلاسیک افزایش ولتاژ در خروجی وجود نداشته و ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اجاق القایی همان ولتاژ ورودی مبدل است. (شکل ۷ الف و ب) به‌عنوان مثال این نمودار بیان می‌کند که به ازای زمان وظیفه معادل ۰/۵ ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اجاق القایی دو برابر شده است.

شکل (۷پ) نیز نمودار تغییرات توان اکتیو انتقالی به سیم‌پیچ اجاق القایی نمونه تغذیه شونده با مبدل کلاسیک را بر حسب مقادیر مختلف زمان وظیفه و فرکانس کلیدزنی نشان می‌دهد. به طوری که مشاهده می‌شود بیشترین توان تحویلی این مبدل به سیم‌پیچ اجاق القایی نمونه با مقاومت معادل ۲۵ اهم در D=0.5 و فرکانس کلیدزنی ۱۱۰ کیلوهرتز معادل ۴۲۹ وات است.

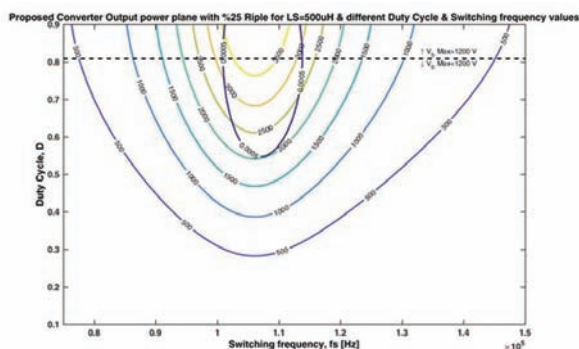
همچنین شکل (۷ت) نمودار تغییرات توان اکتیو انتقالی مبدل پیشنهادی را به ازای سلف (تقویت‌کننده در ورودی) ۵۰۰ میکروهنری و بیشینه ریپل ۲۵ درصد و بر حسب مقادیر مختلف زمان وظیفه و فرکانس کلیدزنی نشان می‌دهد. به طوری که مشاهده می‌شود بیشترین توان تحویلی این مبدل به سیم‌پیچ اجاق القایی با مقاومت معادل ۲۵ اهم در زمان وظیفه معادل ۰.۵ و فرکانس کلیدزنی ۱۱۰ معادل کیلوهرتز معادل ۱۷۱۶ وات است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در صورت استفاده از سلف ۵۰۰ میکروهنری در ورودی مبدل (L_s = ۵۰۰ μH)، محدوده کاری مبدل پیشنهادی کوچک خواهد بود بنابراین جهت افزایش محدوده توان اکتیو انتقالی مبدل پیشنهادی می‌بایست از سلف ۱۰۰۰ میکروهنری به‌عنوان سلف تقویت‌کننده در ورودی مبدل استفاده شود. هر قدر اندازه سلف ورودی مبدل پیشنهادی بیشتر شود محدوده ناحیه کاری آن وسیع‌تر خواهد شد.



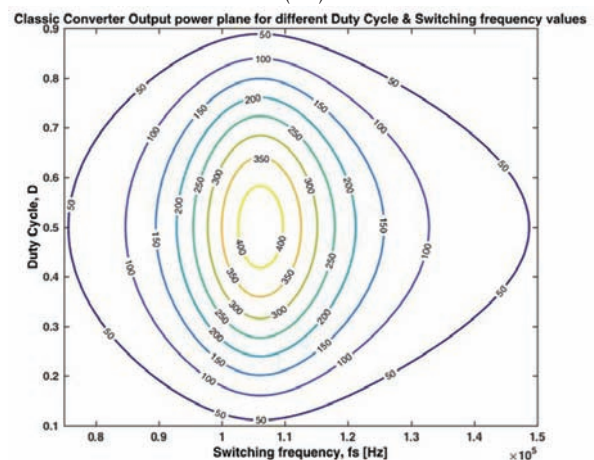
(ب)



(الف)

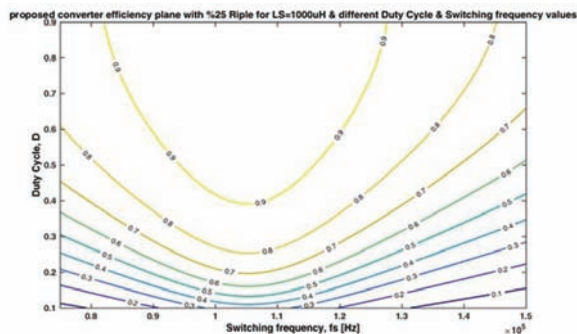


(ت)

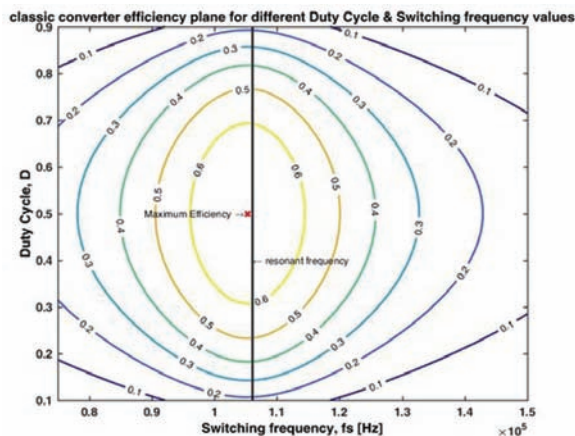


(پ)

شکل ۷: الف) نسبت تبدیل ولتاژ مبدل پیشنهادی بر حسب تغییرات زمان وظیفه، ب) مقایسه توان اکتیو انتقالی مبدل‌های کلاسیک و پیشنهادی بر حسب تغییرات زمان وظیفه، پ) تغییرات توان اکتیو انتقالی مبدل کلاسیک بر حسب فرکانس‌های کلیدزنی و زمان‌های وظیفه مختلف، ت) تغییرات قدرت انتقالی مبدل پیشنهادی با ریپل ۲۵ درصد و اندوکتور ورودی ۵۰۰ میکروهنری

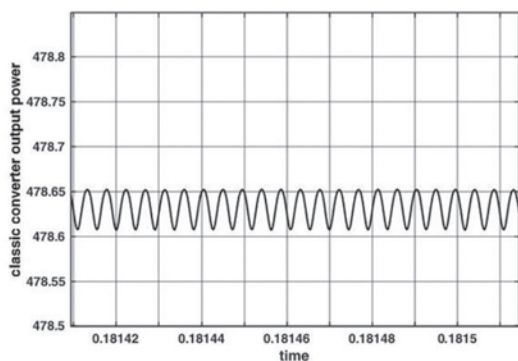


(ب)

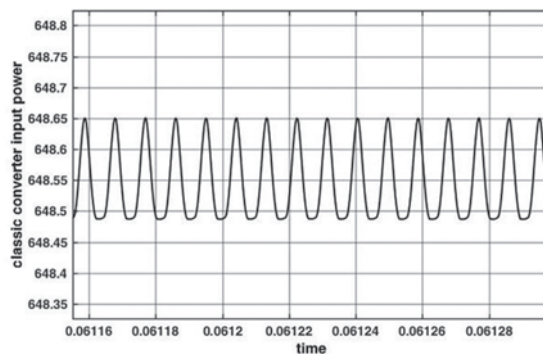


(الف)

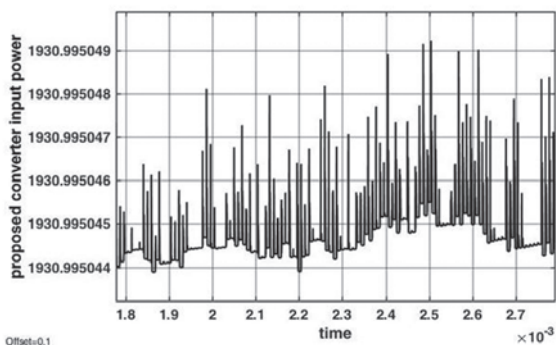
شکل ۸: الف) تغییرات راندمان مبدل کلاسیک بر حسب فرکانسهای کلیدزنی و زمانهای وظیفه مختلف، ب) تغییرات راندمان مبدل پیشنهادی با ریبیل ۲۵ درصد و اندوکتور ورودی ۱۰۰۰ میکروهنری



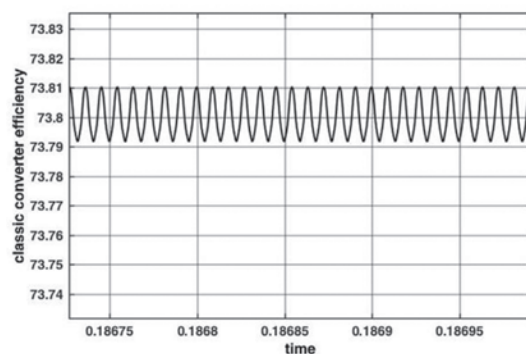
شکل ۱۰: نمودار تغییرات توان اکتیو انتقالی مبدل کلاسیک نسبت به زمان به ازای (D=0.5)



شکل ۹: نمودار تغییرات توان اکتیو ورودی مبدل کلاسیک نسبت به زمان به ازای (D=0.5)



شکل ۱۱: نمودار تغییرات توان اکتیو ورودی مبدل پیشنهادی نسبت به زمان به ازای (D=0.5)



شکل ۱۲: نمودار تغییرات راندمان مبدل کلاسیک نسبت به زمان به ازای (D=0.5)

می‌باشد. به طوری که ملاحظه می‌شود ولتاژ دو سر اجاق القایی، توان انتقالی و همچنین راندمان مبدل پیشنهادی در مقایسه با مبدل رزونانسی کلاسیک به مراتب بیشتر است و دلیل تغییرات اندک در توان اکتیو ورودی و انتقالی مبدل‌ها، لحظه‌ای بودن آنها یا به عبارت دیگر وجود تغییرات جریان و ولتاژ در واحد زمان است.

۵- نتیجه‌گیری

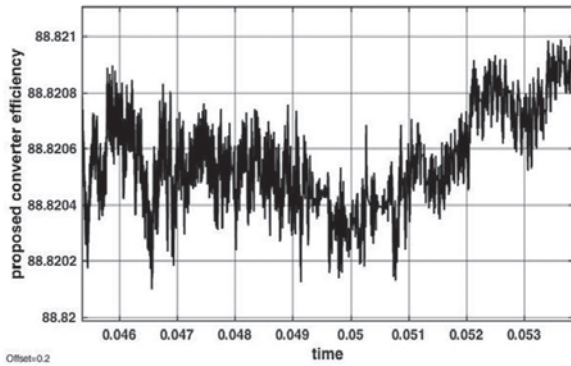
اجاق القایی به دلیل مزایای مهم آن از قبیل پاکیزگی سیستم، ایمنی بالا، تلفات کم و راندمان بالا جایگزین اجاق‌های المنتی سنتی شده و افزایش توان اکتیو انتقالی به تابه جهت پخت سریع غذا نیز یکی از

۴-۲- مقایسه راندمان مبدل کلاسیک با مبدل پیشنهادی

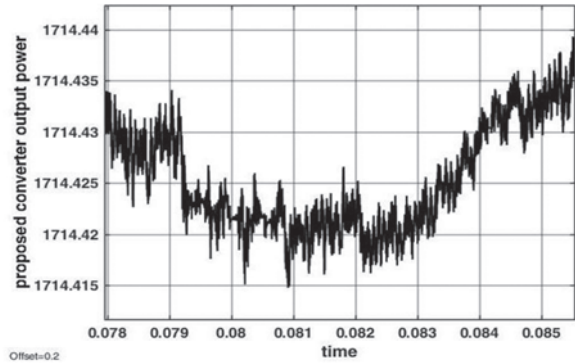
نتایج حاصل از کدنویسی در خصوص راندمان مبدل‌های کلاسیک و پیشنهادی در شکل (۸) نشان می‌دهد که بیشترین راندمان در مبدل کلاسیک در زمان وظیفه معادل $D=0.5$ ، ۶۸٪ بوده و این در حالی است که مبدل پیشنهادی در همین زمان وظیفه و ریبیل جریان ورودی معادل ۲۵ درصد، دارای راندمانی بیش از ۹۰٪ است.

۴-۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از فضای سیمولینک در نرم‌افزار متلب

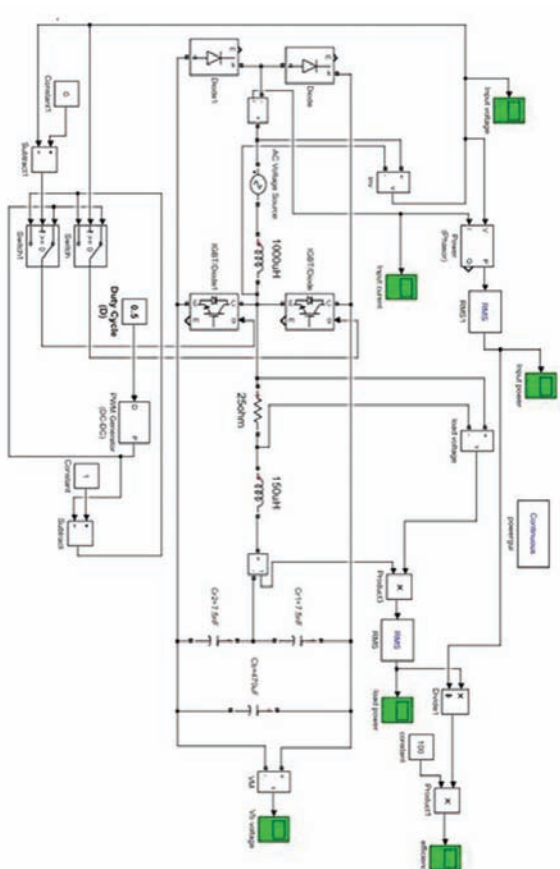
جدول (۲) بیانگر خلاصه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو نوع مبدل رزونانسی سری یکی از نوع کلاسیک و دیگری مبدل پیشنهادی



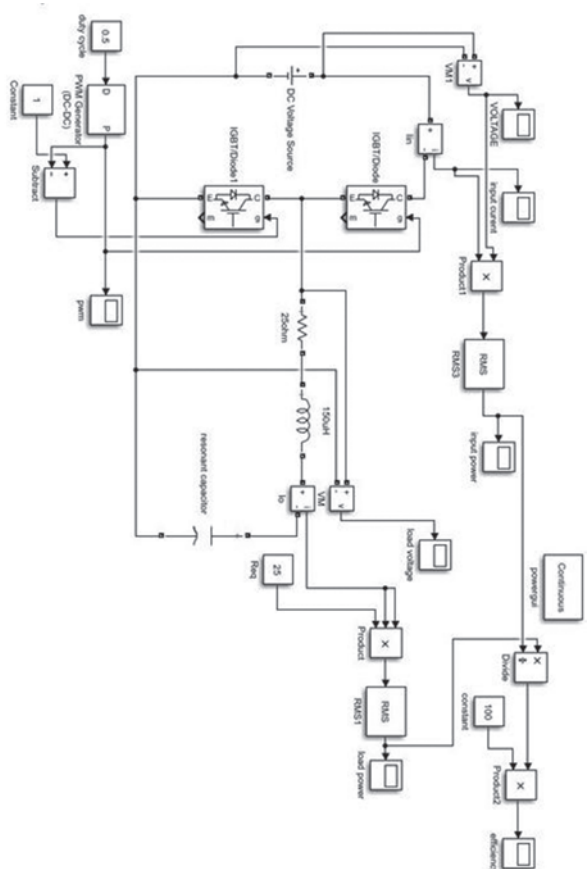
شکل ۱۴: نمودار تغییرات راندمان مبدل پیشنهادی نسبت به زمان به ازای (D=0.5)



شکل ۱۳: نمودار تغییرات توان اکتیو انتقالی مبدل پیشنهادی نسبت به زمان به ازای (D=0.5)



شکل ۱۶: شماتیک سیمولینک مدار مبدل پیشنهادی



شکل ۱۵: شماتیک سیمولینک مدار مبدل رزونانسی سری کلاسیک

از چند اندوکتور اضافی (کمکی) به عنوان یکی از راهکارهای عملی پیشنهاد می‌شود. نحوه پیچش و استقرار این سیم پیچ‌ها می‌بایست طوری باشد که میدان‌های مغناطیسی تولید شده توسط سیم پیچ اصلی را تنظیم نموده و سپس راندمان سیستم را جهت رسیدن به گرادین حرارتی مطلوب بهبود دهد.

چالش‌های مهم در این زمینه می‌باشد. در این پژوهش با ایجاد تغییر در ساختار مداری مبدل رزونانسی سری کلاسیک و همچنین تغییر در نحوه کلیدزنی آن توان اکتیو انتقالی به بار سیستم اجاق القایی (سیم پیچ و تابه) افزایش یافته و زمان طبخ غذا کاهش می‌یابد و از طرفی راندمان نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. به منظور همگن‌سازی درجه حرارت در سطح فلز (تابه) استفاده

tional Conference on System Sciences Copyright (c) IEEE, 1998.

[36] Zantiago, G., Sauer, P.W., Weber, D., "Enhancement of Linear ATC Calculations by the Incorporation of Reactive Power Flows", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 619-623, May 2003.

[37] Gan, D.; Luo, X.; Bourcier, D.V.; Thomas, R.J., "Min-max Transfer Capability: A New Concept", Proc. Of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001.

[38] Zan Y., Shaaban, M., Li, M., Liu, H., Ni, Y., Wu, F., "ATC Calculation with Steady-State Security Constraints Using Benders Decomposition", IEE Proceedings Generation and Transmission Distribution, Vol. 150, No. 5, pp. 611-615, Sep. 2003.

[39] Peijie Li, Ling Zhu, Xiaoqing Bai, Hua Wei, "Available Transfer Capability Calculation Constrained with Small-Signal Stability Based on Adaptive Gradient Sampling", Advanced Control and Optimization for Complex Energy Systems, doi.org/10.1155/2020/3912717 .2020

[40] Sayah ,S ,Hamouda ,A". Optimal power flow solution of integrated AC-DC power system using enhanced differential evolution algorithm", International Transactions on Electrical Energy Systems, p. e2737, 2018.

[41] T. L. Duong, T. T. Nguyen, N. A. Nguyen, T. Kang, "Available Transfer Capability Determination for the Electricity Market using Cuckoo Search Algorithm", Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol.10, pp: 5340-5345, doi.org/10.48084/etasr.3338, 2020.

[42] Devesh Shukla, S.P. Singh, "Real-time estimation of ATC using PMU data and ANN", Vol. 14, Iss.17, pp: 3604 – 3616, DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1260, 2020.

[43] Available Transfer Capability Definitions and Determination, A Framework for Determining Available Transfer Capabilities of the Interconnected Transmission Networks for a Commercially Viable Electricity Market, June 1996. "ftp://ftp.nerc.com/pub/sys/all_updl/docs/pubs/atcfinal.pdf"

[44] 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.

[45] Greene, S.; Dobson, I.; Alvarado, F.L.; Sauer, P.W., "Initial Concepts for Applying Sensitivity to Transfer Capability", NSF Workshop on ATC, Urbana IL, USA, June 1997.

[46] Greene, S.; Dobson, I.; Alvarado, F.L., "Sensitivity of Transfer Capability Margins with a Fast Formula", Preprint Dec. 1999, Submitted to IEEE Transactions On Power System.

[47] Gravener, M.; Nwankpa, C.O., "Available Transfer Capability And First Order Sensitivity", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 512-518, May 1999.

[48] Ejebe, G.C.; Waight, J.G.; Santos-Nieto, M.; Tinny, W.F., "Fast Calculation of Linear ATC", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1112-1116, Aug. 2000.

[49] Xiao, Y.; Song, Y.H., "ATC Evaluation by Stochastic programming", IEEE Power Engineering Review, pp. 50-52, Sep. 2000.

[50] Dai, Y.; McCalley, J.D.; Vittal, V., "Simplification, Expansion and Enhancement of Direct Interior Point Algorithm for Power System Maximum Loadability", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1014-1021, Aug. 2000.

[51] Van Hertem, D, Verboomen, J, Purchala, K, Belmans, R, Kling, W., "Usefulness of DC power flow for active power flow analysis with flow controlling devices," in AC and DC Power Transmission", ACDC 2006. The 8th IEE International Conference on, 2006: 58-62: IET.

[52] Cook, RD, Miller, SS, Shafer, DA, "Available transfer capability applying linear phasor methods to the ac power flow", in Power Systems Conference and Exposition (PSC), 2011 IEEE/PES, 1-8, 2011.

[53] Devesh Shukla, Shiv P. Singh, "Aggregated Effect of Active Distribution System on Available Transfer Capability Using Multi-Agent System Based ITD Framework", IEEE Systems Journal (Early Access), pp: 1 - 12, DOI: 10.1109/JSYST.2020.3000930, 29 June 2020.

[54] Xin Sun, Zhongbei Tian, Yufei Rao, Zhaohui Li, Pietro Tricoli, "Probabilistic available transfer capability assessment in power systems with wind power integration", IET Renew. Power Gener., Vol. 14 Iss. 11, pp. 1912-1920, doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1383, 2020.

جدول ۲: خلاصه نتایج حاصل از شبیه سازی با تنظیم زمان وظیفه در (D=0.5)

نتایج شبیه سازی در فضای سیمولینک		نوع
مبدل پیشنهادی	مبدل کلاسیک	
ولتاژ ۴۵۹ ولت	ولتاژ ۲۳۰ ولت	ولتاژ دو سر سیم پیچ اجاق
۷/۵۳	۳/۹۹	جریان سیم پیچ اجاق
۱۹۳۱ وات	۴۸ وات	توان اکتیو ورودی به مبدل
۱۷۱۵ وات	۴۷۸ وات	توان اکتیو انتقالی به سیم پیچ اجاق
۲۱۶ وات	۱۷۰ وات	تلفات مبدل
٪ ۸۸/۸	٪ ۷۳/۸	راندمان مبدل
4P	P	قدرت مصرفی برای طبخ غذا
t/4	t	زمان طبخ غذا
w=4p*t/4	w=P*t	انرژی هدررفته
1.20 η	η	ارزیابی راندمان

مراجع

[1] Mühlbauer, History of Induction Heating and Melting. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2008

[2] Trentin, P. Zanchetta, J. Clare, and P. Wheeler, "Automated optimal design of input filters for direct ac/ac matrix converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 7, pp. 2811-2823, Jul. 2012.

[3] L. Hao Leo, A. P. Hu, and G. A. Covic, "A direct ac-ac converter for inductive power-transfer systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 2, pp. 661-668, Feb. 2012

[4] M. K. Kazimierczuk, High-Frequency Magnetic Components. New York: John Wiley & Sons, 2009.

[5] F. Dughiero, M. Forzan, C. Pozza, and E. Sieni, "A translational coupled electromagnetic and thermal innovative model for induction welding of tubes," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 483-486, 2012.

[6] F. Forest, S. Faucher, J.-Y. Gaspard, D. Montloup, J.-J. Huselstein, and C. Joubert, "Frequency-synchronized resonant converters for the supply of multiwindings coils in induction cooking appliances" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 441-452, February 2007.

[7] F. Forest, E. Labouré, F. Costa, and J.-Y. Gaspard, "Principle of a multiloop/single converter system for low power induction heating" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 15, no. 2, pp. 223-230, March 2000.

[8] J. Acero, P. J. Hernández, J. M. Burdío, R. Alonso, and L. A. Barragán, "Simple resistance calculation in litz wire planar windings for induction cooking appliances" IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 4, pp. 1280-1288, April 2005.

[9] H. N. Pham, H. Fujita, K. Ozaki, and N. Uchida, "Estimating method of heat distribution using 3-D resistance matrix for zone-control induction heating systems" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 7, pp. 3374- 3382, July 2012.

[10] H. Pham, H. Fujita, K. Ozaki, and N. Uchida, "Phase angle control of high frequency resonant currents in a multiple inverter system for zone-control induction heating," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 11, pp. 3357-3366, 2011

[11] Samago, Hector, et al. "Direct AC-AC resonant boost converter for efficient domestic induction heating applications." IEEE Transactions on Power Electronics 29.3:1128-1139. (2014)

[۱۲] رحیم اسفندیار پور، حسام اسفندیار پور، «مبدل های DC-DC رزونانسی با رگولاسیون بار و خط»، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، دانشگاه استنفورد آمریکا.



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر الگوریتم حافظه کوتاه مدت طولانی و کاربردهای آن

میترا حسینی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ایران، hoseinimitra@yahoo.com
مهرداد جلالی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ایران، dr_mehrdadjalali@yahoo.com

چکیده

شبکه‌های عصبی بازگشتی مدلی از روش‌های یادگیری عمیق است که در چند دهه گذشته موضوع بسیار پرطرفداری بوده است. شبکه‌های عصبی LSTM روشی جدید از پردازش اطلاعات است که به خاطر ساختار زنجیرهای که دارد بر روی داده‌هایی با سری زمانی فعالیت می‌کند که منجر به رخدادهای قدرتمندی در حوزه یادگیری عمیق می‌شود. اگر LSTM ویژگی مهمی در دنباله ورودی در گام‌های ابتدایی را تشخیص دهد، به دلیل داشتن حافظه کوتاه مدت طولانی می‌تواند این اطلاعات را طی مسیر طولانی منتقل کند و این گونه وابستگی‌های بلندمدت احتمالی را دریافت و حفظ می‌کند. در این مقاله سعی شده است انواع LSTM و کاربرد آنها در پردازش متن در حوزه‌های طبقه‌بندی متون و تحلیل احساسات و استخراج ویژگی بررسی شود علاوه بر این ما شناسایی اهداف آینده را مد نظر قرار داده و مسیر تحقیق آینده برجسته شده است.

کلمات کلیدی: یادگیری عمیق، شبکه‌های بازگشتی LSTM، پردازش متن، استخراج ویژگی

A Survey of Long Short Term Memory (LSTM) a Lgorithm and its Application

— Mitra Hoseini, Department of Computer Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, hoseinimitra@yahoo.com
— Mehrdad Jalali, Department of Computer Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, dr_mehrdadjalali@yahoo.com

Abstract

Recursive neural networks are a model of deep learning techniques that has been a very popular topic for the past few decades. LSTM neural networks are a new way of processing information that, because of its chain structure, operates on time-series data that leads to powerful deep learning events if LSTM is an important feature in the input sequence. Recognize in the early stages because of its short-term memory, it can transmit this information over long distances and receive and maintain such potential long-term dependencies. In this article, we have tried to examine the types of LSTM and their application in text processing in the fields of text classification, emotion analysis and feature extraction. In addition, we have also considered identifying future goals and highlighting the path of future research

Keywords: Deep learning, Recurrent neural network LSTM, Natural language processing, Feature extraction

۱- مقدمه

شبکه‌های عصبی بازگشتی در سال ۱۹۸۰ ایجاد شدند اما در چند سال اخیر بوده است که این گونه از شبکه‌ها به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. قدرت بازنمایی زیاد آنها به این دلیل است که قادر هستند محاسبات زیادی را به صورت موازی در چندین لایه انجام دهند و مدل مناسبی از داده‌ها ارائه دهند. این گونه از شبکه‌های عصبی به‌طور خاص برای پردازش داده‌های سری یا دنباله‌دار مفید هستند و در آنها هر نورون یا واحد پردازشی قادر به حفظ حالت داخلی به منظور حفظ اطلاعات مرتبط با ورودی قبلی می‌باشد. در شبکه‌های عصبی بازگشتی اطلاعات تنها از یک مسیر حرکت می‌کند که جهت آن رو به جلو می‌باشد.

درواقع اطلاعات با شروع از نورون‌های ورودی و گذر از لایه‌های پنهان (در صورت وجود) به سمت گره‌های خروجی می‌روند. در این شبکه حلقه یا دوری وجود ندارد [۱] از دیگر کاربردهای شبکه‌های عصبی بازگشتی در حوزه‌های مختلف می‌توان داده‌های مبتنی بر زمان یا سری‌های زمانی^۱ مثل داده‌های پیش‌بینی هوا [۲] داده‌های مالی و داده‌های دریافتی از سنسورها، ویدئوها، متن‌ها و... که در واقعیت به‌صورت سریال/سری^۲ هستند را نام برد. به‌طور کلی می‌توان گفت شبکه‌های عصبی بازگشتی خانواده‌ای از شبکه‌های عصبی اند که به طور ویژه جهت پردازش داده‌های سری (یا دنباله‌ها) طراحی شده‌اند که در ادامه به جزئیات بیشتری پرداخته می‌شود. در بخش ۳ درباره پیش زمینه‌ای از دلایل استفاده از شبکه عصبی بازگشتی و مشکلات شبکه‌های RNN بررسی می‌شود، در بخش ۴ به موضوع شبکه‌های LSTM و دلایل استفاده از آن و جزئیات الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود، در بخش ۵ در مورد شبکه‌های LSTM دو طرفه در حوزه تحلیل احساسات در متن پرداخته می‌شود، در بخش ۶ نوع دیگر از شبکه‌های LSTM که شبکه‌های GRU می‌باشد و کاربرد آنها در طبقه‌بندی متن مورد بررسی قرار می‌گیرد، بخش ۷ شامل بررسی LSTM‌های درختی می‌باشد و فصل آخر جمع‌بندی و کارهای آینده است.

۲- پیش زمینه

۲-۱- کاربرد شبکه‌های عصبی

در شبکه‌های عصبی، بهبود عملکرد با توجه به یک حافظه بسیار طولانی مدت در پارامترهای مدل، محقق می‌شود. پس از یادگیری از مجموعه آموزش‌ها، یک شبکه عصبی هنگام نمایش مثال‌های مشابه، اما پیش‌تر دیده نشده، به احتمال زیاد تصمیم درستی می‌گیرد. موارد بسیاری وجود دارد که داده‌ها به‌طور طبیعی توالی تشکیل می‌دهند و در این موارد، ترتیب و محتوا به همان اندازه مهم هستند. از جمله نمونه‌های داده‌های توالی ویدئو، موسیقی، توالی DNA و... است. هنگام یادگیری از داده‌های توالی، حافظه کوتاه مدت برای پردازش داده‌ها بسیار کاربردی می‌باشند. برای همین مدت‌هاست که محققان به یادگیری ماشین و شبکه عصبی مکرر روی آورده‌اند.

شبکه‌های عصبی بازگشتی RNN

RNN به‌طور کلی یک شبکه عصبی بازگشتی^۳ است. در این نوع شبکه‌ها چالش این است که حافظه کوتاه مدت محدود است چرا که آموزش شبکه‌های بسیار عمیق دشوار است و حافظه RNN بسیار کوتاه است. RNN‌ها به دو نوع با توجه به ورودی تبدیل می‌شوند یا ورودی را مرحله به مرحله می‌بیند یا ورودی را به صورت یکجا می‌بیند [۳].

۲-۲- اصول محاسبات شبکه‌های عصبی

برای پردازش توالی از بردارهای X رابطه (۱) برای هر مرحله استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} h_t &= f_w(h_{t-1}, x_t) \\ h_t &= \tanh(w_{hh}h_{t-1} + w_{hx}x_t) \\ y_t &= w_{hy}h_t \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن h_t لایه پنهان جدید و f_w تابع با پارامترهای w و x_t ورودی برداری در هر مرحله و h_{t-1} ورودی لایه پنهان مرحله قبلی و w_{hh} وزنی که روی ورودی اعمال می‌شود و w_{hx} وزنی که روی لایه قبلی و w_{hy} وزنی که روی خروجی شبکه اعمال می‌شود و y_t خروجی است که متناسب با ورودی تشکیل می‌شود. نکته‌ای که در RNN‌ها وجود دارد این است که پارامترها در هر مرحله ثابت هستند. منظور از ثابت بودن این نیست که وزن‌ها تغییر پیدا نمی‌کنند بلکه وزن یک پارامتر خاص در هر مرحله به‌روزرسانی می‌شود. وظیفه RNN این است که اطلاعات که پیش‌تر مشاهده شده را حفظ کنند و به کارهایی که در حال انجام است مرتبط سازند در بعضی مواقع ما نیاز داریم به اطلاعات گذشته نزدیک نگاه کنیم تا متوجه اطلاعات حال حاضر بشویم مانند زمانی که ما مدل زبانی‌ای ساخته‌ایم که تلاش می‌کنیم کلمه بعدی را با توجه به کلمات قبلی پیش‌بینی کنیم زمانی که فاصله بین کلمات کم است شبکه عصبی بازگشتی قابلیت پیش‌بینی دارند. ولی ممکن است مواردی وجود داشته باشد که ما به اطلاعات بیشتری نیاز داشته باشیم برای تشخیص کلمه بعدی به صورت کلی ممکن است فاصله بین کلمات و جایی که به این اطلاعات نیاز داریم زیاد باشد [۴]. هرچه این فاصله افزایش پیدا می‌کند، شبکه‌های عصبی بازگشتی قدرت‌شان در به یاد آوردن و استفاده از اطلاعاتی که در گذشته دورتر یاد گرفته‌اند کاهش پیدا می‌کند و به عبارتی توانایی استفاده از اطلاعات گذشته دورتر را ندارند. حافظه خوبی ندارند و نمی‌توانند اطلاعات را برای زمان طولانی نگهداری کنند به‌صورت تئوری شاید از عهده کار برآیند ولی در عمل این‌گونه نیست. این مشکل به دلیل وجود محو شدگی گرادینت^۴ است [۵] که رابطه (۲) این موضوع را بیان می‌کند.

$$\begin{aligned} s_t &= \tanh(Ux_t + Ws_{t-1}) \\ \hat{y}_t &= \text{softmax}(v_{st}) \\ E_t(y_t, \hat{y}_t) &= -y_t \log \hat{y}_t \\ E(y, \hat{y}) &= \sum_t E_t(y_t, \hat{y}_t) \\ &= \sum_t y_t \log \hat{y}_t \end{aligned} \quad (2)$$

U پارامتر وزن‌ها بین ورودی و سلول و V لایه پنهان y_t خروجی و به صورت Softmax است و s_t که از Ux_t و $W_{s,t-1}$ اثر می‌پذیرد.

۲-۲-۱- تابع خطا

فرض کنید توالی کامل از کلمات داریم و در لایه پنهان مقداری کلمه تولید می‌شود با توجه به سلول‌های قبلی و ورودی در نهایت یک خروجی تولید می‌کنیم که بر اساس خروجی به‌دست آمده خطایی داریم، برای محاسبه V از رابطه (۳) استفاده می‌کنیم.

$$\frac{\partial E_3}{\partial v} = \frac{\partial E_3}{\partial \hat{y}_3} \frac{\partial \hat{y}_3}{\partial v} = \frac{\partial E_3}{\partial y_3} \frac{\partial y_3}{\partial z_3} \frac{\partial z_3}{\partial v} \quad (3)$$

$$z_3 = V s_3$$

S1 به S2 وابسته است و S1 به S0 وابسته است و ما توالی بزرگ از ضربها داریم، در رابطه (۴) خواهیم دید که همین توالی از ضربها ما را دچار مشکل می‌کند.

$$\frac{\partial E_3}{\partial W} = \sum_{k=0}^3 \frac{\partial E_3}{\partial \hat{y}_3} \frac{\partial \hat{y}_3}{\partial s_3} \frac{\partial s_3}{\partial s_k} \frac{\partial s_k}{\partial W} \quad (4)$$

$$\frac{\partial s_3}{\partial s_1} = \frac{\partial s_3}{\partial s_2} \frac{\partial s_2}{\partial s_1}$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial W} = \sum_{k=0}^3 \frac{\partial E_3}{\partial \hat{y}_3} \frac{\partial \hat{y}_3}{\partial s_3} \left(\prod_{j=k+1}^3 \frac{\partial s_j}{\partial s_{j-1}} \frac{\partial s_k}{\partial W} \right)$$

$$s_t = \tanh(Ux_t + Ws_{t-1})$$

برای تمام مسیرها که از W گذر می‌شود باید محاسبات را داشته باشیم. این ضربهای زیاد از W باعث به وجود آمدن مشکل می‌شود. اگر مقادیر W بزرگ باشد یک حالت انفجار به وجود می‌آورد و مقدار وزن‌ها به سمت بی‌نهایت می‌رود. زمانی که مشتقات در هم ضرب می‌شوند ممکن است به سمت صفر میل کنند که به آن مشکل محوشدگی گردان گفته می‌شود. برای حل مشکل از LSTM استفاده می‌شود.

۳- LSTM (حافظه کوتاه مدت طولانی)

در LSTM سه گیت ورودی وجود دارد، گیت ورودی، اطلاعات از ورودی می‌گیرد، گیت خروجی، اطلاعات به خروجی می‌دهد، گیت فراموشی اطلاعات را از حافظه پاک می‌کند [۶] که ما به جزئیات پیاده‌سازی آن نمی‌پردازیم و در این مقاله سعی شده کاربردهای آنها مد نظر نویسنده باشد.

LSTMها به انواع مختلفی تقسیم میشوند در این مقاله درباره مدل حافظه کوتاه مدت طولانی دوطرفه^۷، دروازه‌های سلول‌های بازگشتی^۸، حافظه کوتاه مدت طولانی درختی^۹ و کاربرد آنها در حوزه تحلیل احساسات، طبقه‌بندی متن و استخراج ویژگی و... بررسی شده است.

۴- Bidirectional Long Short-Term Memory (مدل حافظه کوتاه مدت طولانی دوطرفه)

LSTM دوطرفه یکی از روش‌های یادگیری عمیق است که برای یادگیری داده‌های ترتیبی^{۱۰} مورد استفاده قرار می‌گیرد. LSTM دوطرفه به این صورت است که در زمان آموزش، یک بار از ابتدا به انتهای داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و وزن‌ها و مقادیر بایاس اصلاح می‌شوند، یک بار از انتها به ابتدا فرآیند آموزش انجام می‌شود و ماتریس‌های مربوطه تنظیم می‌شوند و در انتها این دو گروه نورون، در کنار یکدیگر در قسمت خروجی قرار می‌گیرند. (به طور مثال اگر ۳۰۰ بعد داشته باشیم، خروجی این لایه ۶۰۰ بعد است که ۳۰۰ تای اول مربوط به LSTM از اول به آخر و ۳۰۰ تای دوم مربوط به LSTM از آخر به اول است). به طور کلی از دو لایه حافظه‌ی کوتاه مدت طولانی تشکیل شده که به صورت موازی اجرا می‌شوند که در پردازش متن، لایه‌ی اول جمله و لایه‌ی دوم معکوس جمله را به عنوان ورودی دریافت می‌کند [۷].

- تحلیل احساسات

تحلیل احساسات مجموعه‌ای از روش‌ها، تکنیک‌ها و ابزارهای

تشخیص و استخراج اطلاعات ذهنی مانند نگرش‌ها و نظرات از زبان است [۸]. این روش، پیام را با توجه به قطبیت آن که مثبت، منفی یا خنثی باشد، دسته‌بندی می‌کند. سه تکنیک متفاوت در این حوزه وجود دارد که عبارتند از: تکنیک یادگیری ماشین، تکنیک مبتنی بر قانون و تکنیک مبتنی بر فرهنگ واژه [۹] این موضوع یکی از فعال‌ترین زمینه‌های پژوهشی در پردازش زبان طبیعی و متن کاوی در سال‌های اخیر بوده است. تشخیص مثبت، منفی یا خنثی بودن نظر یا احساس بیان شده در ویژگی‌ها از داده‌های متنی شناسایی خودکار ویژگی‌ها، از طریق به کارگیری روش‌های نحوی مبتنی بر مدل‌سازی موضوعی^{۱۱} و یادگیری عمیق^{۱۲} امکان‌پذیر است [۱۰].

- طبقه‌بندی متن

طبقه‌بندی متن یکی از زیرمجموعه‌های داده کاوی است. در پردازش متن سعی می‌شود دانشی از متون خام استخراج شود. این موضوع از سال ۱۹۶۰ مورد توجه محققان بوده است و در دهه ۹۰ میلادی توجه به این موضوع بیشتر شده است. به دسته‌بندی متن، «برچسب گذاری متن» یا «طبقه‌بندی متن» نیز گفته می‌شود [۲۷].

- LSTM های دوطرفه در تحلیل احساسات

معماری مقاله [۱۱] به شیوه‌ی تقسیم و غلبه ارایه شده است که ابتدا جملات را به انواع مختلفی تقسیم کرده سپس تحلیل احساسات را بر روی هر کدام از انواع جملات به طور مجزا انجام می‌دهد. هر گروه از جملات به یک شبکه عصبی یک بعدی برای رده‌بندی احساسات داده می‌شود.

رویکردهای یادگیری عمیق تا حدودی می‌توانند ویژگی‌هایی ساختاری و معنایی را از متن بدون نیاز به مهندسی ویژگی‌ها که دارای نیاز به کار و زمان بیشتری دارد، استخراج کنند. در سال ۲۰۱۴، کالچیرنو و همکارانش [۱۲] و کیم مدل‌های CNN مختلفی برای رده‌بندی احساسات ارایه دادند که در این مقاله [۱۳] به آن پرداخته شده است.

در این مقاله از شبکه‌ی d-CNN برای شناسایی قطبیت احساسات استفاده و از مدل BiLSTM-CRF برای استخراج هدف از جملات ورودی استفاده می‌شود و هر جمله طبق تعداد اهدافی که در آن به صورت آشکارا اظهار شده‌اند دسته‌بندی می‌شوند. BiLSTM-CRF از مدل‌های توالی عصبی عمیق هست که از یک لایه BiLSTM و یک لایه CRF که روی هم قرار گرفته‌اند که برای یادگیری توالی‌ها تشکیل شده است. به CRF^{۱۳} مثل یک لایه نگاه می‌شود که مدل گرافیکی احتمالی غیرمستقیم است که توزیع‌های خطی ورود به سیستم بر روی خروجی‌های ساختار یافته مورد بررسی قرار می‌دهد. [۱۴]. در مدل BiLSTM-CRF از یک Softmax برای پیش‌بینی خروجی استفاده می‌شود. همچنین از تکنیک دوریز پس از لایه ورودی BiLSTM-CRF استفاده شده است تا از بیش برآزش^{۱۴} بر روی داده‌های آموزشی جلوگیری شود. این تکنیک توسط هی برای نخستین بار معرفی شد [۱۵]. استفاده از d-CNN 1 برای قطبیت احساسات بر روی هر نوع جمله شبکه d-CNN 1 ابتدا توسط کیم مطرح شد [۱۳].

این شبکه جملات با طول مختلف را به عنوان ورودی دریافت و بردارهای با طول ثابت را به عنوان خروجی تولید می‌کند. قبل از آموزش، بردارهای تعبیه شده^{۱۵} برای هر کلمه از کلمات کل جملات ورودی تولید می‌شود. در لایه کانولوشن، چندین فیلتر با ابعاد پنجره‌های متفاوت بر روی بردارهای تعبیه شده حرکت می‌کنند تا یک کانولوشن یک بعدی انجام شود. از لایه‌ی Pooling، برای انتخاب کردن مفیدترین ویژگی‌های محلی به کار می‌رود. توابع فعال‌ساز

غیر خطی element-wise اعمال می‌شود.

یکی از کاربردهای LSTM در این مقاله این است که می‌تواند چندین هدف که در یک جمله باشد و یا حتی اگر هدفی در جمله نباشد را بتواند به راحتی تشخیص دهد و طبقه‌بندی نماید.

- استفاده از LSTM دو طرفه در متون فارسی

با توجه به افزایش روز افزون داده‌های متنی و همچنین اهمیت اطلاعات استخراج شده از این داده‌ها، کاربرد طبقه‌بندی متون بسیار احساس می‌شود. نظر کاوی هم یکی از استفاده‌های طبقه‌بندی متون می‌باشد که کاربردهای آن در ارزیابی کالاها و استقبال جمعی از یک موضوع یا یک اتفاق بسیار به چشم می‌آید [۱۶]. تا به حال تمرکز بیشتر روش‌های ارایه شده بر روی زبان انگلیسی بوده است که در آن‌ها چالش‌های موجود در دیگر زبان‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. یکی از عمده‌ترین چالش‌های موجود در زبان فارسی، تعداد زیاد پسوندها برای فرم‌های مختلف کلمات است مانند «من می‌روم» و «تو می‌روی» [۱۷] که با استفاده از LSTM سعی در حل این مشکل با توجه به فاعل کرده است. به‌طور تقریبی تا به حال بیشتر روش‌های معرفی شده در بحث نظر کاوی از روش‌ها و الگوریتم‌های سنتی یادگیری ماشین مثل رگرسیون لجستیک^۴، بی‌زین ساده^{۱۷} و ماشین بردار پشتیبان^{۱۸} استفاده می‌کردند. که هر سه این الگوریتم‌ها با توجه به نحوه عملکردشان نیاز به بردار ویژگی‌ها با طول ثابت دارند. برای استخراج بردار ویژگی‌ها با طول ثابت، یک روش بسیار ساده و معقول استفاده از روش سید واژگان است [۱۸] در این روش ساخت بردارها بدون توجه به مکان حضور کلمات در جمله و شباهت معنایی بین کلمات صورت می‌گیرد. در نظر نگرفتن این ترتیب کلمات باعث می‌شود، امکان تشخیص و تمیز دادن جملات با ترکیب کلمات یکسان و بار معنایی متفاوت وجود نداشته باشد [۱۹] که این موضوع باعث ایجاد خطا در روند انجام طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به این امر که برای نظر کاوی در زبان فارسی دادگان بزرگ با ناظر وجود ندارد، این مقاله در ابتدا بردارهای کلمات خود را به‌صورت بدون ناظر بر روی تمام پیکره خود آموزش داده است. برای این امر از مدل چندتایی پرشی استفاده شده است مدل چندتایی پرشی سعی می‌کند با پیش‌بینی کلمات همسایه‌ی کلمه اصلی، یک نمایش برداری برای آن بدست بیاورد. [۲۰] پس از آن بردارها را به‌عنوان ورودی به مدل‌های شبکه عصبی مکرر و شبکه عصبی حافظه کوتاه مدت ماندگار دوسویه داده می‌شوند و مدل‌ها با استفاده از داده‌های برچسب‌دار آموزش می‌یابند. چون در عملیات طبقه‌بندی (نظر کاوی) جملات یکجا دریافت می‌شوند، امکان استفاده از دنباله‌های آینده نیز وجود دارد این نمایش برداری شامل اطلاعات سطح بالایی است که در آن خلاصه‌ای از اطلاعات متن موجود است. این نمایش برداری را می‌توان به‌عنوان ویژگی، در عملیات طبقه‌بندی استفاده کرد [۲۱].

- استفاده از LSTM دو طرفه و ترکیب با TF-IDF برای وزن دهی به احساسات

در مقاله [۲۲] برای نمایش کلمات از بردار کلمات استفاده می‌شود و برای وزن دهی به این بردار کلمات از الگوریتم سنتی TF-IDF بردارهای وزنی کلمه استفاده می‌شود. بردارهای کلمه‌ای وزندار به حافظه کوتاه مدت دو جهته BiLSTM وارد می‌شوند تا اطلاعات زمینه را به‌طور موثر در نظر بگیرند، گرایش احساسات توسط طبقه‌بندی شبکه عصبی پیشگام^{۱۹} بدست می‌آید. در این مقاله، اینکه آیا کلمه‌ای حاوی اطلاعات که شامل احساسات است یا خیر، با تطبیق فرهنگ لغت احساسات تعیین می‌شود. در حال حاضر، فرهنگ لغت احساسات هاونت^{۲۰}، فرهنگ ملی احساسات دانشگاه ملی تایوان^{۲۱} و فرهنگ

لغت چینی^{۲۲} و سه مورد هستند که به‌طور معمول استفاده می‌شوند. جملات توکن‌گذاری می‌شوند و بعد تبدیل به بردار و در مرحله بعد وارد شبکه عصبی بازگشتی BiLstm می‌شوند. برای کار تجزیه و تحلیل احساسات، قطبیت احساسات از فرمول که در مقاله [۲۲] وجود دارد استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل احساسات اساساً جزو وظایف دسته بندی متن هستند و تنها با بردار کلمات نمی‌توان احساسات را بدست آورد. روند این مقاله این گونه است که در مرحله اول، وزن بردارهای کلمه که طبق فرمول TF-IDF به‌وجود می‌آید به‌عنوان ورودی‌های مدل BiLSTM استفاده می‌شود. سپس، بردارهای متن وارد طبقه‌بندی شبکه عصبی پیشخور می‌شوند عملکرد فعال‌سازی شبکه عصبی پیشخور عملکرد ReLU است.

- استفاده از LSTM دو طرفه و تابع خطا

در مقاله [۲۳] درباره سه مجموعه داده به‌طور کامل متداول مبتنی بر نظرات عمومی درباره فیلم‌ها صحبت شده است. از مجموعه داده‌ها مجموعه داده‌های [۲۴] MR، [۲۵] SST2 و [۲۶] IMDb استفاده شده است. مشارکت‌های اصلی این مقاله عبارتند از: از روش تعبیه بدون نظارت استاندارد برای وزن‌های اولیه استفاده شده است، به نام بردار GloVe سپس، یک لایه LSTM دو طرفه، و یک لایه میانگین Pooling استفاده شده است. لازم به ذکر است، فقط به وابستگی‌های طولانی مدت میان کلمات در این مقاله توجه شده است. در این مطالعه، از یک روش باینری برای پیش‌بینی احساس مثبت یا منفی یک سند استفاده شده است. روش این مقاله شامل یک لایه ورودی که شامل یک لایه تعبیه شده، یک لایه BiLstm است و به دنبال آن گروهی از مجموعه لایه‌های متوسط و ماکسیمم Pooling و یک لایه سیگموئید در خروجی است. لایه ورودی به‌عنوان نقطه شروع شبکه در نظر گرفته می‌شود. لایه ورودی نمونه‌های داده را به‌عنوان دنباله‌ای از شاخص‌های منحصر به فرد با همان طول تبدیل می‌کند و شاخص‌ها با توجه به فرهنگ لغت به دست می‌آید. هر شاخص مربوط به یک کلمه منحصر به فرد در مجموعه داده‌ها به یک بردار ویژگی با ارزش واقعی تبدیل می‌شود. این بردارهای با ارزش واقعی در کنار هم قرار می‌گیرند و ماتریسی را تشکیل می‌دهند که ماتریس تعبیه شده نامیده می‌شود. از بردار GloVe ۳۰۰ بعدی به‌عنوان یک بردار تعبیه کلمه از قبل آموزش دیده استفاده شده است. برای نمایش بهتر اطلاعات متنی، از مدل BiLstm استفاده می‌شود. خروجی‌های لایه BiLstm به‌طور همزمان به ماکسیمم میانگین لایه‌های Pooling انتقال می‌یابد و بعد با هم ادغام می‌شوند و وارد لایه خروجی می‌شوند. از آنتروپی به‌عنوان یک تابع برای طبقه‌بندی احساسات باینری استفاده شده است که فرمول آن در مقاله [۲۳] وجود دارد. پیش پردازش با هدف حذف اطلاعات بیپهوده از داده‌های متن خام انجام شده است و به‌عنوان یک کار اساسی در تجزیه و تحلیل احساسات در نظر گرفته می‌شود. شبکه‌های عصبی استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شیب تصادفی SGD الگوهای اساسی و پیچیده را از داده‌ها می‌آموزند و در این مقاله نیز از SGD استفاده شده است. بهینه‌سازی فرآیندی برای جستجوی پارامترهایی است که می‌تواند یک عملکرد خاص را به بیشینه برساند یا آن را به کمینه برساند. جنبه مهم یادگیری عمیق، انتخاب یک تابع ضرر مناسب و سپس کاهش مقدار آن نزدیک به صفر است. در این مقاله از تابع ضرر آنتروپی باینری استفاده شده است که یک انتخاب ایده‌آل برای طبقه‌بندی باینری است. گره شبکه یک واحد محاسباتی است که از اتصال ورودی (های) وزنی، عملکرد انتقال و اتصال خروجی تشکیل شده است به‌طور خاص، اگر تعداد گره‌ها در یک لایه BiLstm بسیار

جدول ۱: مقایسه بین انواع روش‌های Bi-LSTM در حوزه تحلیل حساسات

مرجع	سال انتشار	الگوریتم	نوع شبکه عصبی	معیارهای اندازه‌گیری	مزایا
[۱۱]	۲۰۱۷	تحلیل احساسات	Bi-LSTM	دقت	ترکیبی از Bi-LSTM و استفاده از CRF که نوعی مدل احتمالی است
[۲۷]	۲۰۱۷	تحلیل احساسات	Bi-LSTM	دقت-فراخوانی	به وجود آوردن نمایش برداری از متون فارسی
[۲۲]	۲۰۱۹	تحلیل احساسات	Bi-LSTM	دقت-فراخوانی	برای وزن احساسات فرمول خاصی در نظر گرفته می‌شود.
[۲۳]	۲۰۲۰	تحلیل احساسات	Bi-LSTM	صحت-دقت-هزینه محاسبات-زمان اجرا	استفاده از تابع ضرر برای کاهش خطا در Bi-LSTM

– استفاده از GRU و متد Bag of Words در طبقه‌بندی متن
در مقاله [۳۰] به یکی از مشکلات در طبقه‌بندی متن پرداخته است این که چگونه می‌توان دقت طبقه‌بندی را افزایش داد و از مشکل خلوتی^{۲۷}، یعنی پراکندگی معنانشناسی داده‌ها نسبت به زمینه در طبقه‌بندی متون جلوگیری کرد. در قسمت نمایش داکيومنت‌ها برای هر کلمه از روش Bag of Words استفاده شده است، این نمایش متنی وقوع کلمات را در یک سند تعریف می‌کند. برای جلوگیری از بیش برآزش بهترین ویژگی‌ها به‌عنوان ورودی استفاده می‌شود. با توجه به مدل نمایش داکيومنت‌ها انتخاب ویژگی بسیار مفید و باعث افزایش دقت الگوریتم می‌شود.

– طبقه‌بندی براساس GRU و ماشین‌های پشتیبان
در مقاله [۳۱] از یک طبقه‌بندی متن براساس مدل مبتنی بر رویکردهای بهبود یافته با ارایه یک ماشین بردار پشتیبان خطی SVM به‌عنوان جایگزین Softmax در لایه خروجی نهایی یک مدل GRU استفاده شده است. علاوه بر این، تابع آنتروپی با یک تابع مبتنی بر حاشیه جایگزین می‌شود. ساختار کلی این مقاله این گونه است که در مرحله نخست ویژگی‌های مجموعه داده به شبکه GRU وارد می‌شوند و بعد مقادیر اولیه پارامترهای یادگیری وزن از طریق آموزش تنظیم می‌شوند. ارزش حالت سلول شبکه GRU بر اساس ویژگی‌های ورودی و پارامترهای یادگیری محاسبه می‌شود. برای به کمینه رساندن ضرر از روش بهینه‌سازی مادام استفاده شده است. در این مقاله به سه قسمت توجه می‌شود. نخست بر روی شبکه GRU متمرکز شده است که شیب ناپدید شدن و انفجار را به کم‌ترین مقدار برساند. در مرحله دوم از تابع فعال‌سازی واحد خطی اصلاح شده LRelu در معادله اصلاح شده جایگزین کرده است. ثابت شده است که واحدهای LRelu عملکرد بهتری نسبت به سیگموئید غیر خطی برای DNNهای پیش رو دارند و در آخر با اجرای ماشین بردار پشتیبان خطی SVM به‌عنوان جایگزینی Softmax سنتی در لایه خروجی نهایی یک مدل GRU سعی در بهبود عملکرد داشته است.

– شبکه عصبی Bi-GRU مبتنی بر توجه
این [۳۲] مقاله با استفاده از مکانیسم توجه، رویکرد جدیدی را برای طبقه‌بندی متن پیشنهاد می‌کند. در این مقاله یک شبکه عصبی Bi-GRU دو طرفه مبتنی بر توجه استفاده می‌شود که FABG در این مقاله نامیده می‌شود. از Bi-GRU برای یادگیری اطلاعات معنایی متن استفاده می‌کند. به منظور استفاده از مدل در اطلاعات کلیدی، از مکانیزم یانگ [۳] استفاده می‌شود. در [۳۳] مکانیسم توجه و شبکه‌های توجه سلسله مراتبی یانگ، تاثیر طبقه‌بندی متن را

کم باشد، توانایی یادگیری شبکه محدود می‌شود و ممکن است منجر به کمبود شود. در عوض، اگر تعداد گره‌ها خیلی زیاد باشد، پیچیدگی افزایش می‌یابد و ممکن است باعث بیش برآزش شود برای این منظور، یک لایه BiLSTM را فقط با ۱۶ گره استفاده شده است و این مدل بدون هیچ‌گونه کم کاری یا پرتحرکی، عملکرد خوبی دارد. در لایه تعبیه، از مقدار دوریز ۰٫۳ استفاده شده است.

۵-Gated Recurrent Unit (دروازه‌های سلول‌های بازگشتی)

معماری GRU یا همان Gated Recurrent Unit در سال ۲۰۱۴ توسط چو و همکاران معرفی شد [۲۸] «دروازه‌های سلول‌های واحدهای بازگشتی» (Gated Recurrent Units Cells | GRU) نوعی از سلول‌های حافظه کوتاه مدت طولانی^{۲۳} هستند. این سلول‌ها نیز از گیت‌هایی برای جلوگیری از مفقود شدن اطلاعات استفاده می‌کنند، اما این کار را تنها با استفاده از دو گیت «به روز رسانی»^{۲۴} و «بازنشانی»^{۲۵} انجام می‌دهند. این امر موجب می‌شود که آن‌ها اندکی کمتر شفاف باشند و در عین حال، سرعت آن‌ها اندکی بیشتر است زیرا همه جا از اتصالات کمتری استفاده می‌کنند. در اصل، دو تفاوت بین LSTM و GRU وجود دارد که در ادامه بیان شده‌اند. سلول‌های GRU، حالت سلول پنهانی که توسط یک گیت خروجی محافظت می‌شود را ندارند و ورودی را ترکیب می‌کنند و گیت را در به روزرسانی گیت، فراموش می‌کنند.

– ترکیبی از GRU و LSTM

در مقاله [۲۹] از دوتا LSTM استفاده شده است که به ترتیب و به طور همزمان اطلاعات زمینه را از طریق LSTM و GRU می‌گیرد. معماری آن این گونه است که از طریق محاسبه تشابه بین اطلاعات محتوایی که به‌طور موازی مورد بررسی قرار گرفته است ماتریسی مشترک ایجاد می‌کند. ورودی هر ماتریس یک بردار کلمه است به طور موازی اطلاعات وارد LSTM و GRU می‌شود، خروجی لایه LSTM که (SL) نامیده می‌شود و به‌عنوان سطر در نظر گرفته می‌شود و خروجی لایه GRU که (SG) نامیده می‌شود به‌عنوان ستون ماتریس است. ماتریس توجه تمام عناصر (SL) و (SG) را با هم مقایسه می‌کند. به دلیل افزایش تعداد پارامترها تعدادشان باعث بیش برآزش^{۲۶} می‌شود. از آنجا که LSTM و GRU اطلاعات متنی را گرفته‌اند، بردارهای ویژگی می‌توانند یک ماتریس متنی ایجاد کنند. به منظور استخراج اطلاعات معنی دار، مدل پیشنهادی ترکیب و جمع‌سازی را در ماتریس توجه انجام می‌دهد تا مشکل بیش برآزش حل شود و به اطلاعات دقیق‌تر دست یابد.

مرجع	سال انتشار	نوع الگوریتم	نوع شبکه عصبی بازگشتی	معیارهای اندازه‌گیری	مزایا
[۲۹]	۲۰۲۰	طبقه بندی متن	GRU	دقت و سرعت همگرایی	ایجاد یک ماتریس خروجی مشترک از GRU و LSTM
[۳۰]	۲۰۱۹	طبقه بندی متن	GRU	دقت و میانگین مربعات خطا	استفاده از bag of word برای انتخاب ویژگی
[۳۱]	۲۰۲۰	طبقه بندی متن	GRU	دقت و صحت	استفاده از SVM به جای softmax
[۳۲]	۲۰۱۹	طبقه بندی متن	Bi-GRU	صحت	استفاده از لایه توجه در انتخاب کلمات کلیدی

فرزندان از نخستین فرزند تا k امین فرزند می‌باشد و در بخش داخلی تعداد سلول حافظه و حالت مخفی و دروازه فراموشی به تعداد فرزندان است. همان‌طور که در رابطه (۵) مشاهده می‌کنید.

$$\begin{aligned}
 h_j &= \sum_{k \in C_j} h_k \\
 i_i &= \sigma(W_i x_j + U_i h_j + b_i) \\
 f_{jk} &= \sigma(W_f x_j + U_f h_k + b_f) \\
 o_j &= \sigma(W_o x_j + U_o h_j + b_o) \\
 u_j &= \tanh(W_u x_j + U_u h_j + b_u) \\
 c_j &= i_j \odot u_j + \sum_{k \in C_j} f_{jk} \odot c_k \\
 h_j &= o_j \odot \tanh c_j
 \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن دروازه ورودی، دروازه خروجی، سلول حافظه، لایه پنهان، گیت فراموشی برای هر فرزند، k بردار ورودی برای هر کلمه جمله مجموعه فرزند برای هر نود است.

– مدل LSTM درختی مرتب N تایی

اگر در یک LSTM درختی، فاکتور انشعاب بیشتر از n باشد و یا اینکه فرزندان مرتب شده باشند، یعنی بتوان فرزندان را از ۱ تا n ایندکس کرد، میتوانیم از LSTM درختی مرتب N تایی استفاده کنیم. در این مدل ترتیب فرزندان مهم است پس با توجه به رابطه (۶) می‌توان نتیجه گرفت که

$$\begin{aligned}
 i_i &= \sigma(W_i x_j + \sum_{l=1}^n U_{il} h_{jl} + b_i) \\
 f_{jk} &= \sigma(W_f x_j + \sum_{l=1}^n U_{fkl} h_{jl} + b_f) \\
 o_j &= \sigma(W_o x_j + \sum_{l=1}^n U_{ol} h_{jl} + b_o) \\
 u_j &= \tanh(W_u x_j + \sum_{l=1}^n U_{ul} h_{jl} + b_u) \\
 c_j &= i_j \odot u_j + \sum_{l=1}^n f_{jl} h_{jl} \odot c_{jl} h_j \\
 h_j &= o_j \odot \tanh c_j
 \end{aligned} \quad (6)$$

برای هر فرزند k یک ماتریس جداگانه در نظر گرفته می‌شود و باعث می‌شود شرایط بهتر فرزندان را در نظر بگیرد. به طور مثال یک حوزه انتخاباتی در نظر بگیرد که در آن فرزند چپ گره با یک عبارات اسمی مطابقت دارد و سمت راست فرزند با یک عبارات فعلی مطابقت دارد.

بهبود می‌بخشد. یانگ فقط یک بار به کل خروجی‌های رمزگذار وزن اختصاص می‌دهد. به منظور توجه بیشتر به اطلاعات کلیدی از شبکه عصبی Bi-GRU دو طرفه بر اساس مکانیسم توجه استفاده می‌شود. این مکانیسم برای تمرکز بر اطلاعات کلیدی استفاده می‌شود FABG با اختصاص وزن به خروجی‌های رمزگذاری شده مراحل فعلی و قبلی که از مکانیسم توجه استفاده می‌کند، بردارهای هر مرحله را دوباره محاسبه می‌کند. با استفاده از تغییرات وزنی که در لایه توجه داده است جواب‌ها بهبود می‌یابند.

۶- Tree-LSTM (حافظه کوتاه مدت طولانی درختی)

نوع دیگر از LSTM نمایش درختی آن است در ابتدا LSTM به صورت ساختار زنجیره‌ای بوده است که برای افزایش قابلیت حفظ اطلاعات خیلی دور، به ساختار درختی توسعه داده شده است. مدل‌های غیر حساس به ترتیب، به دلیل عدم توانایی تشخیص تفاوت‌های معنایی و وابستگی‌های زبان طبیعی نسبت به مدل‌های حساس، به ترتیب کلمه یا ساختار نحوی، برای بازنمایی جملات مناسب نیستند. برای مثال مدل‌های غیر حساس به ترتیب، تفاوت بین دو جمله‌ی «گره از درخت بالا می‌رود» و «درخت از گره بالا می‌رود» را تشخیص نمی‌دهند. به همین دلیل است که به مدل‌های حساس به ترتیب متوالی و یا مدل‌های با ساختار درختی روی می‌آوریم. به ویژه مدل‌های با ساختار درختی به دلیل تفسیر نحوی ساختار جمله، یک گزینه مناسب و جذاب زبانی است. مدل‌های بازگشتی حساس به ترتیب، قادر نیستند که اطلاعات خیلی قدیمی را به یاد بیاورند بنابراین برای حل این مشکل مدل‌های درختی پیشنهاد شدند. مدل درختی ساختار نحوی جمله را نیز بررسی می‌کند پس برای بازنمایی عبارات مناسب‌تر است. مدل LSTM با ساختار درختی مانند LSTM استاندارد، دارای گیت‌های ورودی و خروجی و سلول حافظه و حالت مخفی می‌باشد. تفاوت LSTM استاندارد و LSTM درختی در این است که در مدل با ساختار درختی، بردارهای گیت شده و به روزرسانی سلول حافظه وابسته به حالت‌های تعداد فرزندان است و همچنین برای اینکه بشود اطلاعات را از هر فرزند دلخواه ترکیب کرد، به جای یک گیت فراموشی واحد، برای هر فرزند یک گیت فراموشی داریم. دو نوع درخت LSTM درختی داریم:

Child-Sum Tree-LSTMs، N-ary Tree-LSTM هر دو نوع قادرند که اطلاعات را از واحدهای چند فرزندی خود ترکیب کنند.

– مدل Child-Sum Tree-LSTMs

مانند LSTM است با این تفاوت که hj مجموع حالت‌های مخفی

فرض کنید در این حالت تاکید بر عبارت فعل در نمایش سودمند است. سپس می توان پارامترهای Ufk را به گونه ای آموزش داد که اجزای f1j فرزند چپ نزدیک به ۰ (به عنوان مثال، «فراموش») باشد، در حالی که اجزای f2j فرزند راست نزدیک به ۱ است (به عنوان مثال، «حفظ») باشد [۳۴].

- استخراج رابطه معنایی با استفاده از ساختار درختی LSTM
استخراج رابطه معنایی برای ساخت خودکار گراف دانش بسیار مهم است و از انواع وظایف پردازش زبان طبیعی مانند پاسخ به پرس و جو، جستجوی معنایی و پیامد پشتیبانی می کند [۳۵]. وظیفه استخراج رابطه معنایی^{۲۸} بیشتر وظیفه شناسایی موجودیت از متون خام و استخراج روابط معنایی بین موجودیت استخراج شده را بر عهده دارد. روش های موجود فقط ویژگی های سطح واژگان^{۲۹} را در نظر می گیرند و بیشتر ویژگی های نحوی^{۳۰} را نادیده می گیرند و در نتیجه عملکرد استخراج رابطه ضعیفی دارند. در مقاله [۳۵] با استفاده از حافظه کوتاه مدت LSTM، ویژگی های ساختاری^{۳۱} را بر اساس درخت وابستگی^{۳۲} در یک جمله به وجود می آورد. برای افزایش عملکرد استخراج رابطه، LSTM متوالی دو طرفه با ساختار درختی با توجه به منظور شناسایی ویژگی های مبتنی بر کلمه^{۳۳} و ارزش سهم کلمات در جمله استفاده کرد. LSTM با ساختار درختی می تواند به راحتی روابط وابستگی را ترکیب کرده و اصطلاحات معنایی را دقیق تر کند تا روابط معنایی را بیشتر تنظیم کند. ویژگی های استخراج شده هر کلمه به LSTM متوالی دو جهت داده می شوند. خروجی این شبکه در هر مرحله زمانی ورودی لایه توجه است. با استفاده از جریان اطلاعات پایین به بالا، وابستگی های موجودیت با یکدیگر تعامل دارند تا نوع رابطه را به روشی نظارت شده تعیین کنند. LSTM جهت بالا به پایین اطلاعات برتر را از گره پایین ترین جد مشترک^{۳۴} LCA به گره موجودیت^{۳۵} در گره LCA منتقل می کند مسیر LCA به عنوان یک درخت باینری و وابستگی نحوی در نظر گرفته می شود LSTM پایین به بالا و بالا به پایین در تعامل اطلاعاتی کار استخراج رابطه نقش دارند که منظور همان LSTM دو طرفه با ساختار درختی است. سهم کلمات با توجه به روابطی که استخراج شده است متفاوت است LSTM متوالی دو طرفه با مکانیسم توجه برای شناسایی ویژگی های کلمات در جمله شامل اطلاعات موقعیتی موجودیت و سهم کلمات، که به عنوان ورودی های مجموعه LSTM ساختاری دو طرفه استفاده شده است. ویژگی های مبتنی بر کلمه و ویژگی های ساختاری مبتنی بر وابستگی نحوی برای بهینه سازی عملکرد کار استخراج رابطه بهم پیوسته اند. پایین ترین لایه معماری لایه تعبیه است که شامل بردارهای عددی^{۳۶} هستند و بردار وابستگی^{۳۷} بردار برچسب گذاری کلمات^{۳۸}، در نمایشی برداری به عنوان ورودی LSTM دو طرفه استفاده می شود.

- استخراج رویداد با LSTM-Tree

در این مقاله [۳۶] یک مدل استخراج رویداد جدید بر روی یک شبکه LSTM درختی و یک شبکه Bi-GRU ساخته شده است. در این مقاله به طور همزمان برای به دست آوردن نمایندگانی از جمله کاندیدهای رویدادها و شناسایی نوع رویداد مورد بررسی قرار می گیرد، که در مقایسه با مواردی که از LSTM، CNN یا فقط ساختار درختی LSTM استفاده می کند بهتر است. حالت پنهان هر گره در LSTM درختی برای پیش بینی برچسب آرگومان های کاندید و شناسایی طبقه بندی تمام آرگومان های یک رویداد استفاده می شود. طبق استخراج خودکار محتوا^{۳۹}، که اختصار ACE می نامند دو وظیفه برای استخراج رویداد وجود دارد تشخیص رویداد و شناسایی نوع رویداد

است. در روش سنتی نوع رویداد را با توجه به واژگان اصلی که توسط ACE داده شده است انتخاب می شود که نتیجه شناسایی نوع رویداد در روش بالا به دلیل مشکلات آبخاری ناشی از خطا در هر مرحله تاثیر زیادی بر عملکرد کلی سیستم استخراج رویداد دارد. در عین حال، اگر نتوان از اطلاعات عنصر رویداد به عنوان مرجع در فرآیند شناسایی نوع رویداد استفاده کرد، عملکرد تشخیص نوع رویداد نیز تاثیر منفی خواهد گذاشت. دقت در تشخیص کلمه کاندید برای شناسایی نوع رویداد با شناسایی کلمه اصلی بسیار مهم است وظیفه شناسایی نوع رویداد این است که، مدل به طور مستقیم نوع رویداد را با استفاده از Tree-LSTM و Bi-GRU تشخیص می دهد با استفاده از نمایشی که از جمله به دست می آورد. این مدل از طریق آرایه دو نوع شبکه، زمینه و اطلاعات نحوی^{۴۰} از بازنمایی جمله واقعی را به دست می آورد. Tree-LSTM ساختار درخت وابستگی هر جمله را به عنوان ورودی می گیرد تا اطلاعات نحوی به دست آید به تدریج اطلاعات کل درخت را در هر گره قرار می دهد. جمله به عنوان ورودی Tree-LSTM در نظر گرفته می شود که با استفاده از تعبیه جمله نمایشی غنی تر همراه با ویژگی های نحوی به دست آید. نمایش برداری یک کلمه در این مقاله از سه قسمت تشکیل شده است: جدول تعبیه سازی کلمه^{۴۱}، نگ گذاری اجزای کلمه^{۴۲}، انواع نهادها^{۴۳}.

۷- جمع بندی

حال که به بررسی پردازش متن با استفاده از انواع مختلف LSTM پرداخته ایم می توانیم بگوییم مدلی است که، ساختار خوبی برای پیش بینی داده های متنی دارد. بسیاری از پیاده سازی های متنی دارای نمایش داده های متغیر در زمان های مختلف هستند که نیاز به رویکردهایی دارند که به دلیل سازگاری آسان آنها برای پیش بینی بسیار مناسب است از LSTM و مشتقات آن استفاده شود. صنعت پردازش متن با استفاده از یادگیری عمیق در زمینه های مختلفی کاربرد دارد. تعداد کارهای تحقیقاتی هرساله افزایش می یابد با این حال ما تازه در سال های ابتدایی این دوره هستیم، مطالعات بیشتری اجرا خواهند شد. در این بررسی ما می خواهیم تحقیقات پیشرفته شبکه های عصبی بازگشتی در حوزه پردازش متن برجسته تر کنیم. تحقیقات ما نشان می دهد روش های باورنکردنی در این زمینه وجود دارد. در این تحقیق ابتدا توضیحی از تاریخچه شبکه های عصبی گفته شده است، سپس مقدمه ای بر الگوریتم RNN و مشکلات و دلایل به وجود آمدن الگوریتم های LSTM مطرح شده است. بعد انواع LSTM ها مورد بررسی قرار گرفت و برای هر نوع LSTM کاربردهای آن در حوزه های مختلفی مانند تشخیص احساسات، رویدادها، استخراج ویژگی و ... مقالاتی مورد بررسی قرار گرفت و همچنین جزییات معماری و نقاط قوت و پارامترهای آن مقاله نیز مورد بررسی قرار گرفت و برای هر بخش جدولی تشکیل شده و مشخصات مقاله در آن آورده شده است و نشان دادیم که حل مساله با استفاده از LSTM و یا نوع خاصی از LSTM دقت را بهبود می بخشد.

- چالش ها و کارهای آینده

حال می خواهیم وضعیت فعلی تحقیق و دستاوردهای به دست آمده را بیان کنیم. ما پیش تر به سازگاری روش های LSTM در حوزه پردازش متن اشاره کرده ایم. تکنیک های LSTM بسیار امیدوارکننده هستند و بسیار مفیدتر خواهد بود زمانیکه مشکلات این روشها در حوزه های مختلف مورد بررسی قرار بگیرد. خلاصه سازی روش های مختلف در جدولها در بخش پایانی به یکپارچه سازی تجزیه و تحلیل در حوزه های مختلف کمک می کند. همچنین به تازگی روش های

volutional Recurrent Neural Networks Based on Time-Series Data," Complexity, vol. 2020, pp. 1-8, 2020.

- [3] A. Amidi and S. Amidi. Recurrent Neural Networks cheat-sheet. Available: <https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-230/cheatsheet-recurrent-neural-networks>
- [4] S. Hochreiter, Y. Bengio, P. Frasconi, and J. Schmidhuber, "Gradient flow in recurrent nets: the difficulty of learning long-term dependencies," ed.
- [5] Y. Bengio, P. Simard, and P. Frasconi, "Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult," IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 5, no. 2, pp. 157-166, 1994.
- [6] C. Olah. (2015). Understanding LSTM Networks. Available: <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>
- [7] A. Graves, N. Jaitly, and A.-r. Mohamed, Hybrid speech recognition with Deep Bidirectional LSTM. 2013, pp. 273-278.
- [8] M. V. Mäntylä, D. Graziotin, and M. Kuutilla, "The evolution of sentiment analysis—A review of research topics, venues, and top cited papers," Computer Science Review, vol. 27, pp. 16-32, 2018/02/01/ 2018.
- [9] M. D. Devika, C. Sunitha, and A. Ganesh, "Sentiment Analysis: A Comparative Study on Different Approaches," Procedia Computer Science, vol. 87, pp. 44-49, 2016
- [10] F. Abid, M. Alam, M. Yasir, and C. Li, "Sentiment analysis through recurrent variants latterly on convolutional neural network of Twitter," Future Generation Computer Systems, vol. 95, pp. 292-308, 2019.
- [11] T. Chen, R. Xu, Y. He, and X. Wang, "Improving sentiment analysis via sentence type classification using BiLSTM-CRF and CNN," Expert Systems with Applications, vol. 72, pp. 221-230, 2017/04/15/ 2017.
- [12] N. Kalchbrenner, E. Grefenstette, and P. Blunsom, "A convolutional neural network for modelling sentences," arXiv preprint arXiv:1404.2188, 2014.
- [13] Y. Kim, "Convolutional neural networks for sentence classification," arXiv preprint arXiv:1408.5882, 2014.
- [14] A. McCallum, "Efficiently inducing features of conditional random fields," arXiv preprint arXiv:1212.2504, 2012.
- [15] T. Duyu, Q. Bing, W. Furu, D. Li, L. Ting, and Z. Ming, "A Joint Segmentation and Classification Framework for Sentence Level Sentiment Classification," IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 23, no. 11, pp. 1750-1761, 2015.
- [16] B. Liu, "Sentiment analysis and opinion mining," Synthesis lectures on human language technologies, vol. 5, no. 1, pp. 1-167, 2012.
- [17] A. Bagheri, M. Saraee, and F. de Jong, "Sentiment classification in Persian: Introducing a mutual information-based method for feature selection," in 2013 21st Iranian conference on electrical engineering (ICEE), 2013, pp. 1-6: IEEE.
- [18] Q. Le and T. Mikolov, "Distributed representations of sentences and documents," in International conference on machine learning, 2014, pp. 1188-1196.
- [19] R. Socher, J. Pennington, E. H. Huang, A. Y. Ng, and C. D. Manning, "Semi-supervised recursive autoencoders for predicting sentiment distributions," in Proceedings of the 2011 conference on empirical methods in natural language processing, 2011, pp. 151-161.
- [20] T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. S. Corrado, and J. Dean, "Distributed representations of words and phrases and their compositionality," in Advances in neural information processing systems, 2013, pp. 3111-3119.
- [21] P. Wang, Y. Qian, F. K. Soong, L. He, and H. Zhao, "A unified tagging solution: Bidirectional lstm recurrent neural network with word embedding," arXiv preprint arXiv:1511.00215, 2015.
- [22] G. Xu, Y. Meng, X. Qiu, Z. Yu, and X. Wu, "Sentiment analysis of comment texts based on BiLSTM," IEEE Access, vol. 7, pp. 51522-51532, 2019.
- [23] Z. Hameed and B. Garcia-Zapirain, "Sentiment Classification Using a Single-Layered BiLSTM Model," IEEE Access,

« ادامه در صفحه ۸۶

جدیدی برای بهبود پیش‌بینی‌های LSTM ارائه شده است و سعی بر این بود در این روش‌ها ورودی‌های بهتری به LSTM داده شود تا بتواند وابستگی‌های بین کلمات درست تشخیص داده شود تا بتواند به درستی وزن‌ها به‌روزرسانی شود و با توجه به کاربردهای آنها پیش‌بینی را بهینه‌سازی کند. این تحقیق ممکن است دریچه جدیدی از فرصت‌ها را در حوزه‌های مختلف با توجه به کاربردهای نام برده شده در پردازش متن باز کند مانند کاربرد در حوزه علم مواد در همه جنبه‌های شیمی مواد، از کشف و طراحی مواد جدید تا مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد آنها، تعریف روابط ساختاری، ویژگی و شناسایی ویژگی‌های جدید را کشف خواهد کرد استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Time series
- 2 Sequential
- 3 Recurrent Neural Networks
- 4 Vanishing Gradient
- 5 Exploding
- 6 Vanishing Gradient
- 7 Bi-LSTM
- 8 GRU
- 9 Tree-LSTM
- 10 Sequential
- 11 Topic Modelling
- 12 Deep Learning
- 13 Conditional random fields
- 14 Overfitting
- 15 Word embedding
- 16 logistic regression
- 17 Naive Bayes
- 18 SVM
- 19 Feedforward neural network
- 20 Hownet
- 21 National Taiwan University Sentiment Dictionary (NTUSD)
- 22 Dictionary of Tsinghua University
- 23 LSTM
- 24 Update
- 25 Reset
- 26 Overfit
- 27 Sparsity
- 28 Semantic relations
- 29 lexical-level feature
- 30 Syntactic feature
- 31 Structural features
- 32 Dependency tree
- 33 Word-based features
- 34 lowest common ancestor
- 35 Entity node
- 36 word embedding
- 37 Dependency embedding
- 38 Embedding pos
- 39 Automatic Content Extraction
- 40 Context and syntactic information
- 41 Word embedding table
- 42 PoS embedding table
- 43 Entity type

مراجع

- [1] J. Heaton, I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, "Deep learning, Genetic Programming and Evolvable Machines", vol. 19, no. 1-2, pp. 305-307, 2017.
- [2] Z. Zhang and Y. Dong, "Temperature Forecasting via Con-



مقاله علمی-ترویجی

فناوری‌های نوین در نسل ششم شبکه‌های ارتباطی

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

لیلا محمدی، عضو هیات علمی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران، mohamady@itrc.ac.ir

چکیده

نیازهای رو به رشد ارتباطی که برخی با فناوری نسل پنجم شبکه ارتباطی برآورده نمی‌شوند موجب شروع تحقیقات و هدف گذاری به سمت نسل ششم شبکه ارتباطی شده است. بر اساس منابع و مراجع مختلف، پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۳۰، ظرفیت نسل پنجم شبکه ارتباطی به حد نهایی خود در استانداردهای تعریف شده امروزی برسد. شبکه‌های نسل ششم شبکه ارتباطی بیشتر براساس توسعه معماری نسل پنجم شبکه ارتباطی ایجاد خواهند شد و مزایای به‌دست آمده در نسل پنجم شبکه ارتباطی همانند افزایش مجاز باندهای فرکانسی و معماری بهینه شبکه غیرمتمرکز را به ارث خواهد برد. انتظار می‌رود که نسل ششم شبکه ارتباطی فناوری‌های ارتباطی که امروزه با آنها آشنا هستیم را به‌روزرسانی نموده و در نتیجه عملکرد شبکه‌های مخابراتی به‌طور قابل توجهی ارتقا یابد. با هدف‌گذاری‌های انجام شده، شبکه ارتباطی نسل ششم دارای ویژگی‌های نرخ بیت بالا، قابلیت اطمینان بالا، تاخیر پایین، بازده انرژی بالا، راندمان طیفی بالا خواهد بود.

کلمات کلیدی: نسل ششم شبکه ارتباطی، ماهواره، ترانزیتور، شبکه ناهمگون، ظرفیت کانال ارتباطی

New Technologies in the Sixth Generation of Telecommunication Networks

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

■ Leila Mohammadi, Faculty member of ICT Research Institute, Tehran, Iran, mohamady@itrc.ac.ir

Abstract

Abstract: The growing needs of communication, some of which are not even met by fifth-generation communication network technology, have led to research and targeting of the sixth generation communication network. According to various sources and references, it is predicted that by 2030, the capacity of the fifth generation communication network will reach its final level in today's defined standards. Sixth Generation Communication Networks will be built primarily on the development of the fifth generation communication network architecture, and will inherit the benefits of the fifth generation communication network (for example, allowable frequency bandwidth and optimal decentralized network architecture). It is expected to update the communication technologies for the sixth generation of communication networks and to significantly improve the performance of telecommunication networks that we are familiar

with today. With the goals set, the sixth generation communication network will have the characteristics of high bit rate, high reliability, low latency, high energy efficiency and high spectral efficiency.

Keywords: Sixth generation communication network, satellite, terahertz, heterogeneous network, capacity of communication channel

۱- مقدمه

از زمان ظهور شبکه ارتباطات آنالوگ در دهه ۱۹۸۰ میلادی، پیشرفت‌های فوق‌العاده‌ای در شبکه ارتباطات موبایل به وجود آمده است. این پیشرفت‌ها، یک فرآیند تک مرحله‌ای نیست بلکه در طول چند نسل که استانداردها، ظرفیت‌ها و شیوه‌های مختلفی دارند، رخ داده است. هر نسل به‌طور تقریبی هر ده سال یکبار معرفی شده است [۱]. ظهور نسل ششم شبکه‌های ارتباطی در میان سایر نوآوری‌های موجود، منجر به ایجاد تحول سیستم‌های بی‌سیم به سمت ارایه پوشش‌دهی پیوسته سرویس‌ها به‌وسیله تجمیع شبکه‌های زمینی با ایستگاه‌های مستقر در پلتفرم‌های غیرزمینی می‌شود. در حقیقت در آینده شبکه ارتباطات زمینی به تنهایی نمی‌تواند انعطاف‌پذیری، سازگاری و پوشش مورد نیاز برای برآورده کردن نیازهای کاربران نهایی را فراهم کند. بنابراین ایجاد یک شبکه ترکیبی زمینی و غیرزمینی به‌عنوان یک عامل کلیدی خواهد بود. تکامل شبکه ارتباطی به سمت نسل ششم و بعد از آن، باید بر روی ایجاد یک معماری یکپارچه و کامل (چند لایه و چند بعدی) که در آن عناصر شبکه (مانند ماهواره، زیرساخت‌های زمینی و...) به اشتراک گذاشته می‌شوند و ترافیک می‌تواند به‌صورت پویا مسیریابی شود، هدف‌گذاری نماید.

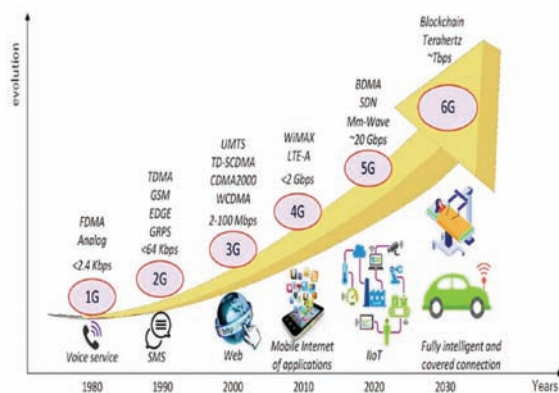
خدماتی مانند سرویس پیام کوتاه (SMS) را نیز پشتیبانی می‌کرد. استاندارد ارتباطی تلفن همراه در نسل دوم، GSM (سیستم جهانی ارتباطات تلفن همراه) نام‌گذاری شد [۳]. نسل سوم ارتباطات سیار در سال ۲۰۰۰ میلادی، با هدف انتقال داده‌های سرعت بالا پیشنهاد شد. این نسل نرخ انتقال داده دست کم 2Mbps و همچنین دسترسی با سرعت بالا به اینترنت را فراهم کرد [۴]. در زمان ظهور این نسل، به منظور دستیابی به رومینگ جهانی، پروژه مشارکت نسل سوم (3GPP) ایجاد شد تا استانداردهای مرتبط با سیستم‌های تلفن همراه تبیین شود [۵]. نسل چهارم ارتباطات سیار، یک شبکه مبتنی بر IP بود که در اواخر دهه ۲۰۰۰ میلادی معرفی شد، این نسل قادر به ارایه سرعت بالای داده تا 1Gbps در مسیر رو به پایین و 500Mbps در مسیر رو به بالا بود. این نسل به وضوح کارآیی طیفی را بهبود بخشید و میزان تاخیر را کاهش داد. علاوه بر این، نسل چهارم شبکه ارتباطی از طریق رومینگ خودکار، امکان تحرک تریمینال را برای ارایه خدمات بی‌سیم در هر زمان و هر مکان فراهم نمود [۶]. نسل بعدی که به‌خاطر ویژگی‌های خاص آن نسل پنجم شبکه ارتباطی نامیده شد، به‌طور تقریبی تست‌های اولیه، ساخت تجهیزات و فرآیند استانداردسازی را تکمیل کرده و به مرحله بهره‌برداری رسیده است. هدف نسل پنجم شبکه ارتباطی، توسعه انقلابی در نرخ ارسال داده‌ها، تاخیر کم، قابلیت اطمینان بالا، کارآمدی مناسب در مصرف انرژی و اتصالات گسترده در شبکه می‌باشد [۷]. 3GPP در نسخه ۱۶ عنوان کرده که استانداردسازی «فاز ۲ 5G» تا پایان سال ۲۰۲۰ بسته می‌شود. این نسخه استاندارد در مورد ارتباطات بین‌المللی تلفن همراه (IMT-2020) در نسل پنجم و الزامات اتحادیه بین‌المللی ارتباط از راه دور (ITU) تدوین شده است. باندهای فرکانسی نسل پنجم شبکه ارتباطی را می‌توان به باند فرکانسی زیر یک گیگاهرتز، باند فرکانسی بین یک تا شش گیگاهرتز و بالاتر از شش گیگاهرتز تقسیم کرد. باندهای زیر یک گیگاهرتز به‌دلیل ویژگی‌های تضعیف کم سیگنال‌های منتشر شده، برای ارایه پوشش گسترده به‌ویژه برای تجهیزات اینترنت اشیا مناسب هستند. باندهای فرکانسی بین یک تا شش گیگاهرتز یک تعادل منطقی بین پوشش و نرخ داده برای خدمات ارایه می‌دهند. طیف فرکانسی بالای شش گیگاهرتز نیز پهنای باند زیادی را در دسترس قرار می‌دهند [۸-۱۰]. نسل پنجم شبکه ارتباطی، فناوری‌های دسترسی پیشرفته‌هایی مانند OFDM، FBMC، UFMF مبتنی بر اصول OFDM استفاده می‌کند. همچنین فناوری‌های جدیدی مانند شبکه ناهمگن فوق متراکم، ارتباط موج میلی‌متری، شبکه چند ورودی - چند خروجی بزرگ (MIMO)، شکل موج تسهیم فرکانس متعامد مقیاس‌پذیر (OFDM)، و دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA) را هدف قرار داده تا نرخ داده انتها به انتها بالا، تاخیر پایین، و مصرف انرژی پایین را در انتقال داده داشته باشد [۱۱].

۲- بررسی ضرورت ایجاد نسل‌های اول تا ششم شبکه ارتباطی

شکل (۱) مشخصات نسل‌های مختلف شبکه ارتباطی را بر حسب زمان از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۳۰ میلادی نشان می‌دهد. در این بخش ابتدا به بررسی مشخصات و تاریخچه نسل‌های مختلف به‌ویژه نسل اول تا پنجم شبکه ارتباطی پرداخته و در نهایت به ضرورت ایجاد و ورود به نسل ششم و بعد از آن خواهیم پرداخت [۲].

۲- بررسی ضرورت ایجاد نسل‌های اول تا ششم شبکه ارتباطی

شکل (۱) مشخصات نسل‌های مختلف شبکه ارتباطی را بر حسب زمان از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۳۰ میلادی نشان می‌دهد. در این بخش ابتدا به بررسی مشخصات و تاریخچه نسل‌های مختلف به‌ویژه نسل اول تا پنجم شبکه ارتباطی پرداخته و در نهایت به ضرورت ایجاد و ورود به نسل ششم و بعد از آن خواهیم پرداخت [۲].



شکل ۱: نسل‌های ارتباطی در گذر زمان [۱]

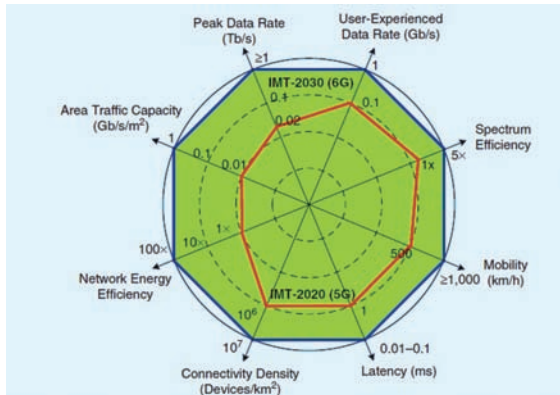
نخستین نسل شبکه ارتباطی بی‌سیم در دهه ۱۹۸۰ میلادی برای خدمات صوتی، با نرخ داده تا 2.4 kbps طراحی شد. نسل اول شبکه‌ی ارتباطی، از سیگنال آنالوگ برای انتقال اطلاعات استفاده می‌کرد و از معایب این نسل مشکلاتی از قبیل Handover، قابلیت انتقال پایین داده و عدم امنیت مناسب بود [۲]. در نسل دوم ارتباطات سیار نرخ داده تا 64kbps افزایش یافت که نه تنها خدمات صوتی بهتر، بلکه

۳- انگیزه‌های شروع تحقیقات و توسعه نسل ششم شبکه ارتباطی

با در نظر گرفتن توسعه فعلی و در حال ظهور ارتباطات بی‌سیم، هدف‌گذاری برای نسل ششم باید برنامه‌ریزی شود. کاربردهای جدید

در آینده نیاز به نرخ داده از مرتبه ترابیت بر ثانیه به وجود خواهد آمد. از آن جمله می‌توان به هولوگرافی رادیویی (تصویربرداری سه بعدی) اشاره کرد. همچنین با افزایش نمایی و گسترش دستگاه‌های اینترنت اشیا در آینده، ضروری است که قابلیت اتصال و پوشش اینترنت اشیا از ظرفیت تعیین شده در نسل پنجم شبکه ارتباطی خیلی بیشتر شود. به منظور امکان ارائه خدمات نوین با توجه به ظهور کاربری‌های مختلف، تنظیمات و بهینه‌سازی شبکه و استفاده از منابع در آینده مبتنی بر روش‌های جدید با استفاده از هوش مصنوعی خواهد بود [۱۲]. با پیشرفت فناوری رایانش کوانتومی، پروتکل‌های رمزنگاری کلاسیک کنونی که بر اساس پیچیدگی‌های محاسباتی استوار هستند رمزگشایی خواهند شد و امنیت ارتباطات و به تبع آن امنیت ملی کشورها در معرض خطر جدی قرار خواهد گرفت. در مقابله با تهدید بیان شده تاکنون دو روش به‌طور کامل متفاوت (از بابت اصول و ابزار کار) ارائه شده است. روش نخست موسوم به رمزنگاری پساکوانتومی، یک روش نرم‌افزاری می‌باشد که مبتنی بر طراحی مسایل پیچیده ریاضی است که رایانه‌های کوانتومی نیز قادر به حل آنها نباشند. روش دوم تحت عنوان ارتباطات و رمزنگاری کوانتومی مبتنی بر استفاده از اصول فیزیک کوانتوم برای انتقال کلید یا پیام است. در آینده با ایجاد شبکه اینترنتی مبتنی بر رایانش کوانتومی امکان ایجاد همزمانی دقیق ساعت‌ها که از الزامات ضروری ارتباطات نسل ششم شبکه ارتباطات مخابراتی می‌باشد، ایجاد خواهد شد [۱۳-۱۴].

همان‌طور که در این شکل مشخص است میزان بیشینه نرخ داده در نسل ششم شبکه ارتباطی به دست کم ۱ ترابیت بر ثانیه خواهد رسید که میزان ۱۰۰ برابر مقدار هدف‌گذاری شده در نسل پنجم خواهد بود. نرخ کاربران از ۰/۱ گیگابیت بر ثانیه به ۱ گیگابیت بر ثانیه یعنی به میزان ۱۰ برابر افزایش خواهد یافت. میزان تأخیر از ۱ میلی‌ثانیه به بازه ۰/۱ تا ۰/۱ میلی‌ثانیه خواهد رسید. میزان ظرفیت ترافیک در سطح به ۱ Gbps/m² می‌رسد که رشد ۱۰۰ برابری را نسبت به نسل پنجم خواهد داشت. میزان کارایی طیف به میزان ۵ برابر و میزان کارایی انرژی به میزان ۱۰۰ برابر رشد خواهد داشت. در نهایت میزان تراکم اتصال ده برابر رشد خواهد داشت [۱۹].



شکل ۲: مقایسه مشخصات فنی ارتباطات در نسل پنجم و ششم شبکه‌های ارتباطی [۱۹]

همچنین پیش‌بینی شده که ترافیک جهانی IP در سال ۲۰۲۲ میلادی سه برابر بیشتر از سال ۲۰۱۷ میلادی خواهد بود و به حدود ۴۰۰ اگزابایت در ماه خواهد رسید [۲۰]. قابل ذکر است که ترافیک ناشی از دستگاه‌های بی‌سیم و موبایل ۷۱ درصد از کل ترافیک IP را تشکیل می‌دهد که تا حد زیادی ناشی از گسترش اینترنت اشیا، افزایش دستگاه‌های موبایل و تبلت‌های هوشمند و همچنین برنامه‌های مبتنی بر محتوا مانند یوتیوب و نت فلیکس است [۲۱-۲۴]. در سال‌های اخیر، به منظور تطبیق با ترافیک عظیم، مهندسان و محققان هر دو حوزه صنعتی و دانشگاهی در حال توسعه فناوری‌های نوین، انجام آزمایش‌ها و ایجاد استانداردهای بین‌المللی برای نسل‌های جدید هستند.

۴- گستره، اهداف و شاخص‌های کلیدی عملکردی نسل ششم شبکه ارتباطی

هر چند بسیاری از شاخص‌های کلیدی عملکردی (KPIs) که برای نمایش توسعه فناوری‌های جاری و نسل پنجم شبکه ارتباطی مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای فناوری نسل ششم شبکه ارتباطی نیز معتبر هستند، با این حال، شاخص‌های کلیدی عملکردی باید به دقت مورد بازبینی قرار گیرند و KPIs جدید در نظر گرفته شوند. برای شاخص‌های کلیدی عملکردی، برخی از نهادها و سازمان‌های معتبر، پیش‌نویس اولیه را برای نیازمندی‌های مورد انتظار از نسل ششم شبکه ارتباطی را همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، ارائه نموده‌اند [۲۵].

۵- چالش‌های پیش روی جهت تحقق نسل ششم شبکه ارتباطی

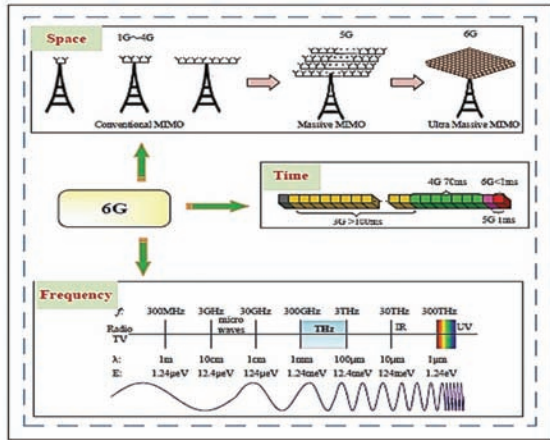
نسل ششم شبکه ارتباطی از نظر استفاده از منابع زمان، فرکانس و

تکرارکننده‌های کوانتومی تجهیزات مهمی برای این نوع شبکه‌ها در ارتباطات راه دور هستند. امروزه ارتباطات کوانتومی در فاصله ۷۶۰۰ کیلومتری با تکیه بر ماهواره‌های LEO تست شده است [۱].

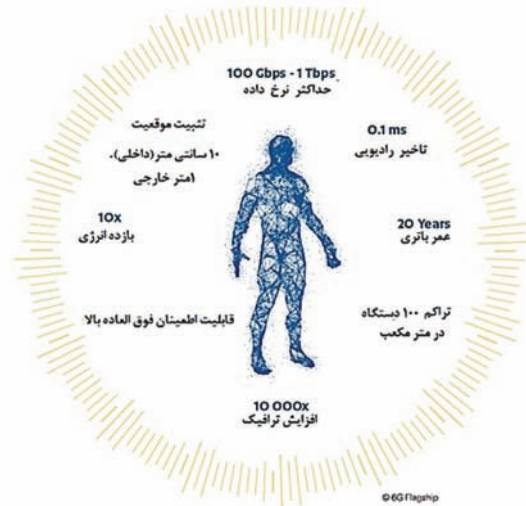
یکی دیگر از مشخصه‌های پیش‌بینی شده در نسل ششم شبکه ارتباطی مجازی‌سازی گسترده تجهیزات و به کارگیری آنها در مدیریت شبکه ارتباطی خواهد بود. بدین ترتیب هزینه‌های تمام شده در بخش توسعه، اجرا و نگهداری شبکه کاهش می‌یابد. هر چند موضوع شبکه‌های خود سازمان ده (SON) از 4G مطرح شده اما به تدریج به واسطه نرم‌افزاری شدن فناوری‌های گسترش یافته است. در این نوع شبکه‌ها سه عامل پیکربندی خودکار، بهینه‌سازی خودکار و همچنین اصلاح خرابی خودکار در نظر گرفته شده که شبکه قادر است در سطوح مختلف بیان شده هوشمندانه اقدام نماید و تجهیزات شبکه قادرند در قالب برنامه‌های نرم‌افزاری در بازه‌های زمانی تعیین شده خود را با شرایط شبکه ارتباطی تطبیق دهند.

در این نوع شبکه‌ها با توجه به ماهیت آنها، تمرکز بر روی مدیریت تداخل و توزیع ترافیک خواهد بود که با توجه به وجود فاکتور بهینه‌سازی خودکار در این نوع شبکه‌ها می‌توان راهکارهای مناسب را تامین نمود. SON در شبکه‌های نسل آتی قادر است تا با توجه به محتوای تقاضای مورد انتظار هر کاربر شامل مشخصات فنی مورد نیاز، پوشش رادیویی و ... کاربران را به شکل نرم‌افزاری مدیریت نمایند. یک مشخصه مهم دیگر که شبکه‌های خود سازمان ده در نسل پنجم و بعد از آن خواهند داشت، خود بهینه‌سازی در تعیین مکان کاربران برای داشتن سرویسی مناسب بر مبنای کیفیت سرویس بالاتر خواهد بود [۱۸-۱۵].

در نسل ششم شبکه ارتباطی، با توسعه کلان‌داده، رایانش ابری، شهر هوشمند و جمع‌شدن شبکه‌های چند بعدی ناهمگون متشکل از زیرساخت‌های زمینی، هوایی و فضایی رشد و توسعه پیدا خواهد کرد. در شکل (۲) نمودار عنکبوتی نسل پنجم و ششم به ترتیب با رنگ آبی و قرمز از دید مشخصات فنی با یکدیگر مقایسه شده است.



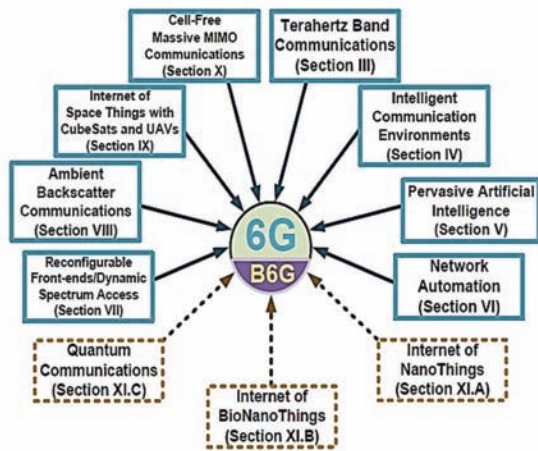
شکل ۴: طرح نسل ششم شبکه ارتباطی بر مبنای منابع زمان، فرکانس و فضا [۲۷]



شکل ۳: اهداف کلی مورد انتظار از نسل ششم شبکه ارتباطی [۲۵]

۶- فناوری‌های پیش‌بینی شده در نسل ششم شبکه‌های ارتباطی

در راستای تحقق نسل ششم شبکه ارتباطی، به این نکته اشاره می‌کنیم که راه‌حل‌های توانمندسازی متعددی در این نسل در نظر گرفته شده و به طور فعال مورد مطالعه قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، بخشی از این فناوری‌ها همانند: ارتباطات در باند فرکانسی تره‌رتز با پهنای باند زیاد، محیط‌های ارتباطی هوشمند، هوش مصنوعی فراگیر، اتوماسیون شبکه در مقیاس بزرگ، ارتباطات با تعداد آنتن زیاد ورودی- خروجی در حالت بدون سلولی، اینترنت اشیا فضایی با کمک ماهواره‌های مکعبی، پهپادها و... ارتباطات ایجاد شده از طریق لامسه (حسی) در محیط، دسترسی پویا به منابع طیفی با پیکربندی قابل تنظیم و... البته فناوری‌های نوید بخش دیگری که انتظار می‌رود آینده ارتباطات را تغییر دهند، و در شکل (۵) آورده شده که هنوز به اندازه کافی برای نسل ششم شبکه ارتباطی بالغ نیستند. نمونه این فناوری‌ها عبارتند از: اینترنت اشیا نانو، اینترنت اشیا زیستی و ارتباطات کوانتومی.



شکل ۵: فناوری‌های پیش‌بینی شده برای نسل ششم مخابراتی و بعد از آن [۲۸]

۷- معماری پیشنهادی برای نسل ششم شبکه ارتباطی

در نسل ششم شبکه ارتباطی، تراکم اتصال به دلیل استفاده از شبکه‌های بسیار ناهمگن، سناریوهای متنوع ارتباطی و داشتن پهنای باند بزرگ در باندهای فرکانسی بالا، ۱۰ تا ۱۰۰ برابر افزایش می‌یابد.

فضا به‌منظور تامین سرعت بالاتر، ظرفیت بیشتر و تاخیر کمتر برای کاربردهای آینده، فوق‌العاده خواهد بود. علاوه بر این، هنگام کار در باندهای فرکانسی بالا در این نسل مانند تره‌رتز، برای حفظ ارتباطات با ظرفیت بالا نیاز به بودجه لینک کافی خواهد بود. با توجه به فرکانس بالای کاری مابین فرستنده و گیرنده، افت شدیدی در سیگنال ایجاد خواهد شد. بنابراین مقدار توان ارسالی می‌تواند مدت طول عمر باتری را کاهش دهد بنابراین این موضوع به‌ویژه در سناریوهایی که از تجهیزات غیرزمینی برای پشتیبانی از سرویس‌های اینترنت اشیا استفاده می‌شود، بسیار مهم است. علاوه بر این، اثر داپلر در سرعت بالا می‌تواند باعث اختلال در سیگنال شود. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، محدودیت منابع مهمی است بنابراین از منابع زمان، فرکانس و فضا در نسل ششم شبکه ارتباطی به صورت زیر استفاده خواهد شد:

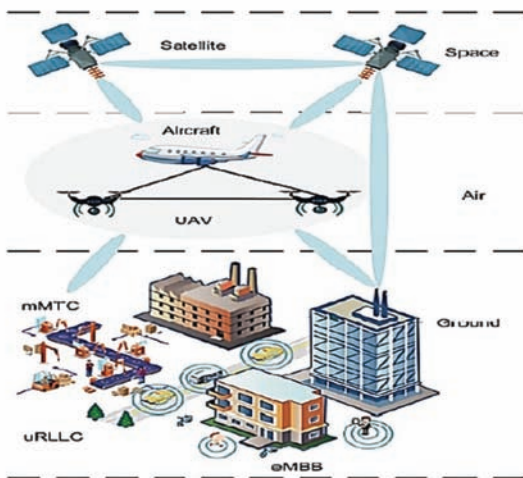
الف) در بعد فضایی؛ برای استفاده بیشتر از چند مسیر، تعداد آنتن‌های مجهز به فرستنده و گیرنده افزایش خواهد یافت. شیوه‌هایی مانند Massive-MIMO، ممکن است صدها تا هزاران ارسال-دریافت را برای ارتباطات تره‌رتز مورد استفاده قرار دهد. در [۲۶]، آنتن آرایه‌ای ۱۰۲۴ تایی برای ارتباط در فرکانس تره‌رتز توصیه شده است. این موضوع به دلیل کاهش طول موج ارسالی ممکن می‌شود. به عنوان مثال، برای ارسال و دریافت در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز، تعداد ۱۴ آنتن را می‌توان در ابعاد ۱×۲ سانتی‌متر مربعی جای داد، در حالی که در فرکانس 1THz، تعداد ۱۰۰۰ آنتن را می‌توان در ابعاد ۱×۲ میلی‌متر مربع جای داد.

ب) در بعد زمانی؛ نسل ششم شبکه ارتباطی حاوی تاخیر کم و دارای معماری بهبود یافته نسبت به نسل پنجم شبکه ارتباطی ارائه خواهد داد.

ج) در بعد فرکانس؛ نسل ششم شبکه ارتباطی از باند فرکانسی بالاتر نسبت به نسل‌های قبلی به منظور بهبود نرخ ارسال داده‌ها استفاده خواهد کرد. باندهای فرکانسی بالا، مانند باند تره‌رتز و حتی باند فرکانسی نور مرئی برای انتقال ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه استفاده خواهد شد.

همچنین در نسل‌های آینده، شبکه‌های ارتباطی زمینی با سیستم‌های هوایی و ماهواره‌ای برای ایجاد شبکه‌های یکپارچه ادغام می‌شوند.

پوشش بی سیم با ظرفیت بالا بکار گرفته شوند. به عنوان مثال، در مناطق روستایی یا اقیانوس‌ها یا هنگامی که برج‌ها خارج از سرویس هستند، فراهم کنند. همچنین هنگامی که فاصله بین دو زیرساخت زمینی افزایش یابد، اتصال بین دو سایت از طریق فیبر نوری ممکن است بسیار گران تمام شود. در این حالت ارتباطات ماهواره‌ای، می‌تواند با انتقال سیگنال‌های کاربر از طریق شبکه فضایی-هوایی زمینی، پوشش مناسب و اتصال دسترسی با ظرفیت بالا را برای دستگاه‌های روی زمین و هوا فراهم کند [۳۳-۳۲]. در [۳۴]، یک معماری یکپارچه بالقوه از شبکه فضایی-زمینی (STN) متشکل از ماهواره، هواپیماها، پهپادها و تجهیزات زمینی را مطابق با شکل (۷) معرفی شده است.



شکل ۷: استفاده از ماهواره‌ها در شبکه ناهمگون نسل ششم شبکه ارتباطی [۳۵]

با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینه طراحی بخش مخابراتی ماهواره‌های جدید انجام شده می‌توان با منظومه‌های ماهواره‌های غیرزمین آهنگ، مانند مگانظومه‌های ماهواره‌ای شرکت Space-X و یا One web با میزان تاخیری در حدود ۲۰ تا ۳۰ میلی ثانیه، می‌توان این نوع سرویس‌ها را در شبکه‌های ارتباطی در آینده تامین نمود. (ج) ایجاد اینترنت همه چیز (IOE): یکپارچه‌سازی و هماهنگی میان تعداد زیادی از عناصر و سنسورهای محاسباتی، اشیا یا دستگاه‌ها، افراد، فرآیندها و داده‌ها با استفاده از زیرساخت اینترنت امکان پذیر خواهد بود. در مقایسه با نسل چهارم شبکه ارتباطی، چگالی اتصال در نسل پنجم شبکه ارتباطی تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد. قابل پیش‌بینی است که تراکم اتصال در نسل ششم شبکه ارتباطی بیشتر شود. این امر فرصت‌های بیشتری را برای ساخت یک شبکه جدید به نام اینترنت صنعتی از چیزها فراهم می‌کند. همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده، این نوع شبکه، اطلاعات بلادرنگ را از حسگرهای مختلف جمع‌آوری می‌کند و آن‌ها را به موقع و سریع به بخش‌های مختلف مورد نیاز انتقال می‌دهد. در برخی کاربردها همانند خودروهای خودران، لازمه این امر داشتن نرخ داده بسیار بالا و تاخیر بسیار پایین و قابلیت اطمینان بالا خواهد بود. علاوه بر این، نسل ششم شبکه ارتباطی می‌تواند نرخ داده 1Tbps و تاخیری به میزان ۰/۱ میلی ثانیه را برای پشتیبانی از این شبکه فراهم کند. انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۲۴ میلادی، ۴/۱ میلیارد اتصال IoT وجود داشته باشد. به طور کلی اینترنت اشیا به‌طور معمول در مورد وسایل فیزیکی یا اشیا است و با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کند، اما IoT هوش شبکه را معرفی می‌کند تا تمام افراد، داده‌ها، فرآیندها و اشیا فیزیکی

همچنین به دلیل وجود ماهواره‌های پرظرفیت و پهپادها، میزان تحرک به بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر بر ساعت خواهد رسید. ساختار شبکه‌های ارتباطی نسل ششم، دارای تغییرات جدید که متکی به فناوری‌های جدید هستند. این تغییرات جدید را می‌توان به‌صورت پوشش جهانی در طیف وسیعی از فرکانس، برنامه‌های کاربردی و امنیت قوی در ارتباطات شبکه خلاصه کرد. برای تامین پوشش جهانی، شبکه‌های ارتباطی نسل ششم، از شبکه‌های ترکیبی در سه بعد فضا، هوا، زمین که شامل سیستم ماهواره، پهپاد، شبکه‌های زمینی، ارتباطات زیرزمینی، ارتباطات دریایی و ارتباطات صوتی زیر آب، بهره‌مند خواهد شد (شکل ۶).

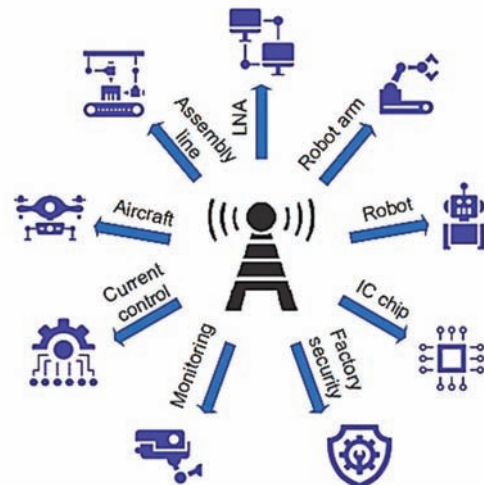


شکل ۶: انواع مختلف کانال‌های ارتباطی بی سیم در نسل ششم شبکه ارتباطی [۲۹] در ادامه به بررسی برخی از کانال‌های ارتباطی در معماری نسل ششم شبکه ارتباطی در بعد فضا می‌پردازیم:

(الف) بکارگیری وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV): پهپاد یا هواپیماهای بدون سرنشین یک عنصر مهم در ارتباطات بی سیم نسل ششم شبکه ارتباطی خواهد بود. در بسیاری از موارد، ارتباطات بی سیم با نرخ داده بالا با استفاده از فناوری پهپاد ارایه خواهد شد. در آینده ایستگاه‌های پایه بر روی پهپادها نصب خواهند شد تا ارتباطات سلولی ایجاد کنند. یک پهپاد دارای ویژگی‌های خاصی است که در زیرساخت ایستگاه‌های پایه ثابت یافت نمی‌شود، مانند استقرار آسان، خط دید قوی و درجات آزادی ارتباطات با تحرک کنترل شده. در شرایط اضطراری مانند بلاای طبیعی، استفاده از زیرساخت‌های ارتباطی زمینی از نظر اقتصادی امکان‌پذیر نیست و گاهی اوقات ارایه هر گونه خدماتی در محیط‌های دور افتاده ممکن نیست. پهپادها به راحتی می‌توانند این شرایط را کنترل کنند. بنابراین، فناوری پهپاد به‌عنوان یکی از فناوری‌های مهم برای ارتباطات نسل ششم شبکه ارتباطی شناخته شده است. در نتیجه، کاربر بدون نیاز به ایجاد تنظیمات دستی در دستگاه به‌طور یکپارچه از یک شبکه به شبکه دیگر حرکت خواهد کرد [۳۰]. به‌طور خاص، همان‌طور که در [۳۱] بیان شده، انواع وسایل نقلیه هوایی، مانند بالون، کشتی هوایی و وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین به پویایی شبکه نسل ششم شبکه ارتباطی و چند لایه شدن ساختار شبکه ارتباطی کمک خواهد کرد.

(ب) بکارگیری ارتباطات ماهواره‌ای: در یک شبکه سلولی سنتی، ارتباطات به‌طور معمول بین تجهیزات زمینی مانند تلفن‌های همراه، ایستگاه‌ها و ماشین‌ها رخ می‌دهد. در سال‌های آینده، با توسعه علم و فناوری، دستگاه‌های بیشتری نیاز به دسترسی به شبکه ارتباطی برای پشتیبانی از برنامه‌های کاربردی و دریافت سرویس‌های جدید دارند. شبکه ارتباطی بی سیم کنونی پوشش محدودی دارد. به‌طور کلی، ماهواره‌ها می‌توانند برای کمک به ایستگاه‌های پایه موجود در ایجاد

را به یک سیستم متصل کند. مطابق با شکل (۸)، IoE در نسل ششم برای جوامع هوشمند مانند خودروهای هوشمند، بهداشت هوشمند و صنایع هوشمند استفاده خواهد شد [۳۰].



شکل ۸: تجهیزات بکار رفته در اینترنت اشیا برای نسل ششم شبکه ارتباطی [۳۵]
 به طور کلی، فناوری‌های نسل ششم شبکه ارتباطی قادر به افزایش قابل توجه ظرفیت شبکه هستند. میزان این افزایش ظرفیت را می‌توان بر اساس رابطه ظرفیت با در نظر گرفتن تداخل و سایر محدودیت‌ها بیان نمود. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده، می‌توان با افزایش پهنای باند سیگنال، توان سیگنال، تعداد کانال در دامنه‌های فضا، زمان و فرکانس، تعداد عناصر پوشش دهنده در شبکه ارتباطی در نسل ششم یا پوشش و همچنین کاهش تداخل و نویز، ظرفیت مجموع را افزایش داد [۲۹].

۸- بازه فرکانسی تعیین شده برای نسل پنجم شبکه ارتباطی و بعد از آن

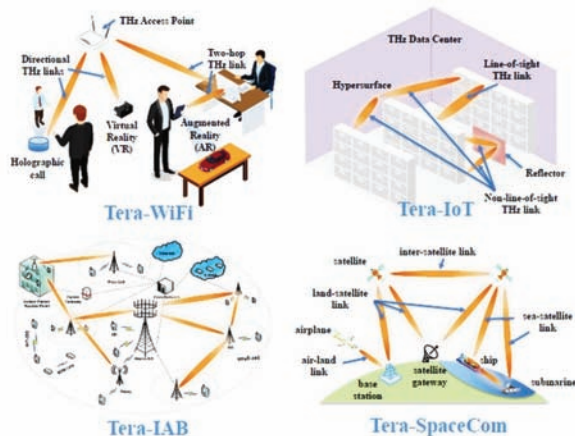
باید توجه داشت که فرکانس یک منبع بسیار با ارزش و محدود برای ارتباطات بی‌سیم است. از آنجا که باندهای فرکانسی پایین (زیر ۶ گیگاهرتز) به شدت شلوغ هستند در WRC-15، چند باند زیر ۱۰۰ گیگاهرتز به‌عنوان باندهای کاندید بالقوه برای نسل پنجم

شبکه ارتباطی، مانند باندهای ۶۶ تا ۷۶ گیگاهرتز با پهنای باند ۱۰ گیگاهرتز در نظر گرفته شدند. در WRC-19، ITU باندهای موج میلی‌متری بیشتری اضافه کرد، یعنی ۲۴/۲۵ تا ۲۷/۵ تا ۳۷ تا ۴۳/۵، ۴۵/۵ تا ۴۷/۲، ۴۸/۲ تا ۶۶ و ۷۱ تا ۷۶ گیگاهرتز. در این فرایند، چندین باند موج میلی‌متری برای 5G به دلیل وجود طیف‌های پهن و پیوسته برای پشتیبانی از هدف نسل پنجم شبکه ارتباطی با بیشینه نرخ داده‌های ۲۰ گیگابیت بر ثانیه تعیین شده است. امروزه، استفاده از باند فرکانسی زیر ۱۰۰ گیگاهرتز برای پشتیبانی از نرخ داده 1Tbps و بیشتر، یک چالش اساسی محسوب می‌شود. با این حال، در باندهای تره‌رتز (۰/۱ تا ۱۰ تره‌رتز)، منابع طیفی بیشتری می‌توانند برای ارتباطات بی‌سیم استفاده شوند. در جدول (۱)، می‌توان دید که به‌طور کلی پهنای باند ۱۳۷ گیگاهرتز موجود است. این امر نشان می‌دهد که باند فرکانسی تره‌رتز یک راهکار امیدوار کننده برای رسیدن به نرخ داده در مرتبه ترابیت بر ثانیه برای نسل ششم شبکه ارتباطی است [۳۵].

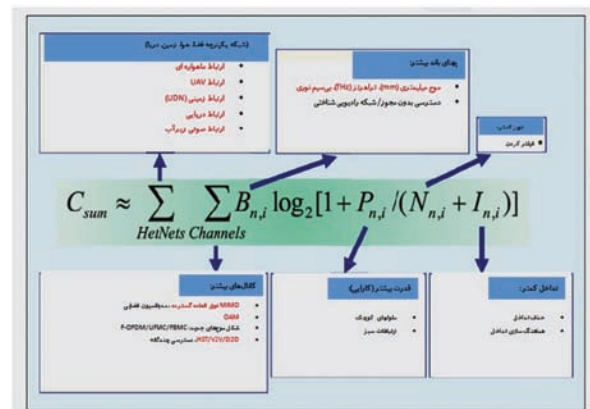
جدول ۱: باندهای فرکانسی تره‌رتز مشخص شده در WRC-19 [۳۴]

Frequency range (GHz)	Contiguous bandwidth (GHz)
275-296	21
306-313	7
318-333	15
356-450	94

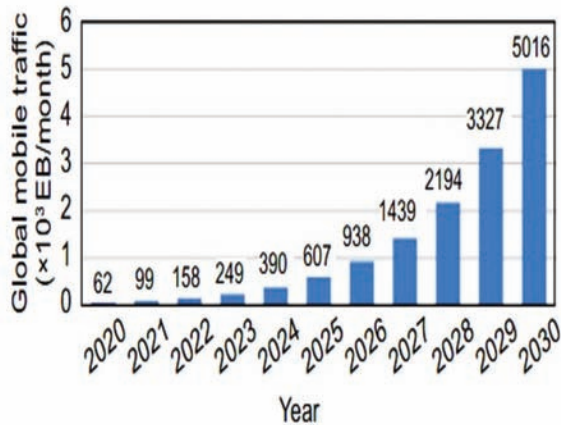
باند تره‌رتز می‌تواند مشکل کمبود منابع طیفی را در آینده حل کرده و ظرفیت سیستم‌های بی‌سیم کنونی را بسیار افزایش دهد [۳۵]. کاربردهای امیدوارکننده مختلفی مانند سیستم WLAN Tbps (Tera-WiFi)، (Tera-IoT)، (Tera-Internet-of-Things) در مرکز داده بی‌سیم، دسترسی یکپارچه Tbps در شبکه‌های بی‌سیم (Tera-IAB) و شبکه ارتباطات فضایی بی‌سیم پهن باند فوق وسیع (Tera-SpaceCom) پیش‌بینی شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، علاوه بر این کاربردهای بزرگ در مقیاس کوچک و بزرگ، باند تره‌رتز می‌تواند برای اتصالات بی‌سیم در شبکه‌های نانو ماشین به کار رود تا شبکه‌های بی‌سیم (WiNoC) و اینترنت اشیا نانو (IoNT) را فعال کند [۳۶].



شکل ۱۰: کاربری‌های احتمالی باند تره‌رتز در نسل ششم شبکه ارتباطی [۳۷]



شکل ۹: اثر گذاری فناوری‌های امکان‌پذیر نسل ششم شبکه ارتباطی در افزایش ظرفیت [۲۹]



شکل ۱۱: برآورد ترافیک جهانی موبایل در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ (شامل ترافیک ماشین به ماشین (M2M)) [۴۰]

پنجم شبکه ارتباطی، نرخ پیک داده از مرتبه مگابیت بر ثانیه (Mbps) به گیگابیت بر ثانیه (Gbps) افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود نرخ داده نسل ششم شبکه ارتباطی برای پاسخگویی به چالش افزایش مستمر ترافیک به ترابیت بر ثانیه (Tbps) برسد [۴۱]. در سپتامبر ۲۰۱۷، اتحادیه اروپا پروژه‌هایی را برای تحقیق در مورد استفاده از ارتباطات ترهترتز (THz)، ارتباطات نور مرئی و باند رادیویی D (رنج فرکانسی ۱۱۰ تا ۱۷۰ گیگاهرتز) را برای شبکه‌های ارتباطی فراتر از 5G (BG5) آغاز کرده است. در سال ۲۰۱۸ میلادی، پروژه «جامعه و اکوسیستم هوشمند بیسیم مبتنی بر نسل ششم شبکه ارتباطی» به عنوان یکی از دو پروژه پرچمدار در یک برنامه تحقیقاتی ملی با بودجه دولت فنلاند در دانشگاه اولو انتخاب شد همچنین در جولای ۲۰۱۸، گروه کاری ITU-T برای فناوری‌های شبکه ۲۰۳۰ (FGNET-2030) تشکیل شد که هدف آن بررسی توانایی شبکه‌ها برای سال ۲۰۳۰ میلادی و بعد از آن است. در دسامبر ۲۰۱۸، چندین شرکت ارتباطی در چین، از جمله شرکت ارتباطات موبایل چین (CMCC)، هواوی و اوپو پروژه‌هایی را با عنوان «چشم‌انداز و نیاز سیستم‌های B5G» آغاز کردند. در نوامبر ۲۰۱۹، وزارت علوم و فناوری چین اعلام کرد که یک گروه تحقیق و توسعه ملی برای نسل ششم شبکه ارتباطی ایجاد کرده است. در مارس ۲۰۱۹، کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC) آمریکا مجوزهای طیف آزمایشی را برای نسل ششم شبکه ارتباطی باز کرده است. در ژوئن ۲۰۱۹، اعلام شد که Korea Telecom (KT) و دانشگاه‌های ملی سؤال در توسعه و استانداردسازی فناوری‌های ارتباطات از راه دور نسل ششم شبکه ارتباطی همکاری خواهند کرد [۳۴].

۱۱- نتیجه گیری

در سال ۲۰۲۵ میلادی، نسل پنجم شبکه ارتباطی به طور گسترده در سراسر جهان گسترش خواهد یافت. با توجه به نقشه راه نسل‌های جدید شبکه‌های مخابراتی، هدف گذاری برای نسل ششم شبکه ارتباطی و تحقیقات در این زمینه از سال ۲۰۱۷ شروع شده و فناوری‌های و منابع فرکانسی جدید به ویژه ترهترتز برای استفاده در نسل ششم شبکه مخابراتی پیشنهاد شده‌اند.

مشابه نسل‌های قبلی، استقرار گسترده نسل پنجم شبکه ارتباطی بلافاصله رخ نخواهد داد بلکه توسعه آن تدریجی خواهد بود. بنابراین، نسخه‌های تکمیلی نسل پنجم شبکه ارتباطی ممکن است پس از سال ۲۰۲۵ میلادی با عنوان فراتر از نسل پنجم (B5G) شبکه ارتباطی نیز ارائه گردد. با در نظر گرفتن توسعه کنونی و در حال ظهور

۹- معرفی برخی از فناوری‌های مورد استفاده در نسل ششم شبکه ارتباطی در باند فرکانسی ترهترتز

الف) فرستنده و گیرنده ترهترتز: اگر چه مطالعه باند فرکانسی ترهترتز از دهه ۱۹۹۰ به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است، اما عدم وجود فرستنده‌های سیگنال توان بالا و آشکارسازهای حساسیت بالا که در دمای اتاق کار کنند، برای چندین دهه یک چالش بزرگ برای ارتباطات ترهترتز بوده است. بسیاری از پیشرفت‌های اخیر در مسیر فناوری مختلف به طور مشترک توانسته شکاف ایجاد شده در بکارگیری ترهترتز را پر کنند. به عنوان مثال، فناوری‌های الکترونیکی [۳۸] شامل فناوری سیلیکون CMOS، فناوری سیلیکون ژرمانیم BiCMOS، و ترانزیستور انتقال الکترونی در حجم بالا مبتنی بر نیمه‌هادی III-V (HEMT)، ترانزیستور دو قطبی حاوی چند نقطه اتصال (HBT) و فناوری دیود شاتکی بسیار پیشرفته هستند و می‌توانند بر اساس منابع موجود، به عنوان تقویت‌کننده‌ها و ترکیب‌کننده‌ها در فرکانس‌های مجاور نسبت به فرکانس اصلی عمل کنند. با این فناوری‌ها، سیگنال‌های ترهترتز اصولاً با استفاده از تبدیل فرکانس‌های پایین‌تر از طریق زنجیره‌های ضرب‌کننده‌های فرکانسی تولید می‌شوند.

ب) آرایه‌های آنتن ترهترتز: توان انتقال پایین فرستنده و گیرنده‌های ترهترتز، استفاده از آنتن‌های جهت‌دار را ممکن می‌سازد. چندین طرح متداول آنتن، از جمله آنتن‌های شیبوری مورب، آنتن‌های بازتابنده Cass grain و آنتن‌های لیزی از نظر تجاری در فرکانس‌های زیر یک ترهترتز در دسترس هستند. این ویژگی همچنین امکان طرح‌های نوآورانه بیشتری در آنتن‌های چند بازتابنده و آنتن‌های یکپارچه با لنز را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، مواد نانو جدید می‌توانند برای طراحی نوع جدیدی از آنتن‌ها مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، گرافین می‌تواند برای تولید نانوآنتن‌های پلاسمونی که از سیگنال‌های ترهترتز پرتو می‌گیرند، مورد استفاده قرار گیرد [۳۹].

ج) سطوح هوشمند قابل پیکربندی (RIS) ترهترتز: علاوه بر استفاده از آرایه‌های آنتن در ارسال و دریافت، RIS را می‌توان برای کنترل انتشار سیگنال‌های ترهترتز، سفارشی کردن جذب موج الکترومغناطیسی، انعکاس، پلاریزاسیون و تغییر فاز مورد استفاده قرار داد. در مقایسه با رفلکتورها یا رله‌های معمولی، RIS امکان سفارشی‌سازی پویا و دقیق انتشار الکترومغناطیسی را فراهم می‌کند که توسط مجموعه عظیمی از اتم‌های رسانا و عناصر سوئیچ بر روی یک لایه دی‌الکتریک تحقق می‌یابد. ایده RIS همچنین برای ارتباطات خانگی میکروویو پیشنهاد شده است [۳۷].

۱۰- معرفی برخی از پروژه‌های جهانی در خصوص نسل ششم شبکه ارتباطی

گزارش‌های ITU میزان ترافیک جهانی داده مطابق با شکل (۱۱) بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ میلادی تخمین زده است (ITU-R 2015). پیش‌بینی می‌شود که تعداد اشتراک‌های جهانی موبایل در سال ۲۰۲۵ به ۱۳/۸ میلیارد و در سال ۲۰۳۰ به ۱۷/۱ میلیارد اشتراک برسد [۴۰].

علاوه بر این، تخمین زده می‌شود که میزان ترافیک جهانی موبایل در هر ماه، از جمله ترافیک ماشین به ماشین به ۶۰۷ اگزابت (EB) در سال ۲۰۲۵ و ۵۰۱۶ اگزابت در سال ۲۰۳۰ برسد، در حالی که در سال ۲۰۲۰ فقط ۶۲ EB است. افزایش ترافیک در اثر توسعه این سرویس‌ها در آینده‌های نه چندان دور فراتر از ظرفیت نسل پنجم شبکه ارتباطی خواهد بود. از نسل چهارم شبکه ارتباطی به نسل

Self-Organizing Networks (SON)	شبکه خود سازمان ده
Sixth generation (6G)	نسل ششم
Spectral efficiency (SE)	راندمان طیفی
Unmanned aerial vehicle (UAV)	پهپاد
Ultra wide band (UWB)	فرا پهن باند

مراجع

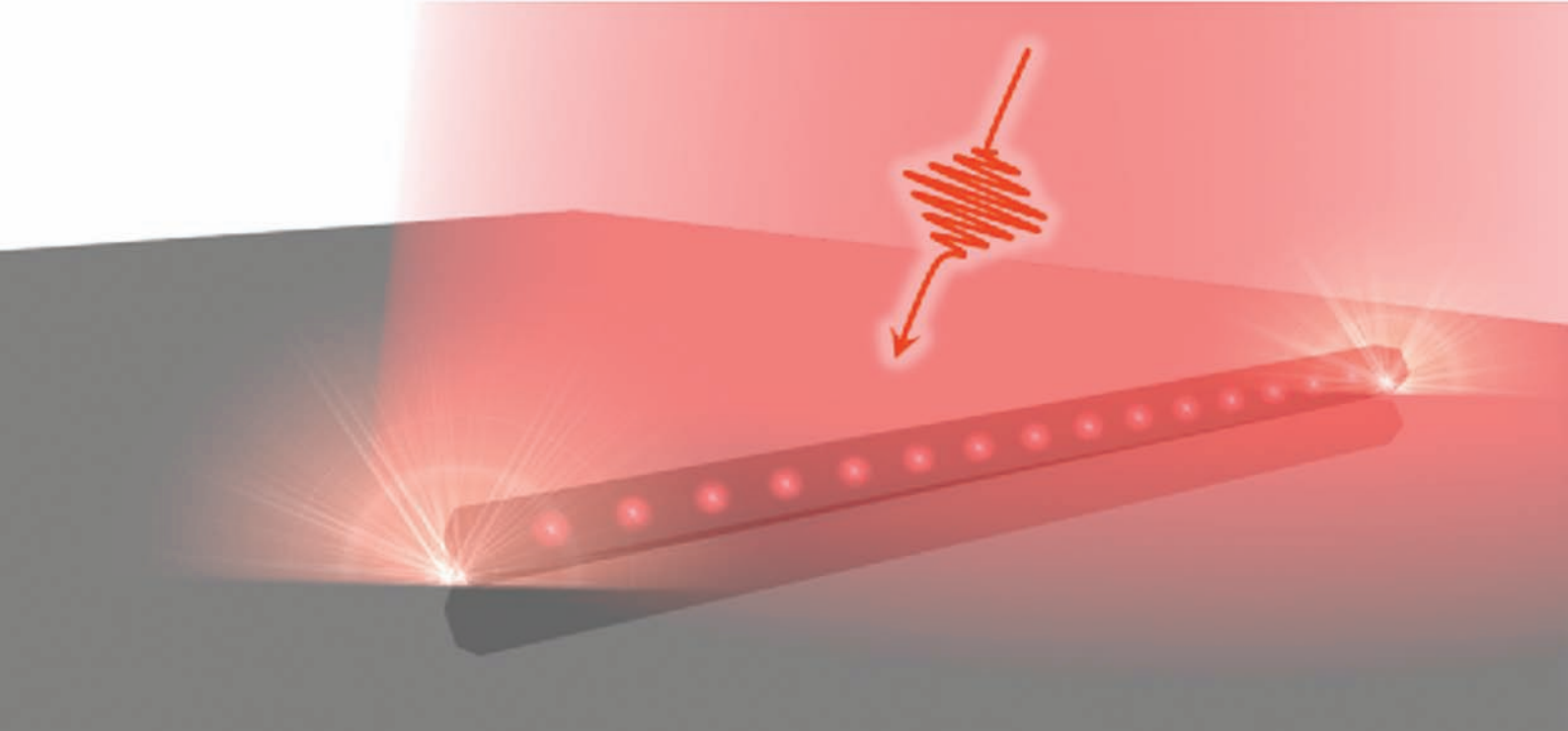
- [1] T.Huang, W.Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, D.Zhang, "A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies", DoI: 10.1109/ACCESS.2019.2957648, IEEE Access, pp.175758-175768, December 2019.
- [2] A. Gupta and E. R. K. Jha, "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies", IEEE Access, vol. 3, pp. 1206-1232, July 2015.
- [3] K. David and H. Berndt, "6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G?" IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 13, no. 3, pp. 72-80, September 2018.
- [4] P. Sharma, "Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network", International Journal Computer Science and Mobile Computing, vol. 2, no. 8, pp. 47-53, August 2013.
- [5] A. U. Gawas, "An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G," International Journal Recent Innovation Trends Computer Communication, vol. 3, no. 5, pp. 3130-3133, May 2015.
- [6] J. Parikh and A. Basu, "LTE advanced: The 4G mobile broadband technology", International Journal Computer Application, vol. 13, no. 5, pp. 17_21, January 2010.
- [7] M. Sha, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice", IEEE Journal Sel. Areas Communication, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, June 2017.
- [8] L.Zhang, Y.Liang, "6G Visions: Mobile Ultra-Broadband, Super Internet of Things, and Artificial Intelligence", china communications, vol.16.no.8, pp.1-14, August 2019.
- [9] رقیه جدا، لیلا مجذوبی، سوسن مودنی، محمد دین دوست، لیلا محمدی، "نسل پنجم شبکه‌های ارتباطی (5G) فرصت‌ها، چالش‌ها، الزامات پیاده‌سازی"، انتشارات موسسه آموزشی تالیف ارشدان، شابک: 9786222756338. صفحات ۲۳۸-۱. ۱۳۹۹.
- [۱۰] حسین افتخاری، وحید عابدی، فری رقیه جدا، پروین سجودی سر درو، لیلا محمدی، «بکارگیری روش تحلیل هم‌رخدادی واژگان برای تجزیه و تحلیل نسل پنجم شبکه‌های ارتباطی (5G)»، هشتمین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، عمران و باز آفرینی شهری، آذر ۱۳۹۷.
- [۱۱] رقیه جدا، لیلا محمدی، و همکاران، «برنامه جامع برای توسعه نسل پنجم شبکه ارتباطی ایران»، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات ۱۳۹۵-۱۳۹۶.
- [12] S. Junaid Nawaz, S.Krishna Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, et al., "Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future," IEEE Access, vol.7, pp. 46317-46350, April 2019.
- [۱۳] سارا توفیقی، مهدی هاشمی، کاربرد فناوریهای کوانتومی در نسل پنجم و ششم ارتباطات پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، بهمن ماه ۱۳۹۹.
- [14] S.Wehner, D.Elkouss and R.Hanson, "Quantum internet: A vision for the road ahead," Science 362.6412, pp.1-9, October 2018.
- [15] S.Ha'ma'la'inen, H.Sanneck, C.Sartori. LTE self-organizing networks (SON): network management automation for operational efficiency, John Wiley & Sons, Ltd, Print ISBN: 9781119970675, pp.1-422, 2012.
- [16] J.Ramiro and K.Hamied, "Self-organizing networks, self-planning, self-optimization and self-healing for GSM, UMTS and LTE" John Wiley & Sons, Ltd, Print ISBN: 9780470973523, pp.1-309, 2012.
- [17] M.Agiwal, A.Roy and N.Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.18, no.3, pp.1617-1655, February 2016.
- [18] S.Hong; J.Brand; J.Choi; M.Jain and et.al". Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond", IEEE communications magazine, vol.52, no.2, February 2014.
- [19] Z. Zhang, Y.Xiao, Z.Ma, M.Xiao, Z.Ding, X.Lei, G.K. Karagiannidis, and P.Fan, "6G Wireless networks Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies", vehicular technology magazine, DoI: 10.1109/MVT.2019.2921208, vol.14, no.3, pp.1-14, September 2019.
- [20] Cisco, Visual Networking Index, Nov. 2018, white paper at Cisco.

ارتباطات نسل پنجم شبکه ارتباطی، تصور میشود که نسل ششم شبکه ارتباطی شامل سه جنبه اصلی ارتباطات موبایل فرایه‌ن باند، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی (AI) باشد. در همین راستا، محققان و طراحان شبکه‌های نوین ارتباطی بدنبال یک ساختار چند لایه و چند بعدی برای نسل ششم شبکه ارتباطی هستند که بتوانند ضمن تأمین پوشش جهانی، الزامات مورد نیاز را برآورده نمایند. با توجه به آینده جایگاه ارتباطات ماهواره‌ای، توسعه ماهواره‌های با ظرفیت بالا و همچنین مگامنظومه‌های ماهواره‌ای مورد توجه جدی قرار گرفته است. چالش رفتن از ساختار تک ماهواره‌ای به ساختار شبکه ارتباطی نوین شامل چندین ماهواره در ارتفاعات مداری مختلف و ایجاد مکانیزم ارتباط و تبادل داده بدون ایجاد تداخل عملکردی بین آن‌ها از طریق لینک‌های افقی در میان ماهواره‌هایی که در ارتفاع یکسان هستند و در لینک‌های عمودی مابین ماهواره‌هایی که در ارتفاع مختلف حرکت می‌کنند و همچنین با پهپادها می‌بایست در نسل ششم شبکه ارتباطی مورد توجه قرار گیرد.

۱۲- واژگان کلمات اختصاری بکار رفته در مقاله

معادل فارسی	لغات انگلیسی
پروژه مشارکت نسل سوم	3rd Generation Partnership Project (3GPP)
هوش مصنوعی	Artificial intelligence (AI)
بکهال	Backhaul
فرا تر از نسل پنجم	Beyond 5G (B5G)
رایانش ابری	Cloud computing
شرکت ارتباطات موبایل چین	China Mobile Communications Corporation (CMCC)
ماهواره مکعبی	Cube satellite
بازده انرژی	Energy efficiency (EE)
کمیسیون ارتباطات فدرال	Federal Communications Commission (FCC)
اتحادیه بین‌المللی مخابرات	International telecommunication union (ITU)
اینترنت اشیا	Internet of things (IoT)
اینترنت همه چیز	Internet of every things (IoE)
اینترنت اشیا نانو	Internet of Nano-thing (IoNT)
شاخص کلیدی عملکردی	Key performance indicator (KPI)
موج میلیمتری	Millimeter wave (MM wave)
چند ورودی - چند خروجی	Multi- input Multi-output (MIMO)
دسترسی چندگانه غیر متعامد	Non orthogonal multiple access (NOMA)
تسهیم فرکانس متعامد	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)
سطح هوشمند قابل پیکربندی	Reconfigurable intelligent surface (RIS)
شبکه فضایی-زمینی	Space-terrestrial network (STN)
سرویس پیام کوتاه	Short message service (SMS)

- vol. 8, pp. 73992-74001, 2020.
- [24] B. Pang and L. Lee, "Seeing stars: Exploiting class relationships for sentiment categorization with respect to rating scales," arXiv preprint cs/0506075, 2005.
- [25] R. Socher et al., "Recursive deep models for semantic compositionality over a sentiment treebank," in Proceedings of the 2013 conference on empirical methods in natural language processing, 2013, pp. 1631-1642.
- [26] A. Maas, R. E. Daly, P. T. Pham, D. Huang, A. Y. Ng, and C. Potts, "Learning word vectors for sentiment analysis," in Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: Human language technologies, 2011, pp. 142-150.
- [27] B. Roshanfekr, S. Khadivi, and M. Rahmati, "Sentiment analysis using deep learning on Persian texts," in 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2017, pp. 1503-1508: IEEE.
- [28] J. Chung, C. Gulcehre, K. Cho, and Y. Bengio, "Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling," in NIPS 2014 Workshop on Deep Learning, December 2014, 2014, no. Conference contribution.
- [29] S. Yu, D. Liu, W. Zhu, Y. Zhang, and S. Zhao, "Attention-based LSTM, GRU and CNN for short text classification," Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol. 39, no. 1, pp. 333-340, 2020.
- [30] M. Zulqarnain, R. Ghazali, M. G. Ghouse, and M. F. Mush-taq, "Efficient processing of GRU based on word embedding for text classification," JOIV: International Journal on Informatics Visualization, vol. 3, no. 4, pp. 377-383, 2019.
- [31] M. Zulqarnain, R. Ghazali, Y. M. M. Hassim, and M. Rehan, "Text classification based on gated recurrent unit combines with support vector machine," International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708), vol. 10, 2020.
- [32] Q. Tang, J. Chen, H. Lu, Y. Du, and K. Yang, "Full Attention-Based Bi-GRU Neural Network for News Text Classification," in 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2019, pp. 1970-1974: IEEE.
- [33] Z. Yang, D. Yang, C. Dyer, X. He, A. Smola, and E. Hovy, "Hierarchical attention networks for document classification," in Proceedings of the 2016 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies, 2016, pp. 1480-1489.
- [34] K. S. Tai, R. Socher, and C. D. Manning, "Improved Semantic Representations From Tree-Structured Long Short-Term Memory Networks," Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing (Volume 1: Long Papers), no. Conference Proceedings, pp. 1556-1566, 2015.
- [35] Z. Geng, G. Chen, Y. Han, G. Lu, and F. Li, "Semantic relation extraction using sequential and tree-structured LSTM with attention," Information Sciences, vol. 509, pp. 183-192, 2020.
- [36] W. Yu, M. Yi, X. Huang, X. Yi, and Q. Yuan, "Make It Directly: Event Extraction Based on Tree-LSTM and Bi-GRU," IEEE Access, vol. 8, pp. 14344-14354, 2020.
- com.
- [21] M. R. Palattella, M. Dohler, A. Grieco, G. Rizzo, J. Torsner, T. Engel, and L. Ladid, "Internet of things in the 5G era: enablers, architecture, and business models," IEEE Journal Sel. Areas Communication, vol. 34, no. 3, pp. 510-527, March 2016.
- [22] L. Zhang, J. Liu, M. Xiao, G. Wu, Y.-C. Liang, and S. Li, "Performance analysis and optimization in downlink NOMA systems with cooperative full-duplex relaying," IEEE J. Select. Areas Communication, vol. 35, no. 10, pp. 2398-2412, October 2017.
- [23] L. Zhang, M. Xiao, G. Wu, M. Alam, Y.-C. Liang, and S. Li, "A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks," IEEE Wireless Communication, vol. 24, no. 5, pp. 44-51, October 2017.
- [24] L. Zhang, Y.-C. Liang, and M. Xiao, "Spectrum sharing for internet of things: A survey," IEEE Wireless Communication, Dol: 10.1109/MWC.2018.1800259, vol.26, no.3, pp.132-139, June 2019.
- [25] M. Latva-aho, K. Leppänen, "Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence (white paper), 6G Flagship, University of Oulu, Oulu Editor., ISBN: 978-952-62-2353-7, Sep 2019.
- [26] I. F. Akyildiz et al., "Combating the Distance Problem in the Millimeter Wave and Terahertz Frequency Bands," IEEE Commun. Mag., vol. 56, no. 6, pp. 102-108, June 2018.
- [27] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao and S. Li, "6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques", IEEE Network, Dol:10.1109/MNET.2019.1800418, pp.70-75, July 2019.
- [28] I. Akyildiz, A. Kak, A. Shuaib, "6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems", IEEE Access, Dol: 10.1109/ACCESS.2020.3010896, vol.8, pp. 133995-134030, July 2020.
- [29] C.-X. Wang and et al. "6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenges", Vehicular Technology Magazine, vol.15, no.4, pp.22-32, Dec.2020.
- [30] M. Chowdhury, Md. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. Min Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions", Open, vol.1, pp.955-975, July 2020.
- [31] S. Sekander et al., "Multi-Tier Drone Architecture for 5G/ B5G Cellular Networks: Challenges, Trends, and Prospects," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 3, pp. 96-103, Mar. 2018.
- [32] P. Hajipour, A. Shahzadi, S. Ghazi-Maghrebi, "Interference mitigation for a heterogeneous satellite network based on spatial angle and transmission power", International Journal of Electronics and Communications, pp.131-138, January 2019.
- [33] 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.
- [34] H. Yao et al., "The Space-Terrestrial Integrated Network: An Overview," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 9, pp. 178-85, September 2018.
- [35] J. Zhang, P. Tang, L. Yu, T. Jiang, L. Tian, "Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook", Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, vol.21, no.1, pp.39-61, March 2020.
- [36] V. Petrov, J. Kokkonen, D. Moltchanov, J. Lehtomaki, Y. Koucheryavy, M. Juntti, "Last meter indoor terahertz wireless access: Performance insights and implementation roadmap," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 6, pp. 158-165, June 2018.
- [37] Z. Chen, X. Ma, B. Zhang, Y. Zhang, Z. Niu, N. Kuang, W. Chen, L. Li, and S. Li, "A Survey on Terahertz Communications," China Communications, vol. 16, no. 2, pp. 1-35, February 2019.
- [38] C. Han, Y. Wu, Z. Chen and X. Wang, "Terahertz Communications (TeraCom): Challenges and Impact on 6G Wireless Systems", arXiv: 1912.06040v2 [eess.SP] 13, December 2019.
- [39] T. W. Crowe, W. R. Deal, M. Schroter, C.-K. C. Tzuang, and K. Wu, "Terahertz RF Electronics and System Integration," Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 6, pp. 985-989, June 2017.
- [40] J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, "Graphene-based plasmonic nano antenna for terahertz band communication in nano networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no. 12, pp. 685-694, December 2013, US Patent: 9,643,841 B2. [Online]. Available: <http://www.acsu.buffalo.edu/~jmjornet/patents/2017/p1.pdf>.
- [41] ITU-R, 2015. IMT Traffic Estimates for the Years 2020 to 2030. Report M.2370, ITU-R, Geneva, Switzerland.
- [42] CMRI, 2019. The Outlook and Demand Report for 2030+. China Mobile Research Institute, Beijing (in Chinese). <https://cmri.chinamobile.com/news/5985.html> [Accessed on Jan.4.2020].



مقاله علمی-ترویجی

لیزر پلاسمونیک با استفاده از ساختار فلز-عایق-فلز

حمید دهقانی، گروه برق، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران، hamid01386@gmail.com

علیرضا کریمی*، گروه برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، ar.karimi@iaushiraz.ac.ir

*نویسنده مسوول

چکیده

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، بر روی مجتمع سازی قطعات پلاسمونیک برای کاربردهای مخابرات نوری و تبادل داده متمرکز شده‌اند. ایجاد چنین زمینه ای، حاصل بررسی قطعات پلاسمونیک جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. برخی از این قطعات؛ موجرها، تزویج کننده‌ها، مدولاتورهای نوری، به همراه منابع نوری (لیزرهای پلاسمونیک) و آشکار سازهای نوری هستند. این عناصر مداری در مدارهای مجتمع نوری دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشند. بنابراین با توجه به ویژگی اصلی علم پلاسمونیک که گذشتن از حد شکست نور در فشرده سازی عناصر و چیدمان آنها است، طراحی، شبیه سازی و ساخت عناصر پلاسمونیک برای محققان حوزه نور جذابیت‌های ویژه‌ای پیدا کرده است. در این مقاله ابتدا لیزر پلاسمونیک با ساختار $\text{AlGaAs/GaAs/AlGaAs}$ مورد بررسی قرار گرفته که خود لایه GaAs به صورت چاه کوانتومی محیط بهره را ایجاد نموده است که با بهره گیری از ساختار متامتریال لیزر پلاسمونیک را تحلیل کرده ایم.

کلمات کلیدی: پلاسمونیک، پلاسمون سطحی، فلز-عایق-فلز، لیزر

Plasmonic Laser by Using Metal-Insulator-Metal Structure

Hamid Dehghani, Department of Electrical Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran, hamid01386@gmail.com

Alireza Karimi*, Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, ar.karimi@iaushiraz.ac.ir

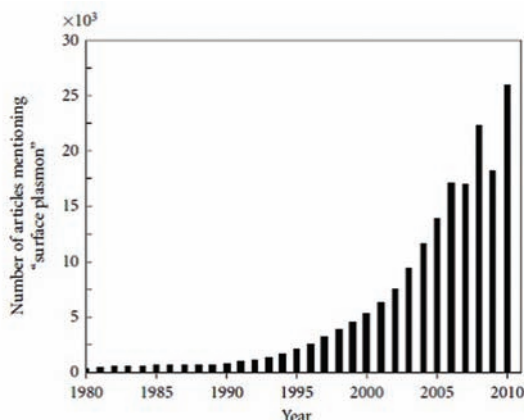
*Corresponding author

Abstract

Today, studies in plasmonic is mainly focused on integrating the Plasmonic Parts for optical communication and data transfer. Making such field resulted in studying new Plasmonic parts that developed in recent years. Some these parts are waveguides, couplers, optical modulators, optical detectors and optical sources. These circuit elements have an important position in the optical integrated circuits. Therefore, based on the main figure of Plasmonic devices which is the is able to go beyond the diffraction limits, design, simulation and construction of such elements have a special attractiveness for the researchers. In this research first, a Plasmonic laser has studied by using $\text{AlGaAs/GaAs/AlGaAs}$ structure is the GaAs layer that itself interest environment quantum well that analyzed by using the metamaterial Plasmonic layer.

Keywords: Plasmonic, surface Plasmon, metal-insulator-metal, Laser

حفظ می‌کند. از جمله حوزه‌هایی که نیاز به بررسی و عملی‌سازی ساختارهای پلاسمونیک دارد ساخت لیزرهای پلاسمونیک به منظور استفاده در مدارات مجتمع نوری است به طوری که زمینه ظهور پردازنده‌های تمام نوری مجتمع را فراهم آورد [۶].



شکل ۱: روند افزایش تعداد مقالات منتشر شده در زمینه پلاسمونیک سطحی

نخستین مشاهدات پلاسمون‌های سطحی در آزمایش وود در سال ۱۹۰۲ بود که برای بررسی برخورد نور به پراشه انجام شد. در طیف بازتاب این آزمایش‌ها، باندهای باریکی مشاهده شد که آنها را ناهنجاری نامید. در سال ۱۹۰۷ با استفاده از اصل پراکندگی امواج الکترومغناطیسی برای این پدیده توجیحی پیدا شد، اما طبق این توجیحات، ناهنجاری‌های وود باید تنها در یک قطبش خاص (S) رخ می‌داد ولی نتایج آزمایش‌های بعدی نشان داد که این اثرات در قطبش مخالف (P) هم دیده می‌شود.

در سال ۱۹۴۱، فانو این اثرات را با تحریک موج‌های سطحی الکترومغناطیسی روی سطح فلزات توجیح کرد. که در سال ۱۹۵۷ پیش‌بینی در زمینه وجود نوسان‌های جمعی الکترون‌های سطح فلزات انجام شد که نقطه عطف نظریات پلاسمون‌های سطحی بود. در سال ۱۹۵۹ در پاره‌ای از آزمایشات وجود چنین تحریک‌هایی مشاهده شد. در سال ۱۹۶۰ واحد کوانتومی این نوسان‌های الکترونی به پلاسمون‌های سطحی معروف شد. در اثر تلاش‌های انجام شده تحریک پلاسمون‌های سطحی عملی شد و در عمل پلاسمون‌های سطحی وارد دنیا ساختارهای نوری پر سرعت شدند. در اواخر دهه ۱۹۶۰، علاوه بر فیزیکدانان، محققان رشته‌های دیگر به این پدیده علاقه‌مند شدند و آن را وارد علوم دیگری چون حسگرهای زیستی مولکولی کردند. با دستیابی به فناوری تولید در ابعاد نانو جهش دیگری در اواسط دهه ۱۹۹۰ در این زمینه رخ داد. با توانایی برش در ابعاد نانو و کنترل این پدیده توسط شکل ظاهری ساختارها توجه گروه‌های زیادی به سمت این علم جلب شد. آخرین مورد مشاهدات مربوط به پلاسمون‌ها که نقطه عطفی در این زمینه را پدید آورد، مشاهده عبور قابل توجه نور از ورقه بسیار نازک طلا که حفره‌هایی با قطر ۱۵۰ نانومتر بود [۷].

در طی سال‌های متعددی از آغاز پیدایش نخستین لیزر تا به امروز همواره روندی برای کاهش بیشتر ابعاد لیزرها وجود داشته است. اختراع لیزرهای نیمه هادی به‌طور اساسی روند و چهارچوب کوچک شدن ابعاد را متحول کردند و توسعه فناوری‌های جدید مانند: مخابرات فیبر نوری، اسکن تصاویر، دیسک‌های فشرده، اسکنرهای بارکد، پرینترهای لیزری و سیستم‌های اندازه‌گیری دقیق را میسر نموده است.

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، بر روی مجتمع‌سازی قطعات پلاسمونیک برای کاربردهای مخابرات نوری و تبادل داده متمرکز شده‌اند. ایجاد چنین زمینه‌ای، حاصل بررسی قطعات پلاسمونیک جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. برخی از این قطعات موجبرها، تزویج‌کننده‌ها، مدولاتورهای نوری، به همراه منابع نوری و آشکارسازهای نوری است. این عناصر مداری در مدارهای مجتمع نوری دارای جایگاه ویژه‌ای هستند. بنابراین با توجه به ویژگی اصلی علم پلاسمونیک که گذشتن از حد پراش نور در فشرده‌سازی عناصر و چیدمان آنها است، طراحی، شبیه‌سازی و ساخت عناصر پلاسمونیک برای محققان حوزه نور جذابیت‌های ویژه‌ای پیدا کرده است.

عامل محدود کننده‌ای که در این حوزه وجود دارد جذب نوری بالایی است که در فلزات مشاهده می‌شود. غلبه بر این فاکتور تلفاتی عامل محرکه بسیاری از تحقیقات این حوزه بوده است. برای غلبه بر این تلفات تحقیقات فراوانی صورت گرفته است که نتیجه آن افزایش درک رفتار فلزات و همچنین تولید موادی است که همانند فلزات رفتار پلاسمونیک از خود نشان می‌دهند اما میزان تلفات در آنها کمتر است. همچنین در طی این تحقیقات ساختارهایی نیز معرفی شده‌اند که با استفاده از آنها می‌توان بر تلفات پلاسمونیک غلبه کرد که نتیجه آن ساخت ادواتی کارآمدتر است.

پلاسمونیک و کاربردهای رنج گسترده‌ای را در بر می‌گیرد که شامل مدارات مجتمع نوری و ادوات مرتبط با پردازش تمام نوری، تحقیقات پزشکی مرتبط با تشخیص و درمان بیماری‌ها، ساخت ادوات بسیار دقیق جهت انجام تحقیقات اتمی و مولکولی و مسایل بسیاری از این دست می‌باشد. در سال‌های اخیر انتشار پلاسمون‌ها و پلاسمون پلاریتون‌ها در صفحات فلزی ساختار نانو توجه بسیاری را به خود جلب کرده است، به‌خصوص به دلیل خواص پاشندگی و پراش غیرعادی در آنها قابل پیش‌بینی است که پلاسمون‌ها در زمینه نانو تکنولوژی بر مابقی ساختارهای مشابه چیره شوند، در جایی که مخابرات نوری احتیاج به ابعاد پایین‌تر از طول موج دارد. این قضیه ثابت شده است که ساختارهای فلزی نانو در تصویربرداری ابعاد پایین و در پشت محدودیت‌های پراش کلاسیک بسیار خوب عمل می‌کند. حتی نشان داده شده است که در محدوده فرکانس‌های تراهرتز می‌توان امواج پلاسمونی سطحی را به‌صورت محلی متمرکز کرد این عمل با ایجاد کردن شیارهایی در روی سطح فلزی ایجاد خواهد شد [۵-۱۱].

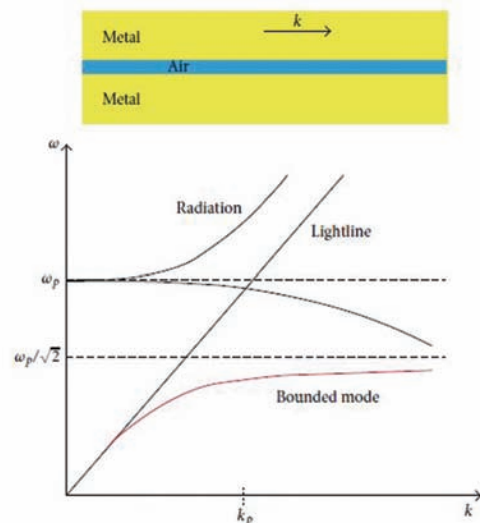
۱-۲- تاریخچه پلاسمونیک و لیزرهای پلاسمونیک

پلاسمون واحد کوانتومی موج‌های الکترومغناطیسی سطحی است که در مرز فلز و دی‌الکتریک ظاهر می‌شود و در راستای عمود بر فصل مشترک میرا است. این موج‌های الکترومغناطیسی سطحی در اثر انتقال میدان‌های الکترومغناطیسی به نوسان‌های پلاسمای الکترونی فلزات است. برخورد امواج به نحوه خاص به فلز منجر به تحریک پلاسمون‌ها می‌شود و در نتیجه نوری که از سطح فلز بازتاب می‌کند در فرکانس‌های خاص، کاهش قابل ملاحظه‌ای را خواهد داشت. پلاسمون‌ها می‌توانند با فوتون‌ها کوپل شده و ذرات مشابه به نام پلاسمون‌های پلاریتون را ایجاد کنند.

در شکل (۱) روند افزایش تعداد مقالات منتشر شده در حوزه تحقیقات پلاسمونیک و مربوط به پلاسمون‌های سطحی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تعداد مقالات با رشدی صعودی در حال افزایش بوده و روندی که در مسیر نیاز به این دسته از ساختارهای کوچک مقیاس وجود دارد انگیزه لازم را برای تحقیقات در این حوزه را

در سال‌های اخیر تحقیقات در این حوزه سبب ساخت ادوات جدیدی از جمله لیزر دارای انتشار سطحی با کاواک عمودی، لیزرهای میکرودیسک و لیزرهای فوتونیک کریستال شده که برخی از آنها به صورت تجاری در دسترس هستند. هر چند کوچک‌سازی ابعاد امکان کاربرد در حوزه‌های متنوع کاربردی را ایجاد نموده اما هدف‌گذاری بعدی در این بخش این است که انقلابی در حوزه الکترونیک نوری ایجاد شود. در دهه گذشته سمت و سوی تحقیقات دانشگاهی به سمت توسعه لیزرهای نانو مقیاس قرار داشت با این هدف که بتوان از آنها در کاربردهایی مانند چیپ‌های الکترونیک نوری و سنسورهای فوق حساس استفاده شود. یکی از شاخه‌های اساسی در این زمینه نانو سیم‌های نیمه‌هادی است. یک نیمه‌هادی شبه یک بعدی که هم‌زمان نقش محیط بهره و کاواک را بازی می‌کند و در برخی موارد قابلیت ذاتی برای عملکرد لیزری را دارا می‌باشد. این قابلیت در کنار توانایی تنظیم طول موج خروجی و همچنین امکان مجتمع‌سازی الکترونیک، لیزرهای نانو سیم را به‌عنوان کاندید برای استفاده در نسل آتی سیستم‌های الکترونیک نوری مطرح کرده است. ایده‌های نوین از جمله استفاده از فرامواد در حوزه ی پلاسمونیک و یا طراحی و تولید نانو آنتن‌های نوری و لیزرهای بسیار باریک توجه بسیاری از پژوهشگران را به این زمینه جلب نموده است که می‌تواند دلیل گسترش در حوزه ی کاربردهای احتمالی در ساختارهای پر سرعت آینده باشد.

از موجبرهای پلاسمونیک می‌توان در مدارهای الکترونیک و نوری به‌گونه‌ای استفاده کرد که با انتشار هم زمان امواج الکترونیک و نوری، اختلالی در انتقال داده هر یک از امواج وارد نشود. این خود باعث می‌شود که ظرفیت ارسال اطلاعات در مدارهای مجتمع بالا رود. از طرفی با پایین آوردن حد پراش، مدارهای مجتمع ساخته شده در حوزه پلاسمونیک خیلی فشرده‌تر از مدارهای مجتمع نوری خواهد بود و سرعت انتقال و سوچ در این مدارها افزایش می‌یابد. یکی از ساختارهای ساده و در عین حال مهم برای موجبرهای پلاسمونیک ساختار فلز-عایق-فلز است که شکل شماتیک و منحنی پاشندگی آن در شکل (۲) رسم شده است. این ساختار همان‌طور که از نام آن مشخص است از دو لایه فلز و یک لایه دی الکتریک هوا یا غیر آن تشکیل شده است. دی الکتریک مربوطه به‌طور معمول دارای تلفات اپتیکی کم و ضریب شکست اندکی می‌باشد که توسط لایه‌های



شکل ۲: شماتیک و منحنی‌های پاشندگی در ساختار فلز-عایق-فلز

فلزی در بر گرفته شده است. در سال‌های اخیر مطالعات تئوری دقیق و همچنین مطالعات عملی مربوط به این دسته از موجبرها انجام شده است. مطالعات متعدد نشان می‌دهد که در این نوع موجبر تضادی بین تلفات اپتیکی قابل قبول و اندازه موده‌های کمتر از طول موج وجود دارد [۸].

۲- لیزرهای پلاسمونیک

لیزر به‌عنوان منبع تولید نور تک‌فام یکی از تاثیرگذارترین اختراعات قرن بیستم است که بدون آن بسیاری از پیشرفت‌ها در حوزه‌های صنعتی و مخابراتی امکان پذیر نبود. مطالعه حوزه رو به رشد نانو فوتونیک نیازمند لیزرهایی است که بتوانند فراتر از حد پراکندگی نور، تابش لیزری تولید کنند طوری که شاهد بهره‌برداری از قابلیت‌های حوزه نانو و ساخت ادواتی با قابلیت‌های منحصر بفرد باشیم. لیزرهای پلاسمونیک کلید حل این مشکل هستند که مکانیسم عملکرد آنها بر پایه استفاده از پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی است که امکان انتقال انرژی در ابعادی فراتر از حد پراکندگی را فراهم می‌کنند. لیزرهای پلاسمونیک در رنج تراهرتز کار کرده و برای مدارات مجتمع نوری می‌توانند نقش مهمی را بازی کنند به این صورت که نور تولیدی از این لیزرها به‌عنوان منبع سیگنال حامل برای مدولاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. داشتن ابعاد بسیار کوچک یکی از نکاتی است که محققان حوزه الکترونیک نوری را نسبت به تحقق ایده مدارات تمام نوری امیدوار نموده است. البته تا دستیابی به این هدف موانعی وجود دارد که باید برداشته شود. به‌عنوان نمونه یکی از مسایلی که کاربرد لیزرهای پلاسمونیک را با مشکل مواجه می‌کند این است که اغلب این ساختارها با تحریک نوری کار می‌کنند و برای قرار گرفتن در یک مدار مجتمع نوع تحریک باید به صورت الکترونیک باشد تا امکان پیاده‌سازی عملی آن وجود داشته باشد اما اضافه نمودن کنتاکت برای تحریک الکترونیک مشکلات عمده‌ای را ایجاد می‌کند که مهم‌ترین آنها تحت تاثیر قرار گرفتن لیزر و مکانیسم انتشار آن در اثر اضافه شدن کنتاکت می‌باشد [۹].

یکی از ساختارهای مورد استفاده در انتشار امواج پلاسمونیک ساختار فلز-عایق-فلز است که دسته‌بندی‌های دیگری مانند ساختار فلز-عایق-نیمه هادی-عایق-فلز نیز جزو همین دسته از موجبرها به حساب می‌آیند. این نوع موجبرهای پلاسمونیک امکان محصورسازی نور را در یک بعد فراهم می‌کنند نمونه شماتیک و عملی چنین ساختاری در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل ساختار بخش موجبر به صورت $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ است. ساختارهای چاه کوانتومی نیز که از لایه‌های متناوب دو نیمه هادی تشکیل شده‌اند را میتوان در این طبقه‌بندی قرار داد. البته ساختارهای چاه کوانتومی که از لایه‌های متناوب نیمه هادی با گاف انرژی متفاوت تشکیل شده نقش محیط بهره را برای لیزر نیز بر عهده دارند [۱۰].

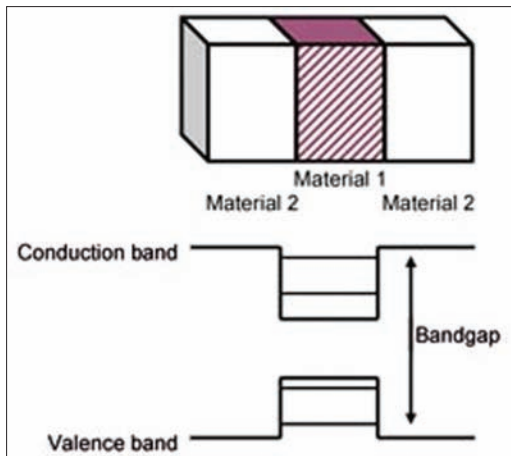
۲-۱- متامتریال

فراماده یا متامتریال به ماده مرکبی گفته می‌شود که دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیس در ساختار وجودی خود است. آنچه این مواد را غیر معمول کرده است، خاصیت ضریب شکست منفی نور در آنها است، به این معنا که این مواد نور را در جهت مخالف مواد عادی منکسر می‌کنند. مواد الکترومغناطیس تشکیل دهنده آنها می‌تواند با دستکاری مختصر و دقیق ساختارشان تنظیم شود. خواص نامتعارف این مواد سبب شده است از آنها در زمینه‌های مختلف استفاده شود از جمله آنها در کاربرد در موجبرها، جبران پاشندگی و اثرات غیرخطی است. این مواد در طبیعت وجود نداشته و در واقع با تکرار متناوب

نامیده می‌شود [۱۱].

۲-۲- ساختارهای چاه کوانتومی

یکی از الزامات اساسی برای داشتن عملکرد لیزری داشتن محیط بهره است که مسیر فیدبک مثبت را نیز فراهم می‌کند و برای غلبه بر تلفات ساختار اساسی است. از جمله ساختارهایی که برای محیط بهره در لیزرهای پلاسماونیک مطرح شده ساختار چاه کوانتومی است. چاه کوانتومی در واقع یک چاه پتانسیل با سطوح انرژی منفصل است. در واقع این ساختارها امکان محصورسازی ذرات در این ساختارها وجود دارد زیرا تنها الکترون‌ها در ترازهای خاصی امکان حضور دارند و پیوستگی ترازهای انرژی وجود ندارد. در شکل (۶) نمونه‌ای از اتصال دو ماده نیمه هادی و تشکیل چاه کوانتومی را مشاهده می‌کنید [۱۲].



شکل ۶: تصویر شماتیک از ساختار و باند انرژی چاه کوانتومی

به‌عنوان یکی از ساختارهای متداول برای محیط بهره به صورت چاه کوانتوم می‌توان از ترکیب $\text{AlGaAs/GaAs/AlGaAs}$ نام برد که شماتیک آن را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید. گاف انرژی مربوط به GaAs در حدود 1.42 eV و گاف مربوط به $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ به‌طور تقریبی 1.8 eV می‌باشد. این اختلاف گاف‌های انرژی که در واقع اختلاف بین ترازهای انرژی نوار هدایت و ظرفیت است مطابق شکل (۶) چاه پتانسیلی را ایجاد می‌کند که از آن به چاه کوانتوم یاد می‌کنیم.

۳- ساختار لیزر پلاسماونیک

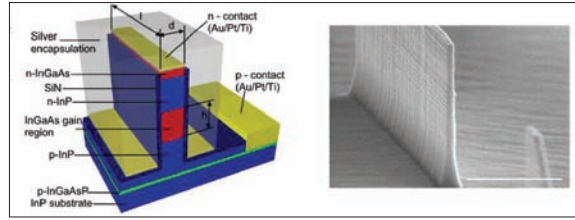
لیزر مورد بررسی دارای ساختاری به صورت شکل (۸) است [۱۳]. ضخامت لایه‌های مختلف به صورت جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱: ضخامت لایه‌های مختلف در ساختار لیزر چاه کوانتومی چند گانه

Au	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	GaAs QW	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	SiO_2
100nm	20nm	متغیر	20nm	100nm

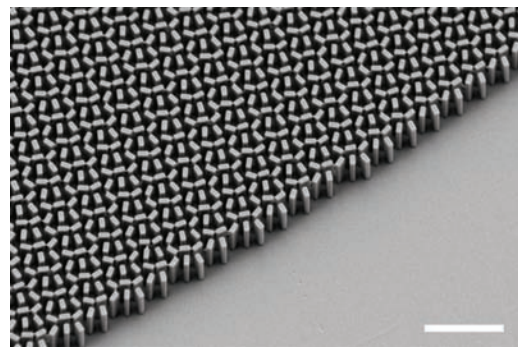
عرض ساختار متغیر بوده از 100 تا 700 نانومتر متغیر است. بخش چاه کوانتومی از لایه‌های متناوب $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ و GaAs به ترتیب با ضخامت‌های 10 و 7 نانومتر تشکیل شده است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده می‌کنیم. با در نظر گرفتن ضریب شکست به‌صورت معادله (۱) که شامل دو بخش حقیقی و موهومی است و هر بخش تابع فرکانس است هر بخش مدل شده و در نهایت می‌توان رفتار ساختار را بررسی نمود.

$$\bar{n} = n + ki \quad (1)$$



شکل ۳: تصویر شماتیک و تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک لیزر پلاسماونیک با ساختار فلز-عایق فلز

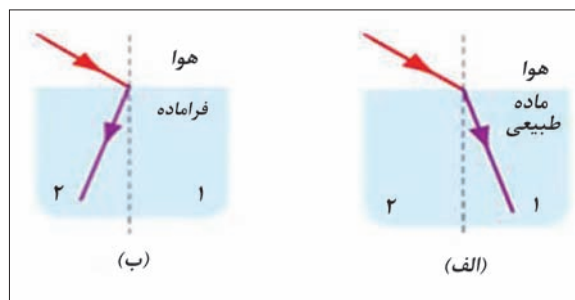
مواد ساخته می‌شوند. در واقع هنگامی که یک ماده با تناوبی در حد چند نانومتر تکرار می‌شود مانند این است که سلول‌های یک ماده مصنوعی را تشکیل می‌دهد که خواص جالبی را در مواجهه با امواج الکترومغناطیس از خود نشان می‌دهد. در شکل (۴) تصویر میکروسکوپی از یک ماتریال از جنس دی‌اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد که به‌عنوان لیزر فوق نازک مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴: تصویر میکروسکوپی از یک ماتریال از جنس دی‌اکسید تیتانیوم

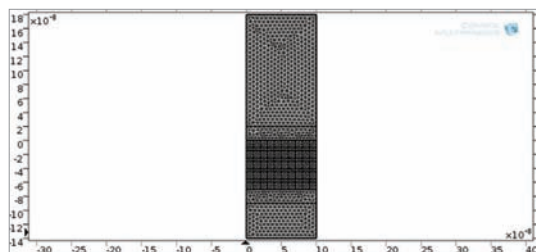
در شکل (۵) نحوه رفتار پرتو نوری پس از عبور از یک ماده طبیعی و عملکرد آن پس از عبور از یک ماتریال نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پرتو نور در ماتریال بر خلاف آنچه در مواد طبیعی مشاهده می‌کنیم به سمت داخل منحرف شده است در تمام موادی که در طبیعت یافت می‌شوند پرتوی وارد شده به محیط دوم از سطح مشترک، به‌گونه‌ای منحرف می‌شود که در نیم صفحه دوم قرار گیرد، که در شکل (۵-الف) نیز مشاهده می‌شود که این مورد توسط رابطه اسنل به سادگی قابل توجیه است و دلیل آن مثبت بودن ضرایب شکست محیط‌ها می‌باشد.

هنگامی که نور از مرز یک ماده با ضریب شکست مثبت به ماتریال برخورد می‌نماید موج شکسته شده، در همان نیم صفحه و نسبت به خط عمود بر مرز دو محیط باقی می‌ماند، این حالت شکست منفی



شکل ۵: شکست نور در مرز دو محیط: (الف) دو ماده با ضرایب شکست مثبت - (ب) شکست منفی در مرز فراماده با هوا.

نانومتر آن را چاه کوانتومی چندگانه و ۱۰ نانومتر را هوا تشکیل می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابعاد بسیار کوچک‌تر از طول موج بوده و در عین حال بزرگ‌تر از ابعاد اتمی است یعنی همان تناوبی که بین تناوب اتمی و تناوب فتونیک کریستالی قرار می‌گیرد و همان‌طور که گفتیم در اصطلاح تمامتریال را شکل می‌دهد. در شکل (۱۰) ساختار مش‌بندی شده با کامسول نشان داده شده است.



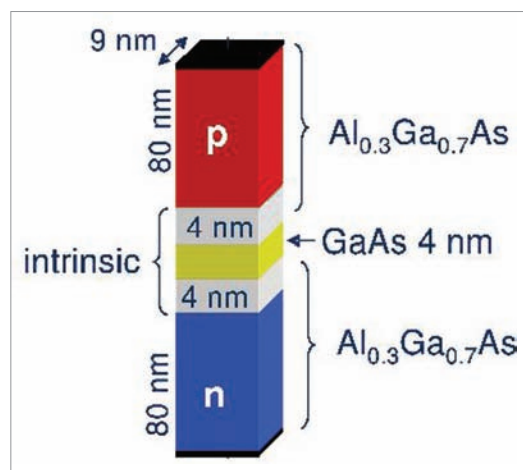
شکل ۱۰: ساختار مش‌بندی شده لیزر

در اینجا برای مقایسه توان انتشار یافته میزان انرژی منتشر شده از ساختار تمامتریال چاه کوانتومی شکل (۹) را با ساختار چاه کوانتومی پایه شکل (۸) مقایسه می‌کنیم. هر دو شکل به ازای عرض کل ۲۵۰ نانومتر رسم شده‌اند مشاهده می‌شود که در ساختار تمامتریالی طول موج تشدید به سمت طول موج‌های بالاتر منتقل شده است (۸۹۷ نانومتر در برابر ۸۱۲ نانومتر) ضمن اینکه انرژی در طول موج تشدید تقریباً شش برابر انرژی منتشر شده در حالت چاه کوانتومی بدون تمامتریال است (۱۴۲ میکروژول در برابر ۲۴ میکروژول) [۱۴].

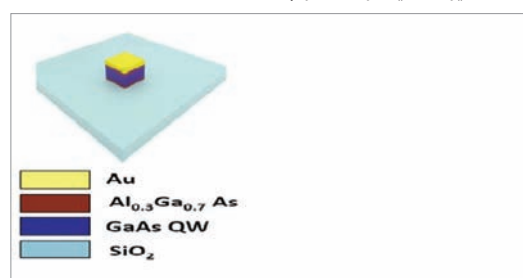
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله لیزر پلاسمونیک مبتنی بر چاه کوانتومی تمامتریال مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. ساختارهای پلاسمونیک با توجه به ابعاد بسیار ریز و توانایی محصورسازی نور در ابعاد کوچک‌تر از طول موج کاربردهای بالفعل و بالقوه متعددی را در حوزه‌های مختلف ایجاد نموده است. بررسی تئوری ساختارهای پلاسمونیک و شبیه‌سازی آنها در کنار آزمایش‌های عملی آنها اهمیت زیادی دارد زیرا می‌تواند راهکارهای نوینی را برای غلبه بر چالش‌های روی این شاخه از دانش در اختیار پژوهشگر قرار دهد. نرم‌افزار کامسول که یک نرم‌افزار مالتی‌فیزیک است جزو ابزارهای تحلیلی قدرتمندی است که در حوزه گسترده‌ای از مسایل از جمله ساختارهای پلاسمونیک و تمامتریال‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله ابتدا با توجه به نتایج یکی از مقالات در زمینه لیزرهای پلاسمونیک، که برای کاربرد در حوزه اپتیک و مدارات مجتمع نوری تمرکز نموده است که پس از اطمینان از درستی روند تحلیل و مدلسازی و بدست آوردن دید بهتر از روند عملکرد مطرح شده با ساختارهای تمامتریال پرداخته و با نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی نمودیم.

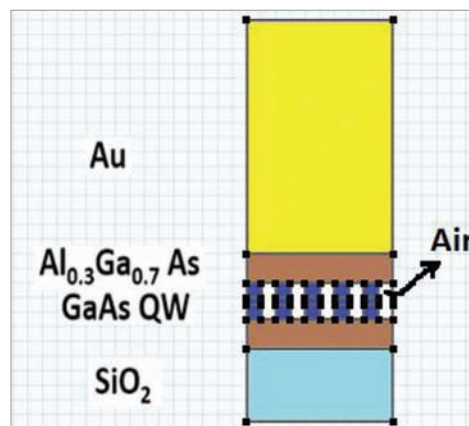
مدل‌سازی لایه‌های موجود بر پایه اطلاعاتی که از مراجع مختلف به‌دست آمده انجام شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که انرژی طیف تشعشعی لیزر پلاسمونیک در این حالت چندین برابر حالتی است که ساختار تمامتریالی وجود ندارد. با افزایش عرض کاواک طول موج رزونانسی منتشر شده از ساختار افزایش می‌یابد اما انرژی مربوط به طول موج رزونانس به‌طور تقریبی ثابت می‌ماند. همچنین با کاهش تعداد چاه‌هایی کوانتومی طول موج منتشر شده به‌طور تقریبی ثابت می‌ماند اما انرژی آن کاهش پیدا می‌کند. با ثابت نگه داشتن نسبت عرض کاواک به ارتفاع ضریب کیفیت با افزایش عرض کاواک افزایش



شکل ۷: تصویر شماتیک از ساختار چاه کوانتومی AlGaAs/GaAs/AlGaAs



شکل ۸: ساختار لیزر پلاسمونیک



شکل ۹: ساختار لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتومی تمامتریال

برای لحاظ کردن ضریب شکست به‌صورت رابطی بالا از مراجع مختلف اطلاعات هر یک از ترکیبات مورد نظر از جمله GaAs، $\text{Al}_0.3\text{Ga}_0.7\text{As}$ و SiO_2 را به‌دست آورده و در مدل قرار می‌دهیم.

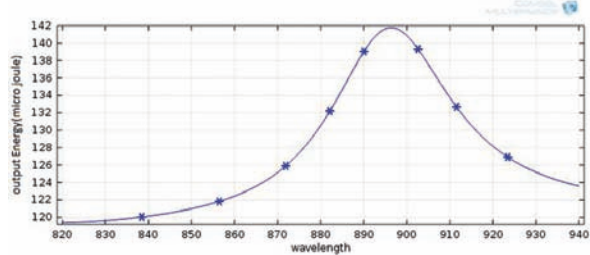
۳-۱- لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتومی تمامتریال

با توجه به ویژگی‌های تمامتریال ترکیب ساختار چاه کوانتومی و تمامتریال را در نظر گرفته شده است. ساختار این به‌صورت شکل (۹) می‌باشد. در اینجا به‌جای استفاده از یک چاه کوانتومی چند تایی از تعدادی از این مجموعه چاه‌های کوانتومی در کنار هم استفاده شده به‌طوری که در کنار هم یک ساختار تمامتریال را تشکیل دهند. در واقع پایه اصلی تشکیل دهنده ساختار تمامتریال در اینجا لایه‌های چاه کوانتومی و هوا هستند که به صورت متناوب در کنار هم قرار گرفته‌اند. به‌عنوان نمونه در ساختار پایه شکل (۸) که عرض کاواک ۱۰۰ نانومتر بود در اینجا به ۵ لایه ۲۰ نانومتر تقسیم شده که ۱۰

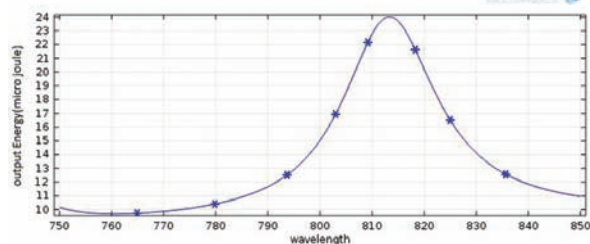
همکاری علمی استادان گرامی و فرهیختگان ارجمند در داوری مقاله‌های نشریه علمی ترویجی عصر برق در سال ۱۳۹۹ که ثمره آن در غنای علمی و فنی مطالب منتشر شده بسیار موثر بوده است باعث خوشحالی و شایسته تقدیر است. امید است افتخار همراهی صاحب‌نظران و اندیشمندان گرامی باعث تداوم موفقیت‌ها در ادامه راه باشد.

با احترام و امتنان
شورای سردبیری

- ۱- دکتر حسین ابوترابی زارچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- دکتر ایمان اخلاقی؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۳- دکتر نجمه اقبال؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۴- دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۵- دکتر علیرضا اکبرزاده توتونچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۶- دکتر امیرمسعود امینیان مدرس؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۷- دکتر رضا بخشی جعفرآبادی؛ شرکت دانش بنیان رھسان
- ۸- دکتر ناصر پریز؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۹- مهندس علی توانایی جبارزاده؛ صنعت
- ۱۰- دکتر محمد باقر توکلی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
- ۱۱- دکتر مسعود تیموری؛ دانشگاه صنعتی ارومیه
- ۱۲- دکتر مهرداد حجت؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود
- ۱۳- دکتر سمیه حسن پور دربان؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۱۴- مهندس مریم حسینی؛ دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۵- دکتر سید ابراهیم حسینی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۶- دکتر سید کمال حسینی ثانی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۷- مهندس مهسا حمیدی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۱۸- مهندس جواد حمیدی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۱۹- دکتر جاوید خراسانی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۲۰- دکتر محمود خطیبی؛ دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)
- ۲۱- مهندس وحید خوشدل؛ دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۲- دکتر مصطفی رجبی مشهدی؛ شرکت توانیر
- ۲۳- دکتر سید مجتبی روحانی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۴- دکتر جواد ساده؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۵- مهندس تکتم شریفیان عطاری؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۲۶- دکتر مهرداد شکوه صارمی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۷- مهندس حسن صادق پور مقدم؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۲۸- دکتر هادی صدوقی یزیدی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۹- دکتر محمد طاهرزاده؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۰- دکتر محمد طلوع خیامی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۱- دکتر منا عربزاده؛ دانشگاه امیرکبیر
- ۳۲- دکتر امیررضا عطاری؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۳- دکتر مهدی علومی بایگی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۴- دکتر مصطفی عبدیانی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۳۵- دکتر علی کارساز؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۳۶- دکتر عباداله کامیاب؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۷- دکتر سید محمد سعید ماجدی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۸- دکتر هاشم مرتضوی؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۳۹- دکتر حامد ملاحمدیان؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۴۰- دکتر محمد منفرد؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۱- دکتر میرمجتبی میرصالحی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۲- مهندس حمیدرضا میریزدی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۴۳- دکتر محسن نجفی؛ دانشگاه صنعتی اراک
- ۴۴- دکتر محمد حسن نشاطی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۵- مهندس سیما نیک‌پرور؛ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی سهند
- ۴۶- دکتر قوشه عابد هدنتی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۷- دکتر منیره هوشمند؛ دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)
- ۴۸- مهندس داریوش یزدان‌پناه؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۴۹- دکتر حمید یعقوبی؛ دانشگاه سمنان



شکل ۱۱: منحنی انرژی تابشی بر حسب طول موج به ازای عرض کاواک ۲۵۰ نانومتر در ساختار متامتریالی



شکل ۱۲: منحنی انرژی تابشی بر حسب طول موج به ازای عرض کاواک ۲۵۰ نانومتر در ساختار پایه

پیدا می‌کند که معنی آن این است که طول موج رزونانس سه‌م بیشتر از انرژی کل خروجی را به خود اختصاص می‌دهد.

مراجع

- [1] Smalley.J.S.T, Vallini.F, GU.Q, Fainman.Y, "Amplification and Lasing of Plasmonic Modes". Proceedings of the IEEE.Vol. 104, No. 12, pp. 1-12, 2016.
- [2] Filmetrics, Online. www.Filmetrics.com , 2017.
- [3] Young Joon Yoo, Sanghyun Ju, Sang Yoon Park, "Metamaterial Absorber for Electromagnetic Waves in Periodic Water Droplets", www.nature.com, pp. 1-7, 2015.
- [4] Yuchu He; George V. Eleftheriades, "Extreme-angle metamaterial-based anti-reflection layer", IEEE Microwave, pp. 1-6, 2017.
- [5] Romain Fleury, Francesco Monticone, "Invisibility and Cloaking: Origins, Present, and Future Perspectives", American Physical Society, pp. 037001-037020, 2015.
- [6] Z. Jacob, J.-Y. Kim, G. V. Naik, A. Boltasseva, E. E. Narimanov, and V. M. Shalaev, "Engineering photonic density of states using metamaterials", www.springer.com, Appl. Phys, pp. 215-218, 2010.
- [7] Smalley.J.S.T, Vallini.F, GU.Q, Fainman.Y, "Amplification and Lasing of Plasmonic Modes". Proceedings of the IEEE.Vol. 104, No. 12, 2016.
- [8] Alam.M.Z, Aitchison.J.S, Mojahedi.M, "A marriage of convenience: Hybridization of surface Plasmon and dielectric waveguide modes". onlinelibrary.wiley.com, Laser Photonics Rev, vol. 8, No. 3, pp. 394-408, 2014.
- [9] H.Ben salah. A.Hocini. M.N.Temmar. D.Khedrouche, "Design of mid infrared high sensitive metal-insulator-metal plasmonic sensor", Chinese Volume 61, pp. 86-97, 2019.
- [10] Mengyuan Zhang. Zhiguo Wang, "Analytical method for metal-insulator-metal surface plasmon polaritons waveguide networks", Optics Express, Vol. 27, Issue 1, pp. 303-321, 2019.
- [11] Mohammad Reza Ghasemi, Bayati, "Proposal for metal-insulator-metal plasmonic power splitter and demultiplexer suitable for implementation in optical switches", IET Optoelectron, pp. 1-7, 2021.
- [12] Lokendra Singh.Guo Zhu.G.Mohan Kumar. D.Revathi. Prakash Pareek , "Numerical simulation of all-optical logic functions at micrometer scale by using plasmonic Metal-Insulator-Metal (MIM) waveguides", science direct , Optics Volume, 135, pp. 1-9, 2021.
- [13] Shiva Khani.Mohammad Danaie. Pejman Rezaei, "Plasmonic all-optical metal-insulator-metal switches based on silver nano-rods, comprehensive theoretical analysis and design guidelines", springer journal of volume 20, pp. 442-457, 2021.

مروری بر مهم‌ترین کتاب‌های منتشر شده در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در زمینه سیستم‌های قدرت

گردآوری و تنظیم: مصطفی عیدپانی / امیرعلی پویان

موسسه آموزش عالی خراسان

در نوشتار پیش‌رو نگاهی داریم به مهم‌ترین کتاب‌های منتشر شده در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در زمینه سیستم‌های قدرت که عنوان هر کتاب به همراه یک خلاصه کوتاه از مطالب آن آورده شده است.

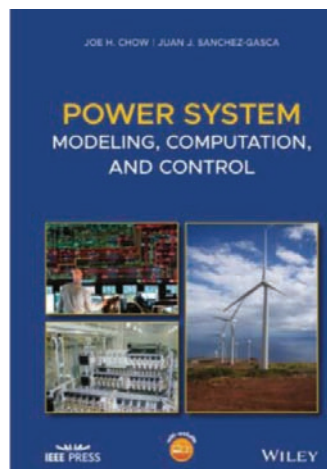


۱- مقدمه

این مقاله باهدف آشنایی با مهم‌ترین عناوین کتاب‌های جدید منتشر شده در حوزه سیستم‌های قدرت نگاشته شده است. حرکت به سمت کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلایل مختلف مانند محدودیت منابع فسیلی، انتشار آلاینده‌ها، دشواری تأمین آن‌ها و راهکارهای مربوط به جایگزینی آن‌ها با دیگر منابع انرژی، همچنان جزء مباحث روز است و تحقیقات گسترده‌ای در این‌باره در حال انجام است. موضوعاتی نظیر افزایش تولید با کمک منابع تجدیدپذیر، تولید پراکنده، ریزشبکه‌ها، ذخیره‌سازهای انرژی و ارزیابی‌های مرتبط از قبیل تاثیر آن‌ها بر پایداری، قابلیت اطمینان، کیفیت توان، حفاظت و امنیت شبکه، به‌علاوه ظهور فناوری‌های جدید و تاثیر آن‌ها بر جنبه‌های مختلف سیستم‌های قدرت، مانند شبکه‌های هوشمند، HVDC، FACTS و WAMS و همچنین ورود مباحث مدیریتی و اقتصادی، تجدید ساختار و مدیریت دوطرفه انرژی، مهم‌ترین و جدیدترین زمینه‌های تحقیقاتی از موضوعات کتاب‌های بررسی شده‌اند.

۲- مرور کتاب‌ها

۲-۱- مدل‌سازی، محاسبه و کنترل سیستم قدرت، ژانویه ۲۰۲۰، جو اچ چانگ و خوان جی سانچز - گاسکا

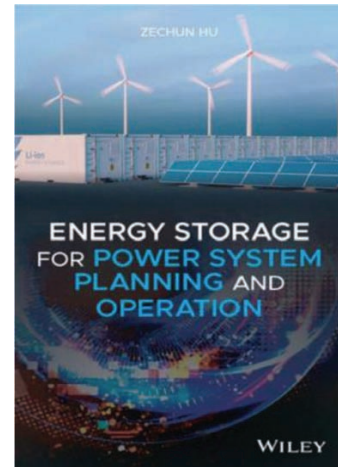


شکل ۱: کتاب مدل‌سازی، محاسبه و کنترل سیستم قدرت [۱]
هدف نویسندگان این کتاب، ایجاد یک مرجع جدید در زمینه سیستم‌های قدرت و بررسی دینامیک آن‌هاست به طوری که

بتواند مباحث جدید را نیز پوشش دهد. چراکه مواد درسی به‌روز شده‌اند و نیاز به یک کتاب درسی جدید برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی و مهندسين قدرت احساس شده است. این کتاب به سه بخش تقسیم شده است. بخش اول، درمورد مفاهیم سیستم قدرت، شامل فصل ۲ تا ۶ است که متشکل از مباحث روش‌های حل پخش بار، پایداری ولتاژ، شبیه‌سازی دینامیکی، بررسی پایداری گذرای مستقیم و بررسی پایداری سیگنال کوچک است. قسمت دوم، در مورد مدل‌های ماشین سنکرون و سیستم‌های کنترل آن‌هاست که شامل فصل‌های ۷ تا ۱۲ است. این فصل‌ها متشکل از مباحث توسعه سیستماتیک مدل‌های حالت دائم و گذرای ماشین‌های سنکرون، سیستم‌های تحریک، پایدارسازهای سیستم قدرت، مدل‌سازی موتور القایی و بارها و مدل کنترل فرکانس توربین-گاورنر هستند. بخش سوم، شامل فصل‌های ۱۳ تا ۱۶ است که با نگاه دینامیکی به مباحث جدید و پیشرفته از جمله سیستم‌های HVDC، FACTS،

تولید برق بادی و کاهش مرتبه مدل، پرداخته است. نویسندگان چهار ویژگی مهم برای این کتاب بر شمرده‌اند؛ ۱- مثال‌های تحلیلی و طراحی متعدد و متنوع، شامل انواع دستی و کامپیوتری (نرم‌افزار مورد استفاده کتاب MATLAB است). ۲- سازمان‌دهی متن کتاب، به طوری که متن، هم شامل مباحث پایه‌ای قدرت، هم مباحث دینامیکی پایه و هم مباحث دینامیکی جدید است. ۳- نمایش جزئیات پنج نمونه پایدارساز، شامل PSS، کنترلر مدولاسیون HVDC، جبران‌کننده استاتیکی STATCOM، جبران‌کننده سری و پایدارساز دارای دو ورودی. ۴- ثبت تعداد زیادی رخدادهای واقعی و تجربیات مواجهه با آن‌ها.

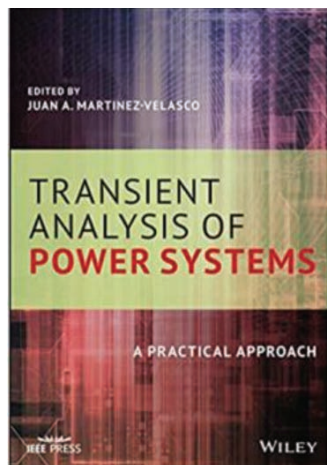
۲-۲- ذخیره‌سازی انرژی برای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، ژانویه ۲۰۲۰، زیچوان هو



شکل ۲: کتاب ذخیره‌سازی انرژی برای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت [۲] این کتاب به بحث ذخیره‌سازی انرژی و تأثیرات آن در اقتصاد، بهره‌برداری، کنترل، دینامیک و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت می‌پردازد. بحث اصلی کتاب این است که با افزایش بیش‌ازپیش تولیدات تجدیدپذیر، پیش‌بینی این نوع تولیدات به دلیل عدم قطعیت و وابستگی آن‌ها به مکان و زمان و آب‌وهوا دچار چالش‌های اساسی بوده و این مسئله را می‌توان به کمک فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی تا حد زیادی مرتفع نمود؛ و یافتن راه‌حل برای این چالش‌ها، موضوع کلی این کتاب است. در فصل ۱، فناوری‌های ذخیره انرژی و کاربردهای آن‌ها در سیستم‌های قدرت به طور خلاصه معرفی شده است. در فصل ۲، سه نوع فناوری ذخیره انرژی، یعنی PHS، ذخیره

انرژی با هوای فشرده و ذخیره انرژی باتری، و مدل‌های ریاضی آن‌ها برای برنامه‌ریزی بهینه توضیح داده شده است. سپس، یک مدل عمومی حالت پایدار ESS آورده شده است. در فصل ۳ و ۴ این کتاب درباره مدل‌های زمان‌بندی روز قبل و استراتژی‌های پیشنهاد مناقصه یک اتحادیه REG-ESS در بازار انرژی، با تمرکز بر روش‌های تطبیق با خروجی تصادفی توان REG، صحبت شده است. در فصل ۵ ابتدا یک فرمول قطعی UC را معرفی می‌کند که برنامه‌ریزی بهینه ESS را در نظر می‌گیرد و سپس، یک فرمول UC سناریو پایه و امنیت مقاوم استخراج می‌شود. در فصل ۶، دو نوع راه‌حل برای مسئله OPF چند دوره‌ای تحت عنوان یک روش نقطه داخلی و یک روش برنامه‌نویسی نیمه معین آورده شده است. در فصل ۷ این کتاب، روش‌های شبیه‌سازی تنظیم فرکانس، کنترل و کمی‌سازی ظرفیت با توجه به مشارکت ESS در تنظیم فرکانس ثانویه (به عنوان مثال، AGC) معرفی شده و مسایل فنی این مبحث مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل‌های ۸ و ۹ این کتاب نیز به ترتیب به برنامه‌ریزی بهینه ESS متصل به شبکه انتقال و شبکه توزیع پرداخته شده است. این کتاب می‌تواند به عنوان کتاب مرجع برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی و محققانی که به کار و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت علاقه‌مند هستند و کاردان‌های برنامه‌ریزی و پخش بار شبکه‌های برق و شرکت‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از ذخیره انرژی مفید باشد.

۲-۳- بررسی حالت گذرای سیستم‌های قدرت، فوریه ۲۰۲۰، خوان جی مارتینز-ولاسکو

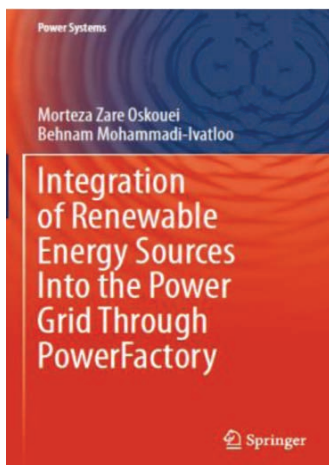


شکل ۳: کتاب بررسی حالت گذرای سیستم‌های قدرت [۳]

این کتاب، در واقع یک کتاب راهنماست که در آن سعی شده دامنه مشخصی از مطالعات پایداری گذرای سیستم‌های قدرت، توسط یک بسته نرم‌افزاری بنام ATP، انجام شود. ATP یک بسته بدون حق امتیاز است که حداقل توسط سه ابزار ادغام شده است. ۱. ATPDraw، رابط کاربری گرافیکی (GUI) برای ایجاد و یا ویرایش پرونده‌های ورودی. ۲. TPBIG، پردازنده اصلی برای شبیه‌سازی گذرا و هارمونیک. ۳. یک پردازنده برای رسم نتایج شبیه‌سازی. در واقع، کاربران ATP می‌توانند از چندین ابزار دیگر استفاده کرده و یک محیط سفارشی با پیوند به بسته‌های دیگر ایجاد کنند. فصل‌های این کتاب را می‌توان در دو گروه طبقه‌بندی کرد. چهار فصل اول به معرفی بررسی حالت گذرا در سیستم‌های قدرت و جزئیات قابلیت‌های ATP اختصاص یافته است. بقیه کتاب هم به معرفی برخی از رایج‌ترین برنامه‌های بسته ATP با تعداد کافی مطالعه موردی اختصاص یافته است. از ویژگی‌های مثبت این کتاب مطالعات موردی مندرج در هر فصل هست که دارای تنوع وسیعی هستند اما در کنار آن نویسنده اصلی اذعان کرده که دو مورد، شامل الزام مطالعه یک کتاب راهنمای مرجع کامل در کنار این کتاب و عدم به کارگیری مثال‌های پیچیده و پرکاربرد از کاستی‌های این کتاب هستند.

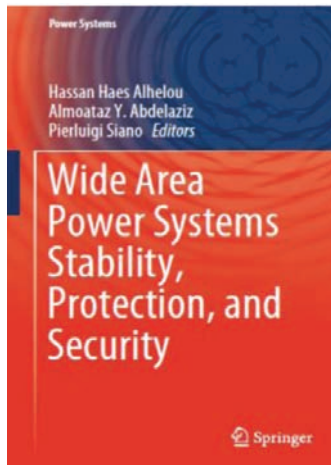
۲-۴- ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر با شبکه قدرت به کمک نرم‌افزار دیجسایلنت، می ۲۰۲۰، مرتضی زارع اسکویی - بهنام محمدی ابوتلو

این کتاب نتیجه تحقیقات نویسندگان در مورد چالش‌های یکپارچه‌سازی شبکه‌های



شکل ۴: کتاب ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر با شبکه قدرت به کمک نرم‌افزار دیجسایلنت [۴]

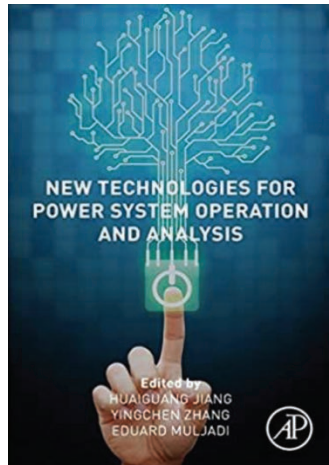
۲-۶- امنیت، حفاظت و پایداری سیستم‌های قدرت ناحیه وسیع، ژانویه ۲۰۲۱، حسن حائز الحلوه - الموترز عبدالعزیز - پیرلوگی سیانو



شکل ۶: کتاب امنیت، حفاظت و پایداری سیستم‌های قدرت ناحیه وسیع [۶]

این کتاب بیشتر بر پایداری، حفاظت و امنیت سیستم‌های قدرت ناحیه وسیع متمرکز است. این کتاب در بیست و یک فصل مرتب شده است. هر فصل با یک ساختار مقدماتی برای درک ابتدایی روش‌های مورد نظر آغاز می‌شود، سپس در یک بستر به‌طور کامل پژوهشی، به تفصیل مسایل مربوطه می‌پردازد. سیستم‌های قدرت در حال حرکت به سمت مفهوم شبکه هوشمند هستند و به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی و خطرات امنیت انرژی، سطح نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر را توجیه‌پذیر می‌کند. این منابع انرژی تجدیدپذیر را می‌توان به‌طور عمده به دودسته تقسیم کرد. ادغام مبتنی بر ماشین سنکرون مبتنی بر اینورتر. منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر، مانند توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک، که مسایل جدیدی را برای پایداری، کنترل، حفاظت و امنیت سیستم‌های قدرت نوین به وجود می‌آورند. چنین منابع انرژی، اینرسی کل سیستم را به شدت کاهش می‌دهند که پایداری و امنیت سیستم را به خطر می‌اندازد. به همین ترتیب، طبیعت تصادفی بالای منابع تجدیدپذیر به دلیل تنوع تولید آن‌ها، منجر به افزایش عدم تعادل توان و در نتیجه نوسان فرکانس می‌شود که ممکن است ثبات و امنیت کلی سیستم را تهدید کند. از طرف دیگر، افزایش واحدهای تولیدی توزیع شده

۲-۵- فناوری‌های جدید برای آنالیز و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، اکتبر ۲۰۲۰، هواجیامگ جیانگ - ینجین ژانگ - ادوارد مولیانی



شکل ۵: کتاب فناوری‌های جدید برای آنالیز و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت [۵]

این کتاب در حقیقت، جمع‌آوری یکسری از جدیدترین مقالات و تحقیقات است که راهگشای بسیار خوبی درباره موضوعات و زمینه‌های جدید تحقیقاتی مهندسی قدرت است. به‌طور خلاصه شامل مباحث زیر (هرکدام طی یک فصل) است و هر فصل موضوع مربوطه را به خوبی باز کرده است. مطالب مطرح شده عبارت‌اند از:

- ۱- معرفی کلیات. ۲- مدل‌های جریان پخش بار خطی جدا شده با برآورد دقیق مقدار ولتاژ در سیستم‌های انتقال و توزیع.
- ۳- ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر و چالش بهره‌برداری سیستم، کنترل و بهینه‌سازی میلیون‌ها دستگاه. ۴- پیشرفت و توسعه بازار عمده‌فروشی و خرده‌فروشی برق در زمینه منابع انرژی توزیع شده. ۵- نظارت و پایش منطقه‌ای و گسترده و تجزیه و تحلیل ناهنجاری بر اساس اندازه‌گیری سنکروفازورها. ۶- ابزارهای عملیاتی شبکه پیشرفته بر اساس ارزیابی حالت سیستم. ۷- برنامه‌ها و کاربردهای یادگیری ماشین پیشرفته برای سیستم‌های قدرت نوین.
- ۸- عملکرد سیستم قدرت شامل میکرو شبکه‌های الکترونیکی اینورتری. ۹- کنترل بهینه خودکار در سیستم‌های انرژی، رویکرد تقویت یادگیری. ۱۰- قدرت، ساختمان‌ها و سایر شبکه‌های مهم، عملیات بهره‌برداری چندسیستمه یکپارچه.

برق و منابع تجدیدپذیر انرژی و بررسی آن‌ها به کمک نرم‌افزار دیجیسایلنت است. این کتاب به الزامات مهم در بخش‌های صنعتی و دانشگاهی برای دستیابی به یک منبع جامع برای مدل‌سازی، بهره‌برداری، کنترل و همچنین پرداختن به چالش‌های مشترک شبکه‌های برق در حضور منابع تجدیدپذیر، به کمک نرم‌افزار قدرتمند و مشهور دیجیسایلنت می‌پردازد که به‌عنوان ابزاری که در بیشتر کشورها، برای تأیید نصب نیروگاه‌های جدید انرژی تجدیدپذیر، نتایج تجزیه و تحلیل فنی این نرم‌افزار مورد نیاز است. علاوه بر این، این کتاب به‌طور کامل تمام مسایل فنی و زمینه‌های حرفه‌ای عملکرد شبکه برق در حضور منابع تجدیدپذیر انرژی را پوشش می‌دهد. این کتاب در هفت فصل سازمان یافته و طیف گسترده‌ای از بررسی‌های کاربردی را در مطالعات سیستم‌های برق تجدیدپذیر به شرح زیر ارائه می‌دهد. در فصل ۱ اقدامات لازم برای ارزیابی فنی و اقتصادی منابع تجدیدپذیر انرژی مشخص شده است و رایج‌ترین استانداردهای موجود برای استفاده مناسب از منابع انرژی تجدیدپذیر معرفی شده است. در فصل ۲ نکات لازم برای مدل‌سازی عناصر اصلی شبکه برق در نرم‌افزار ارائه شده است. در فصل ۳ نکات و دستورالعمل‌های اساسی در مورد نحوه مدل‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر در چارچوب سیستم‌های قدرت با استفاده از نرم‌افزار آورده شده است. در فصل ۴ موارد کیفیت توان پوشش داده شده است. فصل ۵ به چالش‌های الکتریکی رایج ناشی از سوء عملکرد منابع انرژی تجدیدپذیر در هنگام کار سیستم‌های قدرت پرداخته است. فصل ۶ هم به بررسی و محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر می‌پردازد. در فصل ۷ پارامترهای فنی در سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. مهندسان برق، مربیان، بهره‌برداران سیستم قدرت، محققان و طراحان سیستم می‌توانند از مخاطبان تخصصی این کتاب باشند. علاوه بر این، چارچوب پیشنهادی این کتاب، صنعتگران را قادر می‌سازد که از طریق خودآموزی به موضوع تسلط پیدا کنند. همچنین برای تدریس در دوره‌های تحصیلات تکمیلی در زمینه فعالیت منابع تجدیدپذیر بسیار مفید است.

مدیریت و کنترل بهتر آن همچنان در صدر مسایل تحقیقاتی سراسر جهان قرار دارد.

پی‌نوشت‌ها

کلمات مخفف:

- 1.HVDC:High Voltage Direct Current
2. FACTS:Flexible Alternating Current Transmission System
- 3.WAMS:Wide Area Management System
- 4.PSS:Power System Stabilizer
- 5.STATCOM:Static Synchronous Compensator
- 6.PHS:Pumped Hydroelectric Storage
- 7.ESS:Energy Storage System
- 8.REG:Renewable Energy Generation
9. UC:Unit Commitment
- 10.OPF:Optimal Power Flow
11. ATP :Alternative Transient Program
- 12.AGC :Automatic Generation Control
13. PMUS :Phasor Measurement Unit System

مراجع

- [1] JOE H.CHOW – JUAN J.SANCHEZ-G A S C A , P O W E R S Y S T E M MODELING, COMPUTATION, AND CONTROL,WILEY,January2020, ISBN: 9781119546870
- [2] ZECHUN HU, ENERGY STORAGE FOR POWER SYSTEM PLANNING AND OPERATION,WILEY,January2020, ISBN:9781119189084
- [3]Juan A.Martinez-Velasco,Transient Analysis of Power systems, W I L E Y , F e b r u a r y 2 0 2 0 , ISBN:9781119480532
- [4]MortezaZareOskouri –Behnam Mohammadi-Ivatloo, Integration of Renewable Energy Sources Into the Power Grid Through PowerFactory,Springer, May2020, ISBN:978303044376
- [5] HUAIGUANG JIANG - YINGCHEN ZHANG - EDUARD MULJADI, NEW TECHNOLOGIES FOR POWER SYSTEM OPERATIONAND ANALYSIS, Academic Press, October2020, ISBN:978128201688
- [6] Hassan HaesAlhelou - Almoataz Y. Abdelaziz -PierluigiSiano, Wide Area Power Systems Stability, Protection, and Security, Springer, January2021, ISBN:978303054275

القایی دو سو تغذیه. ۱۲- ارزیابی پایداری ولتاژ ناحیه وسیع بر اساس اندازه‌گیری ماژول‌های تک‌پایانه کوپل شده، کنترل تطبیقی ولتاژ ثانویه بر مبنای سیستم پایش ناحیه وسیع. ۱۳- کاربردهای درخت تصمیم و انتخاب جنگل تصادفی جهت ارزیابی پایداری ولتاژ در زمان واقعی با کمک سیستم پایش ناحیه وسیع. ۱۴- جایگزینی رله دیستانس دچار عملکرد ناقص زیر فشار شرایط سیستم. ۱۵- پایش پایداری ولتاژ در زمان واقعی با استفاده از اندازه‌گیری PMU مبتنی بر یادگیری ماشین. ۱۶- بررسی خطا در سیستم انتقال منطقه وسیع بر اساس تخمین حالت سه‌فاز با در نظر گرفتن خطاهای اندازه‌گیری. ۱۷- تحلیلگر منطقه وسیع با تصمیم‌گیری داده محور برای آشکارسازی خطا و ارزیابی سیستم قدرت. ۱۸- بررسی فنی-اقتصادی سیستم‌های پایش ناحیه وسیع مبتنی بر الگوریتم تشخیص جزایر برای کمینه‌سازی PMU در محیط شبکه هوشمند. ۱۹- برآورد مستقل خوشه‌بندی ژنراتور و شرایط جزیره‌ای در سیستم قدرت دارای ریزش‌بکه و تولید اینورتر پایه. ۲۰- انعطاف‌پذیری در سیستم‌های پایش ناحیه وسیع برای شبکه‌های هوشمند. ۲۱- سیستم تشخیص نفوذ ترکیبی زنجیره محور سایبری برای شبکه هوشمند.

این کتاب فصل‌هایی را برای توسعه‌چنین طرح‌هایی معرفی می‌کند که می‌تواند مزایای زیادی هم برای بهره‌برداران سیستم قدرت و هم برای مصرف‌کنندگان به همراه داشته باشد. کتاب طرح‌های نوآورانه و جدیدی جهت کنترل و حفاظت ارائه می‌دهد که می‌تواند ثبات و امنیت کلی سیستم‌های قدرت آینده در کل ناحیه مربوطه را بهبود بخشد.

۳- نتیجه‌گیری

نتیجه آن‌که تلاش برای رفع چالش‌های ناشی از حرکت جهانی به سمت منابع تجدیدپذیر انرژی و ذخیره‌سازهای انرژی همچنین ورود ادوات نوین به سیستم‌های قدرت، جهت

تجدیدپذیر در سیستم‌های توزیع، چالش‌های جدیدی را برای پایداری ولتاژ و نگرانی‌های متعادل‌سازی فاز ایجاد می‌کند. این کتاب برای حل این مسایل، سراغ پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های اندازه‌گیری و ارتباطات، به‌عنوان مثال، واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMUS) و سیستم‌های نظارت بر منطقه گسترده (WAMS) برای توسعه رویکردهای جدید کنترل و حفاظت می‌رود که می‌تواند به حل مسایل انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های قدرت نوین کمک کنند. بر این اساس، پایداری و امنیت سیستم قدرت را می‌توان در چارچوب زمان واقعی کنترل و ارزیابی کرد و می‌توان با استفاده از طرح‌های جدید کنترل و حفاظت در سطح وسیع، پایداری و امنیت سیستم انرژی نوین را تضمین کرد. فصول کتاب به‌صورت زیر هستند؛

۱- بررسی جامع سیستم‌های حفاظت، کنترل و نظارت بر ناحیه وسیع. ۲- مقدمه‌ای بر WAMS و کاربردهای آن برای سیستم‌های برق آینده. ۳- زیرساخت اطلاعاتی و ارتباطی در سیستم‌های ناحیه وسیع نوین. ۴- واحدهای اندازه‌گیری فازور و سیستم‌های مدیریت ناحیه وسیع. ۵- انتخاب بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور. ۶- طراحی هماهنگ PSS های فازی و کنترل فرکانس بار جهت میرایی نوسانات سیستم قدرت با توجه به نفوذ انرژی بادی. ۷- نظارت و پایش ناحیه وسیع برای سیستم‌های قدرت بزرگ مبتنی بر پردازش هم‌زمان داده‌های مکانی-زمانی. ۸- برآورد حالت الکترومکانیکی در سیستم قدرت با استفاده از یک رویکرد غیرثابت جدید. ۹- بهبود پایداری سیگنال کوچک نیروگاه پمپ آبی ذخیره انرژی با استفاده از سیگنال‌های منطقه وسیع و با در نظر گرفتن مزرعه بادی. ۱۰- بررسی تأثیر کنترل مقاوم هماهنگ بر نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت ادغام‌شده با انرژی بادی. ۱۱- پایداری فرکانس سیستم برق دو ناحیه به هم متصل به همراه توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتورهای



بهره برداری برتر سال



KHORASAN Advertising | www.khaco.co

دفتر مرکزی: مشهد
بزرگراه شهید کلانتری

حدفاصل میدان جهاد و جمهوری اسلامی کد پستی: ۹۳۱۱۳-۹۱۷۵۶

تلفن: ۰۵۱-۳۸۴۷۲۱۰۴ فکس: ۰۵۱-۳۸۴۷۲۱۰۵

تهران: بزرگراه شهید اصفهانی- ابتدای بلوار جلال آل احمد- پلاک ۱۴۴

طبقه ۷ - واحد ۴ کد پستی: ۱۴۶۱۶۴۶۱۸ تلفن: ۰۲۱-۴۴۳۷۶۹۰۱

قائن: کوی ولیصر- خ. شهید فروزان- پ ۲۱ کد پستی ۹۷۶۱۶۶۸۳۹۷

تلفن: ۰۵۶-۳۲۵۶۶۴۶۷

سبزوار: شهرک جهاد- خیابان حکمت - حکمت ۵ قطعه ۱۲ شمالی

تلفن: ۰۵۱-۴۴۶۵۳۲۲

بجنورد: خیابان ۱۷ شهر بروجنوبی- کوچه یقین- پلاک ۱۱

تلفن: ۰۵۸-۳۲۲۵۶۷۰۵

Tehran office : unit 7, No 441, End of Jalal-e-Al-e-Ahmad Hwy, Tehran
IRAN PC: 1461646178 Tel: +982144376901

Head office : Between Jihad Square and Jomhuri
Eslami Sq., Shahid Kalantari Hwy, Mashhad, IRAN

PC.: 91756-93113 Tel : (051)38472101-4 Fax: (051) 38472105

Qaen office : No 21, Shahid Forouzannezhad St. , Vali-Asr Hwy, Qaen, IRAN
Tell: (056)32566467

Sabzevar Office: Jahad Town , Hekmat Street, Hekmat 5
Plot 12 North Tel: (051) 4465322

Bojnourd office : No 11, Yaghin Alley, 17 Shahrivar South St.
Bojnourd, IRAN Tel: (058) 32256705

Info@fetc.ir

www.fetc.ir

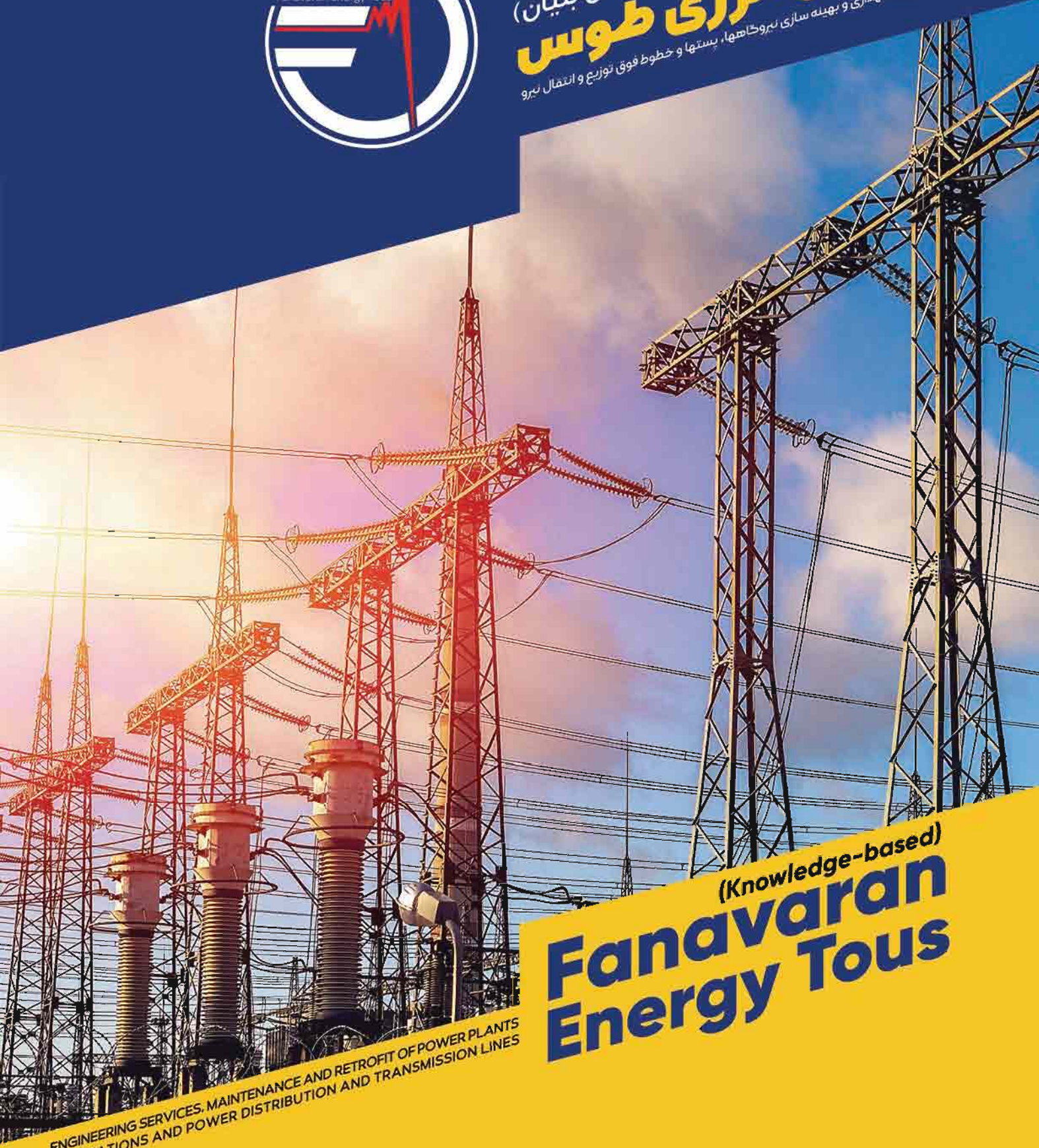


فن آوران انرژی طوس
Fanavaran Energy Tous

(دانش بنیان)

فن آوران انرژی طوس

خدمات مهندسی، نگهداری و بهینه سازی نیروگاهها، پستها و خطوط فوق توزیع و انتقال نیرو



(Knowledge-based)

**Fanavaran
Energy Tous**

ENGINEERING SERVICES, MAINTENANCE AND RETROFIT OF POWER PLANTS
SUBSTATIONS AND POWER DISTRIBUTION AND TRANSMISSION LINES