



ASR-E-BARQ
ISSN: 2588-3828

عصر برق ۱۸

فصلنامه علمی انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران، شاخه خراسان سال نهم • شماره ۱۸ • زمستان ۱۴۰۱ قیمت ۳۵,۰۰۰ تومان



نگاهی نو به قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع برق / طرح‌های بهینه‌سازی مصرف راهکاری برای جبران ناترازی مصرف بدون نیاز به هزینه ساخت نیروگاه / مخاطرات شبکه‌های قدرت از طوفان ژئومغناطیسی ناشی از فعالیت‌های خورشید / امکان‌سنجی وقوع تشدید در خط ۴۰۰ کیلوولت ابوطالب - تربت‌جام / برنامه‌ریزی بهینه تولید انرژی الکتریکی و توزیع اقتصادی بارها در حضور توربین بادی / تعیین موقعیت و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن حالت‌های کاری منابع مبتنی بر الگوریتم حرکت جمعی ذرات بهبود یافته جهت کاهش تلفات توان و بهبود نمایه ولتاژ / مروری بر روش‌های تشخیص و پیش‌بینی بیماری‌های مزمن کلیوی با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی / پیاده‌سازی روش کنترل مستقیم توان فازی در سیستم کنترل توربین بادی DFIG تحت سخت‌افزار FPGA



آذران شاپ

فروشگاه اینترنتی محصولات برق صنعتی

برند دورمن اسمیت در سال 1881 میلادی در انگلستان تاسیس شد فعالیت این شرکت در زمینه طراحی و تولید وسایل برقی توزیع و انتقال برق بوده و از تابلوهای توزیع ساده برق تا بردهای الکتریکی پیشرفته و خاص از جمله محصولات این شرکت میباشد.

سابقه ی حضور دورمن اسمیت در ایران و خاورمیانه، به بیش از نیم قرن میرسد و در این مدت با بسیاری از مشتریان و مشاوران و پیمانکاران برجسته در زمینه ی طراحی و ساخت تابلو برق صنعتی و اجرای پروژه های بزرگ همکاری کرده است، که در این میان می توان از پروژه هایی مانند برج العرب امارات، هتل داسیت تانی امارات، ورزشگاه لوسیل اسپرت قطر، مسجد سلطان قابوس عمان، خانه ی اپرا سلطنتی مسقط عمان، برج دروازه پایتخت امارات، مرکز تجاری دبی را نام برد.

همچنین هتل همای شماره یک مشهد در زمان ساخت با محصولات دورمن اسمیت در تابلوهای توزیع تجهیز گردیده است و کلیدهای کامپکت این برند پس از پنجاه سال هنوز در تابلوهای توزیع بیمارستان امام رضا (ع) مشهد در حال کار می باشند.



مهمترین محصولات

- کلیدهای مینیاتوری دورمن اسمیت (تکفاز و سه فاز)
- کلید های محافظ جان دورمن اسمیت (دابل و چهار پل)
- کلیدهای محافظ جان ترکیبی دورمن اسمیت
- کنتاکتورهای دورمن اسمیت
- کلیدهای اتوماتیک حرارتی، مغناطیسی دورمن اسمیت
- کلید های الکترونیکی هوایی دورمن اسمیت
- کلید بی متال (محافظ موتوری) دورمن اسمیت



نمایندگی محصولات DeDe

اتصالات تابلویی

واژه DeDe بر گرفته از دو حرف نخست کلمات انگلیسی جمله Define به معنی " جزئیات تعیین کننده هستند " می باشد و این شعار سرلوحه ما در این زمینه می باشد

مهمترین محصولات انحصاری این گروه عبارتند از :

- 1- روکش های حرارتی (ترموفیت) برند WOER کره جنوبی
- 2- انواع وایرشو و سرسیم ها
- 3- کابلشو و رابط (موف) بیتال
- 4- بست های کمر بندی شامل

- بست کمر بندی پلاستیکی
- بست کمر بندی استیل
- بست کمر بندی استیل روکشدار
- پایه های چسبدار بست کمر بندی

5- ابزار آلات مرتبط

- انواع پرس سرسیم و وایر شو (SCT-A .. B)
- پرس کابلشو دستی و هیدرولیک (HCT - MCT)
- پرس سوکت شبکه (NCT)
- سیم چین و سیم لخت کن تلفیقی (WST-pro)
- حرفه ای و....

6- انواع گلند پلاستیکی (PG و متریک) و برنجی ه

7- چراغ سیگنال AC-DC (SMD) در ولتاژ های مختلف

8- وایر نامبر و حروف سیم در سایزهای مختلف

9- مفصل های حرارتی فشار ضعیف

10- چسب برق بسیار با کیفیت

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

شورای سیاست گذاری:

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

شورای نویسندگان:

دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی، دکتر سید هاشم اورعی
میرزمانی، دکتر حمید تولیت، دکتر سید حسین حسینی،
دکتر حبیب رجبی مشهدی، دکتر جواد ساده، دکتر مهرداد
شکوه صارمی، دکتر امیررضا عطاری، دکتر مصطفی عیدیانسی،
دکتر گئورگ قره پتیان، دکتر خلیل مافی نژاد،
دکتر محمد منفرد، دکتر محمد مولوی کاخکی

مدیر اجرایی:

مهندس غلامرضا یزدانی شواکند

روابط عمومی:

مهندس فریده سعادت، مهندس سمیرا شمس

مدیر برنامه ریزی:

دکتر مصطفی رجبی مشهدی

صفحه آرایی و امور گرافیک:

امواج برتر (۰۵۱-۳۸۹۴۰۱۲۰)

لیتوگرافی و چاپ: زبرد (۰۵۱-۳۱۶۶۶)

صحافی: حافظ (۰۵۱-۳۳۹۲۹۱۱۱)

به نام دوست

فهرست مطالب

- ۲ یادداشت مدیر مسئول: نگاهی نو به قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع برق
- ۳ طرح‌های بهینه‌سازی مصرف راهکاری برای جبران ناترازی مصرف بدون نیاز به ...
- ۶ مخاطرات شبکه‌های قدرت از طوفان ژئومغناطیسی ناشی از فعالیت‌های خورشید
- ۱۶ امکان‌سنجی وقوع تشدید در خط ۴۰۰ کیلوولت ابوطالب- تربت‌جام
- ۲۲ برنامه‌ریزی بهینه تولید انرژی الکتریکی و توزیع اقتصادی بارها در حضور توربین بادی
- ۳۱ تعیین موقعیت و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با ...
- ۳۸ تحلیل ناحیه نرخ و ظرفیت و امنیت لایه فیزیکی برای کانال پخش... (چکیده رساله دکتری)
- ۳۸ کنترل توان منابع تولید تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی در ... (چکیده رساله دکتری)
- ۳۹ طراحی و ساخت مجتمع یک سیستم فاصله‌سنج فرارپهن باند با ... (چکیده رساله دکتری)
- ۳۹ کنترل زمان محدود سیستم‌های غیرخطی تصادفی با قید ... (چکیده رساله دکتری)
- ۴۰ مروری بر روش‌های تشخیص و پیش‌بینی بیماری‌های مزمن کلیوی با ...
- ۵۴ پیاده‌سازی روش کنترل مستقیم توان فازی در سیستم کنترل توربین بادی DFIG ...

● 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.
- مسئولیت حقوقی آثار ارسالی بر عهده نویسندگان مقاله‌ها می‌باشد.

فرزانه سال

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

دانشگاه سجاد

تلفن: ۰۵۱-۳۶۰۲۹۰۰۰

وب سایت: www.kiaeee.ir

پست الکترونیک: info@kiaeee.ir



نگاهی نو به قابلیت اطمینان در شبکه های توزیع برق

یادداشت مدیر مسئول

از قابلیت اطمینان را درخواست می کنند، بنابراین شاخص های قابلیت اطمینان نقطه بار تعریف می شود تا کمک کنند که قابلیت اطمینان هر مشترک، جداگانه ارزیابی شود. تاکنون چندین روش برای تأمین قابلیت اطمینان درخواستی مشترکان معرفی شده است که طرح های جریمه-پاداش و بیمه قابلیت اطمینان از مهم ترین آن ها می باشد. طرح جریمه-پاداش وضعیت های تنظیم شده ای هستند که تحت آن ها به شرکت های توزیع به خاطر قابلیت اطمینان خوب، پاداش و به خاطر قابلیت اطمینان ضعیف، جریمه تعلق می گیرد. بدین ترتیب، شرکت های توزیع سعی می کنند مجموع هزینه قابلیت اطمینان و جریمه ای که به آن ها تعلق می گیرد را به کم ترین مقدار ممکن برسانند. در طرح بیمه قابلیت اطمینان، مشترکان سطح قابلیت اطمینان مورد انتظار خود را درخواست و در ازای دریافت آن مبلغی را می پردازند و در صورت عدم تأمین آن، خسارت دریافت می کنند. این روش علاوه بر اینکه هزینه های تأمین قابلیت اطمینان را مهیا می کند، تمایلات مشترکان را نیز در نظر می گیرد. با وجود این، اجرای کامل آن با توجه به سطح انعطاف پذیری شبکه ممکن است باعث ایجاد مفت بتری شود. مفت برها، با اطلاع از درخواست سایر مشترکان، درخواست قابلیت اطمینان متفاوت از نیازشان می دهند تا هزینه کمتری بپردازند. از این رو درخواست مشترکان روی یکدیگر تأثیرگذار است و در چنین شرایطی، نظریه بازی ها یک راه حل مؤثر است. در مطالعات اخیر این حوزه، ارزیابی قابلیت اطمینان نقطه ای با مدل های معرفی شده در نظریه بازی ها، مانند مدل کورنات و مدل تعادل تابع عرضه که در بازارهای برق به طور گسترده به کار گرفته می شود، پیشنهاد شده است. بنابراین انتظار این است که شرکت های توزیع برق بازنگری در روش های سنتی برنامه ریزی و تأمین قابلیت اطمینان را در دستور کار قرار دهند.

حبیب رجبی مشهدی
مدیر مسئول

صنعت برق در جهان در دهه های اخیر تغییرات بزرگی را در عرصه های فنی و اقتصادی تجربه کرده است. این تغییرات نقش و عملکرد شبکه های توزیع برق را به طور اساسی متحول کرده است و مباحث و مفاهیم جدیدی را در بهره برداری و برنامه ریزی این شبکه ها مطرح نموده است. نگاهی نو به قابلیت اطمینان در شبکه های توزیع از جمله این مباحث است و اهمیت آن برای تأمین برق مشترکان خانگی و صنعتی رو به افزایش است. در سال های اخیر تقاضا برای قابلیت اطمینان اختصاصی و نقطه ای متناسب با نیاز مشترکان در شبکه های توزیع مطرح شده و این موضوع موجب پیدایش نظریه ها و نگاه های جدید در این زمینه شده است.

در گذشته مدیریت قابلیت اطمینان در صنعت برق با قاعده ساده ای که ارزش تأمین برق را برای همه مشترکان یکسان می دید، صورت می گرفت. اما نیازمندی های صنعت از دو طریق باعث تغییر در چنین دیدگاهی گردید. نخست اینکه نیاز مصرف کنندگان مدرن تغییر کرد، به طوری که استفاده گسترده از ابزارهای دیجیتال و هوشمند باعث شد مفهوم کیفیت قابل قبول خدمات برای مشترکان تغییر کند. دوم اینکه استانداردهای سنتی قابلیت اطمینان، اگرچه سطح مطلوب قابلیت اطمینان سیستم را مشخص می کردند، ولی هیچ گاه روشی برای تأمین آن به صورت بهینه و با کمترین هزینه پیشنهاد نمی دادند و در واقع نیازهای مشترکان را در نظر نمی گرفتند.

مشترکان، امکان تعویض شبکه توزیع را در صورت غیرقابل پذیرش بودن سطح قابلیت اطمینان دریافتی، ندارند؛ بنابراین به طور عمده، شبکه توزیعی که به آن متصل هستند تعیین کننده سطح قابلیت اطمینان آن ها است. از طرفی شرکت های توزیع به دنبال کاهش هزینه های خود هستند و تمایلی به پذیرش هزینه زیاد ندارند. در چنین شرایطی رگولاتورها به دنبال راهکارهایی هستند تا به وسیله آن اهدافی را برای قابلیت اطمینان تعریف، اندازه گیری و اجرا کنند. این هدف گذاری ها برای شرکت های توزیع، یک معیار اقتصادی فراهم می کند تا اگر سود نهایی بهبود قابلیت اطمینان مشترکان از هزینه نهایی آن بیشتر باشد، سطح قابلیت اطمینان خود را ارتقا دهند. از طرفی مشترکان مختلف، سطوح مختلفی

طرح‌های بهینه‌سازی انرژی

راهکاری برای جبران ناترازی مصرف بدون نیاز به هزینه ساخت نیروگاه

گفت‌وگو با مدیران دپارتمان بهینه‌سازی در گروه مهم شرق

گروه مهم شرق یکی از مجموعه‌های فعال در صنعت برق، آب و فاضلاب، نفت و گاز و انرژی است. توجه به بحث بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی یکی از فعالیت‌های این گروه است. آنچه در ادامه می‌خوانید حاصل گفت‌وگو با مهندس صدر که در حال حاضر مدیریت دپارتمان بهینه‌سازی انرژی را بر عهده دارد و مهندس بنیامین رحمتی‌نیا از کارشناسان این دپارتمان در زمینه مزایای طرح‌های بهینه‌سازی مصرف و مشکلات اجرایی و ساختاری آن است.

مهم شرق و طرح‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی

مهندس صدر می‌گوید فعالیت‌های بخش بهینه‌سازی در چهار محور: طرح جایگزینی سیم با کابل، طرح جایگزینی لامپ‌های پر مصرف با لامپ‌های کم مصرف و ال‌ای‌دی، طرح خازن گذاری و طرح ریز شبکه‌ها دنبال می‌شود.

در طرح جایگزینی لامپ‌های پر مصرف که زیر نظر ساتبا انجام می‌شود، لامپ‌ها و چراغ‌های مربوط به روشنایی گذرگاه‌های شهری با لامپ‌های کم‌مصرف جایگزین می‌شود و هزینه‌های آن از محل صرفه‌جویی انرژی ایجاد شده تامین می‌شود اما به گفته‌ی مهندس صدر تعرفه‌های پایین انرژی الکتریکی در کشور یکی از موانع اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی و این طرح است و توجیه‌پذیری اقتصادی طرح‌ها را از بین می‌برد. موضوعی که طرح خازن‌گذاری را هم به سرنوشتی مشابه دچار ساخته است و وقتی اعداد و ارقام هزینه‌ای با تعرفه‌های برق مصرفی مقایسه می‌شود انگیزه‌های اجرای طرح را در نبود منابع مالی که وزارت نیرو سال‌ها است به

آن مبتلا شده است از بین می‌برد. اما در هر صورت بهینه‌سازی یک کار شیک و تشریفاتی نیست، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است که باید برای حفظ منافع ملی انجام شود. نمی‌توان به‌طور مرتب نیروگاه‌های گران‌قیمت را تاسیس نمود و برق تولیدی آن را در خدمت بد مصرف کردن شبکه و مشترکان گذاشت و طرح‌های بهینه‌سازی باید به این فرایند اشتباه پایان دهد. کمبود انرژی در حال حاضر سبب شده است با وجود تصمیم مجلس برای عدم تغییر ساعت تابستانه در کشور، وزارت نیرو درخواست نماید در روزهای اوج مصرف برای جلوگیری از خاموشی، ساعت کار اداره‌ها تغییر کند تا بتواند با این کار برق مورد نیاز مشترکان را در شرایط اوج مصرف تامین کند. در این شرایط، طرح‌های بهینه‌سازی می‌تواند به‌جای ساخت نیروگاه به کمک شبکه بیاید و از انرژی ذخیره شده ناشی از این طرح‌ها برق مورد نیاز را تامین نماید. بر اساس بررسی‌هایی که کارشناسان گروه مهم شرق انجام داده‌اند، اگر قوانین موجود به درستی در بخش انرژی اجرا شود، بسیاری از مشکلات مربوط به طرح‌ها و

مزیت‌های طرح خازن‌گذاری

توان الکتریکی در نیروگاه به صورت توان ظاهری (S) که حاصل جمع برداری توان مفید (P) و توان راکتیو (Q) تولید و به خطوط توزیع و فوق توزیع تحویل می‌گردد. در صورتی که سهم توان راکتیو (Q) را در خطوط توزیع و فوق توزیع کم کنیم و آن را در محل مصرف تولید کنیم، ظرفیت خطوط برای انتقال توان مفید (P) افزایش می‌یابد. کاری که با طرح خازن‌گذاری در محل کارخانه‌های پر مصرف مانند صنایع فولاد امکان‌پذیر است و در آن می‌توان توان راکتیو (Q) را با خازن‌گذاری و بدون نیروگاه در محل مصرف ایجاد نمود و به میزان بسیار زیادی منفعت اقتصادی ایجاد نمود. هم‌چنین از طرح خازن‌گذاری می‌توان



مهندس شهاب صدر از سال ۱۳۸۴ در بخش‌های مختلف گروه مهمان شرق مانند بخش خطوط انتقال، توسعه‌ی بازار، دپارتمان بهینه‌سازی برای پروژه‌های تعویض سیم با کابل خودنگهدار، بخش کاهش تلفات، پروژه‌های آب و فاضلاب و در بخش نفت و گاز مانند پروژه‌ی برق‌رسانی به میدان نفت و گاز آزادگان حضور داشته است و در حال حاضر مدیر دپارتمان بهینه‌سازی انرژی گروه مهمان شرق می‌باشد.

برای بهبود ولتاژ در انتهای خطوط توزیع بهره‌مند شد و افت ولتاژ ایجاد شده را جبران نمود. مهندس صدر می‌گوید؛ گروه مهمان شرق با تکیه بر دانش فنی کارشناسان خود استفاده بهینه از طرح خازن‌گذاری را در خطوط توزیع و محل کارخانجات پر مصرف در دستور کار قرار داده است و در صورت تامین منابع مالی لازم، سرعت انجام این طرح‌ها خواهد توانست مشکلات صنعت برق را در این زمینه حل کند.

ریز شبکه‌ها

قطع برق در شهرک‌های صنعتی یا مناطق خاص تجاری همواره با خسارت‌های اقتصادی هنگفتی روبه‌رو است، نمونه‌ی آن در کارگاه‌های ذوب فلزات است که تنها چند دقیقه تاخیر در قطع برق یا تامین برق برای چند دقیقه بیشتر می‌تواند از خسارت‌ها بکاهد. این در حالی است که در بخش مسکونی به‌طور معمول خسارت‌ها هنگفت نیست. یکی از راهکارهای تامین نیروی الکتریکی مورد نیاز واحدهای صنعتی در هنگام قطع برق استفاده از ریز شبکه‌ها یا همان میکروگریدها است تا با استفاده از ریز شبکه‌ها از طریق تولید پراکنده یا نیروگاه‌های خورشیدی یا سیستم‌های برق اضطراری کارخانه‌ها در یک شبکه‌ی محلی، برق مورد نیاز واحدها تامین شود. در هنگام قطع برق، نیازها را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود؛ یک دسته واحدهایی که نیازمند برق نجات هستند. مانند آسانسوری که بین دو طبقه ایستاده است و با دریافت اندکی انرژی الکتریکی می‌تواند

از این وضعیت رهایی پیدا کند یا کارخانه‌ی ذوبی که برای خالی کردن مواد مذاب از پاتیل به قالب‌ها نیاز به مدت زمانی کوتاه برای تامین برق دارد و دسته‌ی دیگری واحدهایی هستند که ادامه‌ی کار با برق گران‌تر را هم از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌بینند. در یک شبکه‌ی محلی کوچک و با استفاده از منابع انرژی‌ای که به آن‌ها اشاره شد و استفاده از نرم‌افزارهای قابل برنامه‌ریزی و ایجاد یک زیرساخت در آن شبکه‌ی محلی می‌توان به هر دو دسته‌ی این نیازها پاسخ داد.

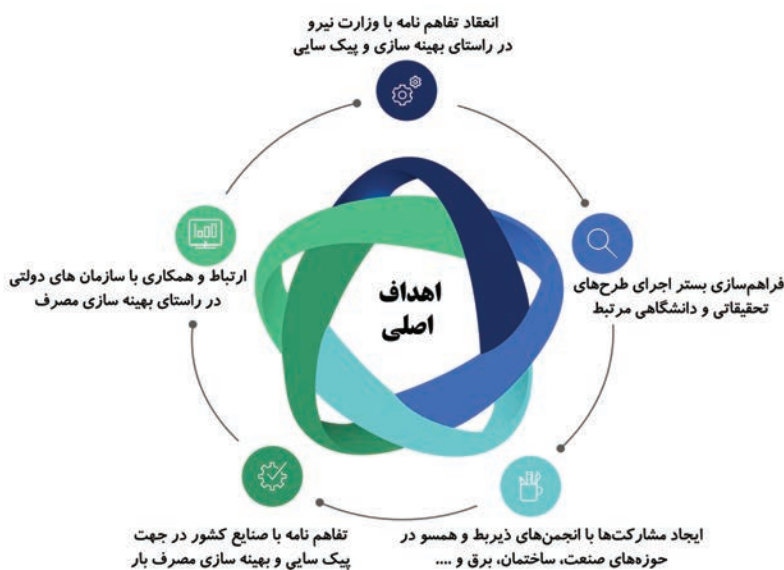
گروه مهمان شرق این آمادگی را دارد که برای راه‌اندازی چنین شبکه‌هایی سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی نماید و مشکل واحدهای صنعتی را بدون این‌که درگیر خرید و نگهداری دیزل ژنراتور شوند تامین نماید و بهره‌وری آن‌ها را افزایش دهد.

جایگزینی لامپ‌های پر مصرف سیستم روشنایی گذرگاه‌های شهری

مهندس بنیامین رحمتی‌نیا که از زمان حضور او در گروه مهمان شرق ۴ سال می‌گذرد، دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد برق قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد است. او می‌گوید متولی طرح جایگزینی لامپ‌های کم‌مصرف و ال‌ای‌دی در سیستم

روشنایی گذرگاه‌های شهری، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) است. بر این اساس بخش بهینه‌سازی مصرف گروه مهمان شرق تحلیل فنی و اقتصادی طرح را آماده و به ساتبا ارائه نموده است. شیوه‌ی کار به این صورت است که پس از ارائه طرح، لامپ‌های کم‌مصرف جایگزین می‌شوند و پس از آن هر سه ماه متناسب با تعداد لامپ‌های جایگزین شده، گواهی صرفه‌جویی دریافت می‌کنند. این گواهی به بازار بهینه‌سازی که البته هنوز شکل نگرفته است ارائه می‌شود و به مصرف‌کنندگان متقاضی برق با نرخ مشخصی فروخته می‌شود تا سرمایه‌گذار بتواند با سود مشخص به هزینه‌های انجام شده‌ی خود دست پیدا کند. دوره‌ی بازگشت سرمایه ۵ سال یا بیشتر تعریف می‌شود و سرمایه‌گذار در این مدت باید علاوه بر بازگشت سرمایه، به سود مناسبی هم دست پیدا کند.

رحمتی‌نیا یکی از مشکلات اجرای این طرح را وابستگی ارزی مواد اولیه لامپ‌های ال‌ای‌دی می‌داند و می‌گوید؛ در این طرح سرمایه‌گذاری بر اساس نرخ دلار انجام می‌شود و نوسانات ارزی، بازگشت سرمایه را که به‌صورت ریالی است از توجیه اقتصادی خارج می‌کند چون از ابتدای شروع





مهندس بنیامین رحمتی نیا دانش آموخته کارشناسی ارشد برق قدرت و از کارشناسان دپارتمان بهینه سازی انرژی گروه مهم شرق است.

توانمندی های اقتصادی خود و شیوه هایی که برای تامین مالی و جذب سرمایه استفاده می کنند، آمادگی دارد به صنعت برق کشور خدمات مطلوبی ارائه نماید و به دلیل ساختار مدیریتی و سازمانی خود به دنبال تعریف پروژه های جدید و راهکارهای نوین برای رفع چالش های انرژی کشور است. بر همین اساس از انعطاف پذیری بالایی برای تعامل با بخش دولتی برخوردار است و پیشنهادهایی در زمینه استفاده از ظرفیت های مولدسازی و ارائه ی گواهی های صرفه جویی در بورس انرژی برای تامین مالی پروژه ها ارائه نموده است تا سرعت اجرای پروژه ها افزایش یابد، با این حال به نظر می رسد در بسیاری از طرح ها بخش دولتی هم باید قسمتی از هزینه ها را بر عهده بگیرد تا طرح ها از توجیه اقتصادی خارج نشوند و امکان اجرای سریع آن متناسب با سیاست های بخش انرژی کشور فراهم شود و اکنون نیز در حال بررسی و کار بر روی بند ق بودجه ۱۴۰۲ هستند که بتوانند پروژه تعریف کنند.»

مهندس صدر در پایان اضافه کرد: «با این که سیاست های مدیریتی گروه مهم شرق بر انجام پروژه ها بر اساس منافع ملی و پایداری صنعت برق است نباید از نظر دور داشت که هر بنگاه اقتصادی برای حفظ و بقای خود باید به معادله های اقتصادی توجه نماید. برای یک سرمایه گذار برگشت سرمایه مهم است تا بتواند اشتغال ایجاد کند و به کار ادامه دهد. بنابراین بخش دولتی هم باید این منطق سرمایه گذاری را در نظر داشته باشد تا انگیزه های سرمایه گذاری از بین نرود و در این راستا آمادگی کامل گروه مهم شرق را برای همکاری های دو جانبه با کلیه ذینفعان بخش انرژی کشور اعلام می دارد.»

لامپ های ۵۰ وات فرسوده هم تعویض شوند و این برای سرمایه گذاری که قرار است در طول دوره ی ۵ یا ۷ ساله ی بازگشت سرمایه هم ایرادهای احتمالی لامپ ها را برطرف و لامپ های سوخته را تعویض کند، مقرون به صرفه نیست.

مهام شرق و توانمندی در راستای تامین نیازهای صنعت برق کشور

مهندس شهاب صدر مدیر پروژه های بهینه سازی انرژی گروه مهم شرق با اشاره به توانمندی های این گروه می گوید: «گروه مهم شرق یک پیمانکار عمومی GC است که از ۱۱ شرکت تشکیل شده است و تنها با نگاه پیمانکاری به پروژه ها ورود پیدا نمی کند. این گروه که در جایگاه یک بنگاه اقتصادی وارد سومین دهه از ماندگاری و گسترش فعالیت های خود شده است، نخستین شرکتی است که پروژه های صنعت انتقال برق را با روش تامین کالا، ساخت با شرط تعهد پیمانکار به تامین مالی (EPCF) انجام داده است و توانمندی های خود را در حوزه های مختلف به نمایش گذاشته است تا نیازهای صنعت برق را تامین نماید.»

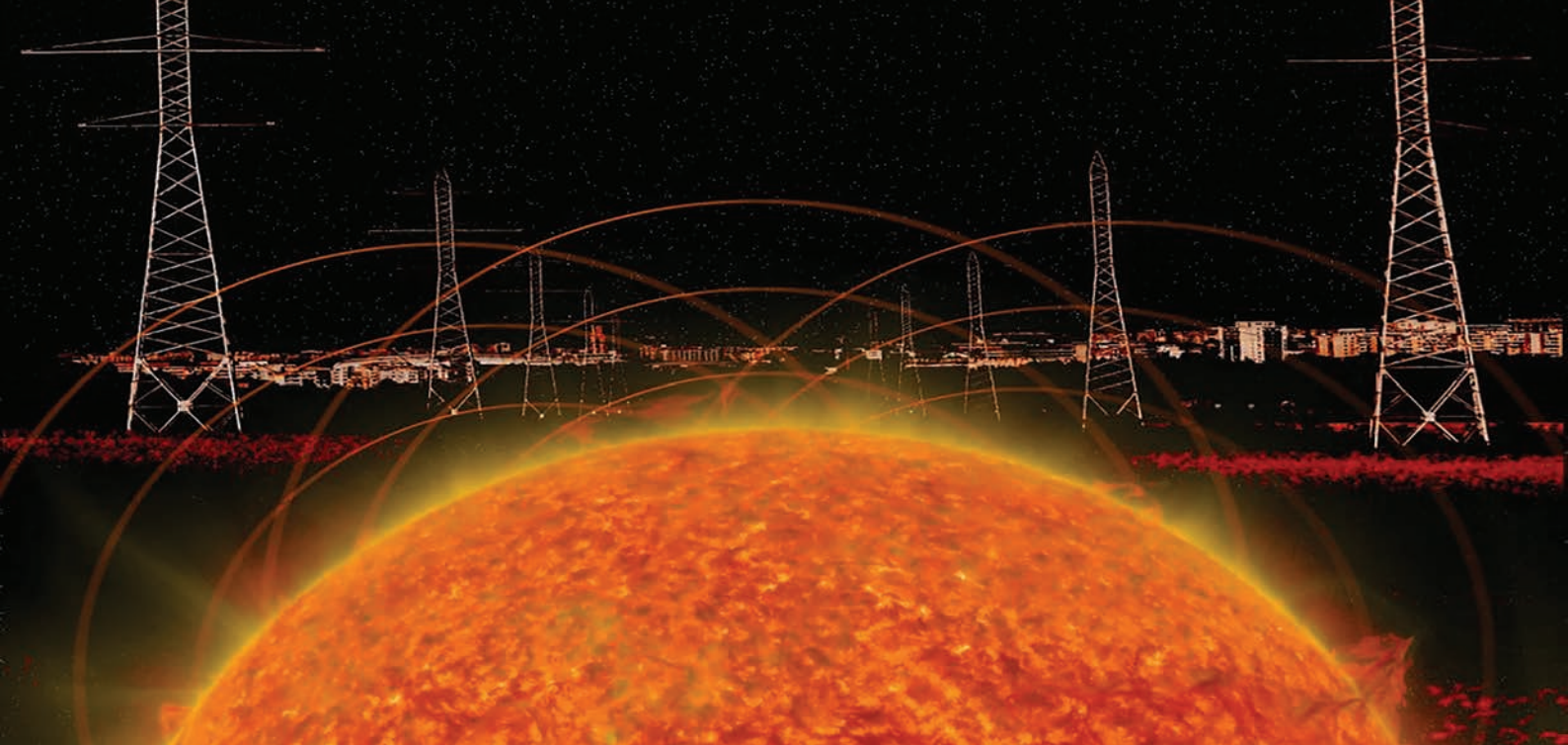
وی می افزاید: «در بحث های بهینه سازی مهم ترین چالش ها، کمبود منابع مالی است اما گروه مهم شرق با تکیه بر

طرح تا پایان آن، قیمت لامپ هر روز در حال افزایش است در حالی که تعرفه ی برق بر حسب ریال و همواره ثابت است و سازمان های متولی باید چاره ای برای این موضوع بیندیشند.

به گفته ی مهندس رحمتی نیا یکی از عواملی که می تواند به پیشرفت اجرای این طرح ها کمک کند، افزایش ضمانت اجرایی تصمیم های ساتبا و هماهنگی بیشتر بین نهادهای حاکمیتی است تا اگر ساتبا گواهی صرفه جویی مصرف صادر می کند از طرف دیگر سازمان ها پذیرفته شده باشد. آرایه گواهی ها در بورس انرژی به این صورت است که اگر مصرف کننده ای گواهی صرفه جویی را از خریدار دریافت کند اما نتواند آن را به موقع به انرژی الکتریکی تبدیل کند، معادل ارزش خاموشی آن را از سرمایه گذاری که گواهی را به او فروخته است دریافت می کند.

مشکل دیگری که این کارشناس گروه مهم شرق به آن اشاره دارد، انتظارات شرکت های توزیع نیروی برق از سرمایه گذار در نوسازی سیستم روشنایی است. در محاسبات فنی و اقتصادی تنها جایگزینی یک لامپ ال ای دی با یک لامپ پر مصرف ۳۰۰ یا ۴۰۰ وات توجیه پذیر است در حالی که شرکت های توزیع نیروی برق انتظار دارند حتی





مقاله علمی-مروری

مخاطرات شبکه‌های قدرت از طوفان ژئومغناطیسی ناشی از فعالیت‌های خورشید

■ سمیه تاران^{*}، استادیار دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، s.taran@znu.ac.ir

■ نسیمه علیپورراد، استادیار دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، alipourrad@znu.ac.ir

■ کورش رکنی، دانشجوی دکتری دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، rokni@znu.ac.ir

■ سید هادی حسینی، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، hhosseini@znu.ac.ir

■ امید شکوفا، استادیار پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، o.shekoofa@isrc.ac.ir

■ حسین صفری، استاد دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، safari@znu.ac.ir

^{*}نویسنده مسئول

چکیده

تداوم زندگی مدرن بشر امروزی به تأمین مطمئن انرژی الکتریکی وابسته است به طوری که هر وقفه در تأمین آن به سبب ایجاد اختلالات مختلف از جمله اختلال در شبکه‌های برق می‌تواند چنین زندگی را به خطر انداخته و آسیب‌های فراوان اقتصادی، اجتماعی و حتی جانی بر جای بگذارد. بررسی این پدیده‌های اختلالی الکتریکی پس از حادثه‌ای که در شمال کانادا در مارس ۱۹۸۹ رخ داد، مورد توجه ویژه قرار گرفت. بدین منظور تقاضا برای مطالعه دقیق آسیب‌پذیری شبکه قدرت و تجهیزات گران‌قیمت در برابر طوفان‌های مغناطیسی با آگاهی از اثرات منفی آن در سراسر دنیا گسترش یافته است. نتایج مطالعه‌های انجام گرفته در کشورهای مختلف حاکی از آن است که آسیب‌پذیری شبکه قدرت در برابر طوفان‌های ژئومغناطیسی (بیشتر با منشأ خورشیدی) علاوه بر تغییرات زمانی مؤلفه افقی میدان ژئومغناطیسی به ساختار شبکه قدرت و مقاومت الکتریکی زمین نیز بستگی مستقیم دارد. قابل ذکر است، مطالعات کمی و کیفی در سال‌های اخیر نشان داد که عرض‌های جغرافیایی بالا (کانادا، روسیه، سوئد و غیره) در نزدیکی قطبین زمین و عرض‌های میانی (ژاپن، چین، برزیل و غیره) تحت تأثیر طوفان‌های ژئومغناطیسی قرار دارند. در اینجا موارد مهم ثبت شده از اختلالات ژئومغناطیسی میدان مغناطیسی با منشأ خورشیدی و تأثیرهای آن بر زیرساخت شبکه‌های برق قدرت آورده شده است. همچنین به برخی از راهکارهای کاهش خسارت در زیرساخت شبکه قدرت پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: اختلالات ژئومغناطیسی، جریان القایی ژئومغناطیسی، شبکه قدرت

Large Power Grid Hazards From Geomagnetic Storms Caused by Solar Activity

■ Somayeh Taran^{*}, Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

■ Nasibe Alipourrad, Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

■ Kourosh Rokni : Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

■ S.Hadi Hosseini, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

■ Omid Shekoofa, Satellite Research Institute, Tehran, Iran

■ Hossein Safari, Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

^{*}Corresponding Author

Abstrat

The survival of modern human life today depends on energy security, any interruption, e.g., by solar sources that

cause various disruptions in the power grids. Special attention has been widely paid to studying the electrical disturbances following the March 1989 event in northern Canada. For this purpose, various countries started several studies to take the necessary measures to reduce the damage caused by geomagnetic storms in the power network. We carefully know that solar activity was considered the principal source of geomagnetic storms. Coronal mass ejections- the huge bubbles of hot plasma and magnetic fields with a speed of about 200 to 1000 kilometers per hour and solar flares are the most important causes of a geomagnetic storm. If they occur toward the Earth simultaneously, they can affect Earth's magnetic field and cause significant disturbances in the power grids. The solar activity has 11-year periods, but it is not entirely possible to predict the occurring time of solar events. Temporal variations of these currents cause a geoelectric field and low-frequency quasi-static geomagnetically induced currents (GIC) in power grid equipment. Studies in different geographical locations show that the magnitude of geomagnetic induction current (GIC) is directly related to the temporal changes of the disturbing magnetic field and especially to its horizontal component.

Transformers are one of the most effective equipment in a geomagnetic disturbance. In high latitudes, damages to power transformers have been reported in which geomagnetic changes during hurricane times have been very rapid and large (greater than 1000 nT), and hence GICs as large as or greater than 100 amps flow at the end of the storm in the winding. Usually, the geomagnetic disturbances are not strong at low latitudes, so much smaller GICs are reported there. However, the flow of GICs and their effects on power transformers are complex processes, and careful evaluation is required even in such low latitude regions. The strategies used against geomagnetic disturbances highly depend on geographical areas.

Countries that have already experienced the harmful effects of geomagnetic disturbances perform better in an event. Researchers in Russia, Japan, and Brazil proposed algorithms usable in all power grids and any geographical location. Testing the algorithms on the power grids in the mentioned countries confirmed that the magnitude of GICs and their possible harmful effects also depend on the power network topology, resistors, and other engineering details of the power system.

This article reviewed the impressive factors causing geomagnetic disturbances via solar activity and their effects on the power grids. In the logical next step, we will focus on finding the possible hazards in the Iranian bulk power network as linked with several neighboring countries by analyzing the related data.

Keywords: Geomagnetic disturbances, Geomagnetic induced current, Power grid

۱- مقدمه

بیشتر طوفان‌های بزرگ خورشیدی در زمان بیشینه فعالیت خورشیدی و با فاصله‌ی زمانی حدود ۱۱ سال رخ می‌دهند. برای ما ساکنان زمین، تغییرات آب‌وهوای فضایی می‌تواند از زیبایی شفق قطبی گرفته تا تأثیر مخرب احتمالی طوفان‌های خورشیدی بر زیرساخت‌های زندگی بشر، جذاب و زیبا و یا پرخطر باشد. در زمان وقوع طوفان مغناطیسی خورشیدی، خورشید جریان‌هایی بسیار قوی از انرژی مغناطیسی را به فضا پرتاب می‌کند. این جریان‌ها قادر هستند با سامانه‌های پیشرفته فضایی و زمینی تداخل کرده و بسیاری از خدمات حیاتی را که جامعه امروز به آن‌ها متکی است، مختل کنند. در واقع ذرات پرانرژی و تشعشعات پرتاب‌شده از خورشید، پس از رسیدن به زمین می‌توانند باعث بروز نوسانات موقت در میدان ژئومغناطیسی شوند که این تغییرات اختلالات ژئومغناطیسی نامیده می‌شوند [۱]. نوسانات گذرا با شدت کافی را نیز طوفان‌های ژئومغناطیسی می‌نامند. بعد از شناسایی آثار مخرب نخستین طوفان‌های ژئومغناطیسی در سامانه‌های حیاتی بشر، تامپسون و همکاران ۱۹۹۷ پیشنهاد کردند برای جلوگیری از آسیب‌های اختلالات ژئومغناطیسی، آستانه خطر برای کشورها و موقعیت‌های جغرافیایی متفاوت تعیین شود که بعد کشورها مختلف به‌طور جداگانه تصمیم به این کار گرفتند و هم‌اکنون هیچ مرکز بین‌المللی مسئولیت مطالعه اختلالات و روش‌های مقابله با آن را برای هیچ کشوری بر عهده ندارد. طوفان‌های ژئومغناطیسی

با توجه به شدت تأثیرگذاری در انواع تجهیزات، در سایت نوا (NOAA) طبقه‌بندی شده‌اند که تحلیل داده‌های حاصل از این طوفان‌ها در هر منطقه جغرافیایی به‌صورت موضعی و توسط ساکنان همان منطقه انجام می‌شود. اگر قطب ژئومغناطیسی با سرعت و جهت فعلی به حرکت خود ادامه دهد سال ۲۰۵۰ به روسیه و عرض‌های میانی زمین خواهد رسید [۲] که در آینده نزدیک احتمال تأثیرپذیری کشورهایی همانند ایران که در حال توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و شبکه قدرت هستند را در برابر خطرات ناشی از طوفان‌های ژئومغناطیسی بسیار افزایش خواهد داد، در نتیجه این باور که تأثیرات طوفان‌های ژئومغناطیسی در عرض‌های میانی زمین از جمله ایران اهمیتی ندارند، بسیار نادرست است و چه بسیار اختلالات ژئومغناطیسی که در عرض‌های میانی به ثبت رسیده‌اند [۳ و ۴ و ۵ و ۶]. آسیب‌های متعدد ناشی از اختلالات ژئومغناطیسی قوی در تجهیزات سیستم برق قدرت می‌تواند باعث خاموشی در مقیاس‌های بزرگ و طولانی مدت شود. توسعه مداوم شبکه‌های ولتاژ بسیار بالا از یک‌سو و قدیمی شدن تجهیزات شبکه قدرت از سوی دیگر منجر به گسترش مناطق پرخطر خواهد شد. بدین منظور تقاضا برای مطالعه دقیق آسیب‌پذیری شبکه قدرت در برابر طوفان‌های مغناطیسی قوی با آگاهی گسترده‌تر از اثرات منفی آن در سراسر دنیا گسترش یافته است. در این پژوهش، ابتدا پیش‌زمینه‌ای در مورد عوامل مؤثر در ایجاد اختلال‌های ژئومغناطیسی و سپس مواردی از تأثیر این

طوفان‌ها بر شبکه قدرت و همچنین مروری بر برخی راهکارهای مؤثر پیشنهاد شده برای جلوگیری از خطرهای احتمالی بر روی شبکه قدرت ایران نیز ارائه خواهد شد.

۲- اختلال‌های ژئومغناطیسی

اختلال‌های ژئومغناطیسی (GMD) به دلیل طوفان‌های ژئومغناطیسی روی می‌دهند که در بیشتر مواقع توسط جریان‌های پلاسما خورشیدی با چگالی یا سرعت زیاد به محیط اطراف زمین می‌رسند. در صورتی که میدان مغناطیسی شاره‌ی خارج شده از خورشید مؤلفه‌ی موازی مؤثری با میدان دوقطبی کره‌ی زمین داشته باشد، انرژی موجود در بادهای خورشیدی به مغناطوسفری زمین تزریق خواهد شد. خطرناک‌ترین حالت در صورتی است که جهت میدان شاره در خلاف جهت میدان دوقطبی زمین (روبه جنوب) باشد که سبب از هم گسیختن خطوط میدان اطراف زمین خواهد شد و در غیر این صورت خطوط میدان موجود در مغناطوسفر با یک موج فشاری از طرف این شاره روبه‌رو می‌شوند. در هر دو حالت بیان شده به علت افزایش میدان الکتریکی موجود در مغناطوسفر، حرکات پلاسما در این بخش از جو زمین افزایش یافته و در ادامه با افزایش شدت جریان الکتریکی در مغناطوسفر و یون کره مواجه خواهیم بود [۷]. مطالعه‌ی طوفان‌های ژئومغناطیسی از دو جنبه اهمیت فراوان دارد. نخست این که طوفان ژئومغناطیسی بخش اصلی مطالعات ژئوفیزیکی است و دیگری اهمیت تأثیر عملی آن بر زندگی بشر است. دانشمندان در ابتدا طوفان‌ها را با فرض ساختار بسیار ساده مطالعه می‌کردند. با پیشرفت ابزارهای رصدی و شناخت فیزیک مغناطوسفر، مطالعات به شکل عمیق‌تری ادامه یافت. هر اختلال ژئومغناطیسی منحصر به فرد است و علم ژئوفیزیک جدید نمی‌تواند به‌طور دقیق ویژگی‌های مورفولوژیکی اختلال‌های مختلف را توصیف کند [۸].

۳- منشأ طوفان‌های خورشیدی

پرتاب‌های جرم تاجی (CME) یکی از منابع اصلی طوفان‌های ژئومغناطیسی است. یک رویداد بزرگ مقیاس جرم تاجی ممکن است حاوی یک میلیارد تن ماده و سرعتی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر در ساعت باشد که قادر است تا چند میلیون کیلومتر در ساعت نیز افزایش یابد. شراره‌های خورشیدی نمونه‌ی دیگری از منشأ طوفان‌های مغناطیسی هستند که در تابش‌های پرتوی ایکس و دیگر طیف‌های الکترومغناطیسی دیده می‌شوند. اگر پرتاب‌های جرم تاجی و شراره‌ها هم‌زمان اتفاق افتاده و در راستای زمین قرار بگیرند به دلیل سرعت بالا می‌توانند کمتر از ۲ ساعت به زمین برسند. چرخه‌های فعالیت‌های خورشیدی با دوره‌های ۱۱ ساله اتفاق می‌افتند که زمان شروع و پایان این دوره‌ها قابل پیش‌بینی است ولی میزان فعالیت در هر دوره می‌تواند متفاوت باشد. در زمان بیشینه فعالیت‌های خورشیدی به‌طور متوسط رویدادهای بزرگ مقیاس خورشیدی که می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ارتباطات داشته باشند، به صورت هفتگی رخ می‌دهند [۹].

۴- جریان‌های القایی ژئومغناطیسی

جریان القایی ژئومغناطیسی (GIC) رویدادی است که در اثر تعامل بین آب‌وهوای فضایی و میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌شود. یک طوفان ژئومغناطیسی قوی که در مغناطوسفر زمین نفوذ کرده، می‌تواند منجر به یک جریان بالای الکترومغناطی (حرکت جریان

ذرات باردار در بخش پایینی یون کره) با چندین میلیون آمپر در یون کره شود. این جریان با زمان تغییر کرده و سبب القای یک میدان ژئوالکتریکی می‌شود. در واقع با توجه به تفاوت‌های ولتاژ محلی ناشی از الکترومغناطیسم در سطح زمین، ممکن است یک جریان شبه مستقیم (DC) -جریانی با فرکانس بسیار پایین- در امتداد خطوط انتقال جریان داشته باشد و از طریق نقاط زمین خنثی ترانسفورماتور وارد و خارج شبکه شود. GIC ارتباط نزدیکی با مشتق زمانی میدان مغناطیسی (dB/dt) و به‌ویژه مؤلفه افقی آن دارد. گرچه برخی تحقیقات دیگر نیز نشان می‌دهند تغییرات زمانی مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی نیز می‌تواند در تولید GIC نقش بسزایی داشته باشد [۱۰ و ۱۱]. طی تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۱ در نروژ و منطقه فنواسکاندیا صورت گرفت اعلام شد که تغییرات زمانی مؤلفه افقی با تغییر فصل نیز متفاوت خواهد بود. بزرگ‌ترین مقادیر در فصل‌های بهار و پاییز و کمترین آن در تابستان و زمستان روی می‌دهد (بردار مؤلفه افقی میدان ژئومغناطیسی است). رسانایی زمین در مکان خطوط انتقال نیز تأثیر بسزایی در میزان جریان GIC خواهد گذاشت. دامنه سیگنال‌های GIC تابعی از رسانایی الکتریکی سطح زیرین زمین است. بنابراین ساختارهای مقاوم‌تری باید تا عمق چند ده یا چند صد کیلومتری زیر ناحیه شبکه قدرت انتخاب شده برای مطالعات GIC بررسی شوند. در حالت کلی در عرض‌های بالا مقدار GIC در خطوط انتقال رو به شرق بیشتر است و در عرض‌های میانی مؤلفه رو به شمال میدان ژئوالکتریکی بزرگ‌تر از مؤلفه رو به شرق است. کاپمن در سال ۲۰۰۵ اعلام کرد شرایط ژئومغناطیسی آشفته پایدار در عرض‌های جغرافیایی پایین و استوایی به احتمال زیاد با تشدید جریان حلقه که به‌عنوان منبع GICها در مناطقی با عرض جغرافیایی میانی امریکای شمالی عمل می‌کند، ارتباط دارد. تعیین دقیق جهت میدان ژئوالکتریکی در هر ناحیه نیازمند داده‌های مغناطیسی در آن بخش است [۱۲ و ۱۳].

۵- مروری بر مهم‌ترین جریان‌های القایی ژئومغناطیسی ثبت‌شده شبکه قدرت در اثر طوفان ژئومغناطیسی

توسعه دانش فعلی در مورد تأثیر جریان‌های القایی ژئومغناطیسی بر سامانه‌های برق قدرت بیشتر بر اساس تجزیه و تحلیل رویدادهای تاریخی ایجاد شده است. در این بخش برخی طوفان‌های ژئومغناطیسی ثبت شده در سامانه‌های برق قدرت کشورهای مختلف آورده شده است.

۵-۱- خاموشی شبکه قدرت هیدروکبک کانادا

از شناخته شده‌ترین رویدادها می‌توان به طوفان خورشیدی مارس ۱۹۸۹ اشاره نمود که منجر به خاموشی گسترده در کانادا شد. در صبح روز ۱۳ مارس ۱۹۸۹ دو سیستم جبران‌ساز توان راکتیو استاتیکی (SVC) به فاصله زمانی دو ثانیه در ایستگاه شیوکامو کبک کانادا به دلیل افزایش بار در خازن مربوطه از سرویس خارج شدند. با از دست دادن تنظیم ولتاژ در شبکه ۷۳۵ کیلوولتی، یک سری خطوط باز شدند و در عرض ۱ دقیقه، مجتمع هیدروالکتریک لا گراند در شمال کانادا از مراکز بار در جنوب قطع شد. این سری از رویدادها بیش‌تر از موارد احتمالی پیش‌بینی شده‌ای بودند که سیستم برای مقابله با آن‌ها و بدون از دست دادن بار طراحی شده بود. این سیستم به‌طور ناگهانی حدود ۵/۹ گیگاوات تولید خود را از دست داد که حدود نصف کل توان سیستم در آن زمان در اوایل صبح بود. افت فرکانس به حدی شدید شد که

عوامل مختلف کاهش بار که در سراسر سیستم توزیع شده بودند، برای بازگرداندن تعادل بین بار موجود و ظرفیت تولید باقی مانده، شروع به قطع بار کردند. با این حال، تنظیمات رله نتوانستند تغییر پله‌ای توان و نیز تغییر فرکانس ناشی از آن را کنترل کرده و کل سیستم به توان صفر رسید. تنها ۷۵ ثانیه پس از فروپاشی نخستین خازن، بیشتر استان بدون برق ماند [۱۴]. علت این رویداد یک سری انفجارهای عظیم با پرتاب جرم تاجی در منطقه‌ای از خورشید در بازه ۶ تا ۱۲ مارس ۱۹۸۹ بود [۱۵].

۵-۲- خاموشی‌های طوفان هالوین ۲۰۰۳

در سال ۲۰۰۳ مجموعه‌ای از طوفان‌های خورشیدی بزرگ بر فراز سطح خورشید روی دادند. در این رویدادها یکی از بزرگ‌ترین و قوی‌ترین شراره‌های خورشیدی کلاس X و نیز وقوع تعدادی شراره پس از آن نشان از شدت بالای طوفان‌های اتفاق افتاده بود. بیشترین میزان تغییرات مؤلفه افقی میدان مغناطیسی نسبت به روز آرام حدود ۳۸۳- نانو تسلا ثبت شد. در زمان اوج طوفان و میدان ژئوالکتریکی در منطقه مالمو به مقادیر ۲ ولت بر کیلومتر و جریان ژئوالکتریکی در ژاپن ۱۳۰ آمپر اندازه‌گیری شد. این طوفان خرابی‌های گسترده‌ای در سامانه‌های مختلف فناوری با خود به همراه داشت. در سوئد در ۳۰ اکتبر ساعت ۲۱:۰۷ خاموشی در حدود ۲۰ تا ۵۰ دقیقه رخ داد و این خاموشی نزدیک به ۵۰۰۰ نفر را در مناطق مالمو و نواحی اطراف، تحت تأثیر قرار داد. علت اصلی عملکرد یک رله در سیستم ۱۳۰ کیلوولت بود. همچنین گزارش شده که همین طوفان خورشیدی خسارت‌های قابل توجهی را به ترانسفورماتورها در آفریقای جنوبی وارد کرده است [۱۶].

۵-۳- خرابی‌های ثبت شده در لهستان

ارتباط بین خرابی عناصر زیرساخت انرژی در لهستان و حوادث ژئومغناطیسی با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. در یک بررسی آماری در جنوب لهستان، داده‌های خرابی‌ها با دلایل نامشخص و خرابی دستگاه‌های الکترونیکی که در دوره‌های افزایش فعالیت ژئومغناطیسی رخ داده است، تجزیه و تحلیل شده‌اند. نزدیک به ۴۶۲۵ خرابی در ۲۰۱۰ و ۱۰۵۶۵ خرابی در هفت ماه از ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که علت اصلی اختلال‌های شبکه‌ی برق قدرت ناشی از طوفان‌های خورشیدی است و متوسط خرابی‌ها یک روز بعد از پرتاب‌های جرم تاجی سریع رخ داده است. همچنین آن‌ها نشان دادند که خرابی‌ها در هفت ماه اول ۲۰۱۴ که نزدیک به بیشینه فعالیت‌های خورشیدی است بیش از دو برابر سال ۲۰۱۰ بوده است [۱۷].

۵-۴- جریان ژئوالکتریکی در شبکه قدرت ژاپن

در شبکه قدرت ژاپن، در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۵ و مارس ۲۰۰۸ به‌عنوان بخشی از همکاری نزدیک بین موسسه ملی فناوری اطلاعات و ارتباطات (NICT)، شرکت برق هوکایدو، آزمایشگاه محیط زیست خورشیدی-زمینی (STEL) و دانشگاه ناگويا، مقدار جریان GIC در شبکه قدرت اندازه‌گیری شد. در این پژوهش با استفاده از یک آمپر متر انبری، جریان الکتریکی یک نقطه خنثی زمین شده در یک ترانسفورماتور در پست ممانبتسو در شرکت برق هوکایدو در بازه زمانی مورد نظر اندازه‌گیری شد. این ترانسفورماتور یک ترانسفورماتور سه فاز معمولی است و به خط ۱۸۷ کیلوولت نیروگاه آشورو متصل می‌شود. هر دو انتهای خط به زمین متصل هستند و پست ممانبتسو نقطه پایانی این خط بوده و هیچ شاخه‌ای بین این دو پایانه وجود ندارد. این خط به طول

حدود ۱۰۰ کیلومتر و در جهت جنوب غربی (حدود ۴۰ درجه از راستای شمال-جنوب به سمت غرب) قرار دارد. بیشترین مقدار GIC اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی یک ثانیه، حدود ۳/۸۵ آمپر در زمان فاز اصلی طوفان اندازه‌گیری شده است. مشخص شد با اینکه GIC‌های شدید بیشتر در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی رخ می‌دهند، GIC‌های مرتبط با طوفان‌های فرعی را نیز می‌توان در ژاپن حتی در کمینه خورشیدی شناسایی کرد. تغییرات زمانی GIC به‌جای مشتقات زمانی میدان ژئومغناطیسی، همبستگی بالایی با تغییرات میدان ژئومغناطیسی نشان دادند [۱۸].

۵-۵- نمونه جریان‌های GIC مشاهده شده در چین

با وجود این که چین کشوری با عرض جغرافیایی متوسط است، جریان‌های بزرگی در ترانسفورماتورهای خنثی بارها در سیستم برق فشارقوی چین در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی ایجاد شده است. شبکه قدرت ۷۵۰ کیلوولت شمال غرب چین دارای خطوط انتقال طولانی با مقاومت‌های کوچک است که آن را مستعد GIC بزرگ در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی می‌کند. نمونه‌ای از داده‌های GIC و مؤلفه افقی میدان ژئومغناطیسی و تغییرات زمانی این مؤلفه در شبکه قدرت چین برای (الف) ۷ و ۸ نوامبر و (ب) ۹ و ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ در شکل (۱) نشان داده شده است. زمان وقوع بیشینه جریان با نرخ تغییرات میدان ژئومغناطیسی مطابقت دارد. همچنین در آن زمان هیچ جریان مستقیم ولتاژ بالایی گزارش نشده است و بیانگر این است که این جریان‌ها به‌درستی GIC بوده که توسط طوفان‌های ژئومغناطیسی القا می‌شوند. لیو و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که برخی موقعیت‌ها در چین به‌شدت به طوفان‌های ژئومغناطیسی حساس هستند و دامنه‌ی جریان‌های GIC می‌تواند به بیشتر از A30 در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی قوی برسد. همچنین آن‌ها به این مهم متذکر هستند که GIC نه تنها یک مشکل عرض جغرافیایی بالا است، بلکه شبکه‌ها در عرض‌های جغرافیایی متوسط و پایین را نیز می‌توانند تحت تأثیر قرار دهد [۱۹].

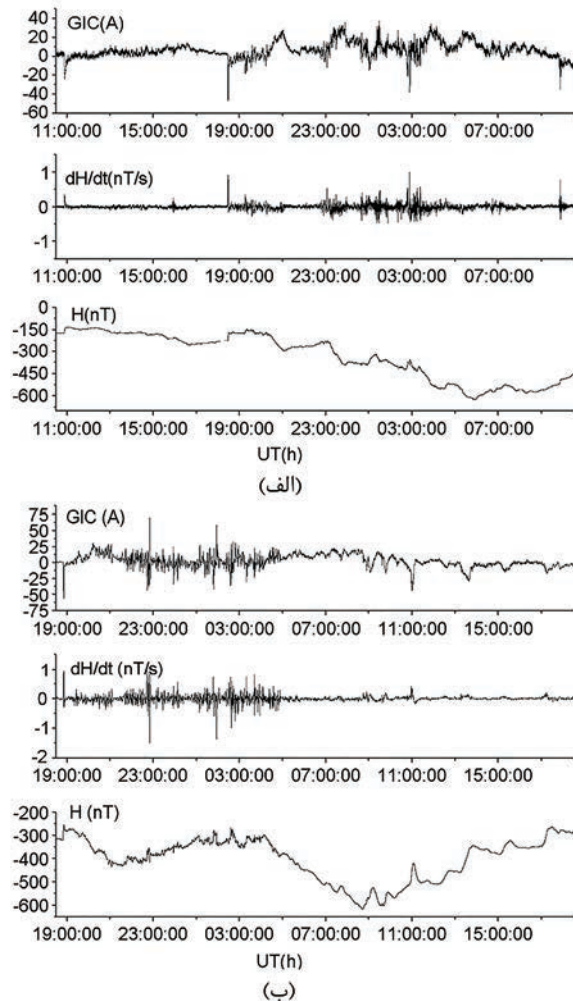
۵-۶- محاسبه جریان القایی ژئومغناطیسی در شبکه قدرت برزیل

در طی یک طوفان ژئومغناطیسی بزرگ، که در ۷ تا ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ روی داد، بر اساس تغییرات ژئومغناطیسی در خطوط انتقال برق ۵۰۰ کیلوولت در منطقه جنوبی برزیل جریانی ژئومغناطیسی با دامنه ۱۵ آمپر اندازه‌گیری شد. مکان‌های اندازه‌گیری GIC از قبل با کمک کارکنان مهندسی شرکت برق قدرت برزیل، فورناس به دقت انتخاب شده بودند. دو خط انتقال در ایتومبیرا-سیمائو سائو و پیمنتا-باريرو که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند، تقریباً در راستای شرق-غرب میدان ژئومغناطیسی قرار داشتند، مکان جغرافیایی دو خط انتقال در شکل (۲) نشان داده شده است. چنین انتخابی با استناد بر اینکه از نظر آماری، میدان‌های ژئوالکتریکی شرق-غرب تا حدودی بزرگ‌تر از میدان‌های شمالی-جنوبی هستند و بنابراین GIC‌های بزرگ‌تری در خطوط انتقال شرق-غرب تولید می‌کنند، انجام گرفته است. برای به‌دست آوردن مقادیر GIC بزرگ‌تر، خطوط انتقال انتخاب شده باید از روی مناطق دارای لایه‌های بسیار مقاوم در پوسته و گوشته بالایی زمین عبور کنند که منجر به میدان‌های ژئوالکتریکی افقی بزرگ‌تر می‌شود. طول کل خطوط انتخاب شده بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر بوده است. اندازه‌گیری تغییرات میدان ژئومغناطیسی تحت دو خط انتقال انتخاب شده در آگوست ۲۰۰۴ با نصب مغناطیس‌سنج‌های سه‌جزئی فلاکس گیت آغاز شد. خطوط انتخاب شده در منطقه

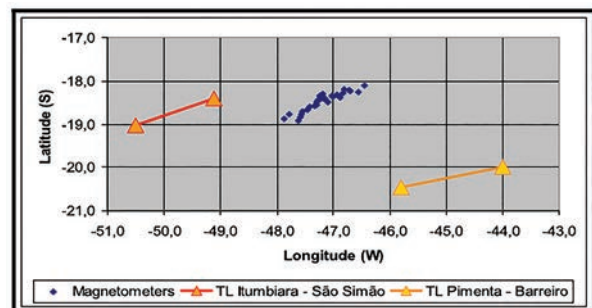
پیوسته اندازه‌گیری شد. مغناطیس‌سنج‌ها به‌طور مستقیم در زیر خطوط انتقال نیرو که چندین صد کیلوولت را با جریان‌های بالای صدها و هزاران آمپر حمل می‌کنند، قرار گرفته و داده‌ها را با اختلاف زمانی یک دقیقه ثبت نمودند. داده‌های میدان ژئومغناطیسی افقی به‌دست آمده با داده‌های هم‌زمان در ایستگاه مرجع مقایسه شدند. میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در خطوط مورد نظر مجموع تغییرات ژئومغناطیسی طبیعی و میدان مغناطیسی تولید شده توسط یک GIC است که در خط انتقال جریان دارد. با کم کردن تغییرات میدان ژئومغناطیسی ثبت شده در ایستگاه مرجع از تغییرات ثبت شده در خطوط انتقال، تغییرات مغناطیسی مربوط به GIC به‌دست می‌آید. مقدار GIC با استفاده از قانون بیوساوا محاسبه شد. در بازه زمانی ۷ تا ۱۱ نوامبر ۲۰۰۴ یک طوفان ژئومغناطیسی بزرگ در سیستم اندازه‌گیری راه‌اندازی شده ثبت شد. تغییرات شدت افقی میدان ژئومغناطیسی $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ محاسبه شده از مؤلفه‌های X و Y که توسط مغناطیس‌سنج در زیر خطوط ارتباطی در پیمنتا-باریرو و ایتومبیرا-سیمائو ساو و در ایستگاه مرجع نصب شده‌اند و نیز GIC محاسبه شده در این مکان‌ها و همچنین dH/dt در ایستگاه مرجع به ازای هر دو ایستگاه به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که به نظر می‌رسد مقادیر واضح قابل مشاهده فقط در دوره‌های طوفان‌های ژئومغناطیسی ظاهر می‌شوند. در این پژوهش نشان داده شد که GIC در عرض‌های جغرافیایی پایین نیز رخ می‌دهد که مقدار آن در بخش مطالعاتی برزیل و در محدوده ۱۸ تا ۲۱ درجه جنوبی و در زمان اوج یک طوفان ژئومغناطیسی حدود ۱۵ تا ۲۰ آمپر اندازه‌گیری شد. از آنجایی که دامنه‌های GIC بسیار بیشتر به مشتق زمانی میدان ژئومغناطیسی و مقاومت پوسته و گوشته بالایی زمین مرتبط است نمی‌توان با قطعیت گفت که مناطق عرض جغرافیایی و پایین مانند برزیل، تحت تأثیر GIC قرار نخواهد گرفت.

۶- راهکارهای ارائه‌شده در جهت مقابله با اثرات ناشی از رخدادهای اقلیم فضا در شبکه تولید و انتقال برق

به‌دلیل اشباع ترانسفورماتور و اثرات ناشی از آن، جریان‌های GIC هم از نظر قابلیت اطمینان و هم از نظر هزینه تأثیر منفی بر شبکه می‌گذارند. از آنجایی که GIC ها می‌توانند به تجهیزات آسیب رسانده، باعث عملکرد نادرست حفاظت شده و موجب افت ولتاژ سیستم شوند، قابلیت اطمینان شبکه را در معرض خطر قرار می‌دهند. فناوری‌هایی وجود دارند که می‌توان با کمک آن‌ها اثرات ناشی از اختلالات ژئومغناطیسی بر شبکه قدرت را کاهش داد. استفاده از خازن‌های سری و رله‌های محافظتی دو راه‌کار کلی‌ای بوده‌اند که برای کاهش اثرات جریان القایی ژئومغناطیسی از طرف وزارت انرژی ایالات متحده آمریکا پیشنهاد شده‌اند. به‌منظور اعمال تصحیحات در ساختار ترانسفورماتورها، ابتدا سازوکار شارش جریان القایی ژئومغناطیسی در یک ترانسفورماتور به‌طور اختصار مورد بحث قرار می‌گیرد. از آنجایی که فرکانس GIC بین ۰.۰۰۰۱ هرتز تا ۰.۰۱ هرتز است، می‌توان آن را نسبت به فرکانس ۵۰ هرتز شبکه قدرت یک جریان شبه ایستا در نظر گرفت، نقطه خنثی زمین ترانسفورماتور و خط انتقال یک مسیر گردش را فراهم می‌کنند که GIC از این طریق وارد سیستم شده و در آن جریان می‌یابد. هنگام استفاده از ترانسفورماتور، یک شار مغناطیسی بایاس در هسته ایجاد می‌شود که به شار مغناطیسی اصلی اضافه



شکل ۱: داده‌های GIC، مؤلفه افقی و تغییرات زمانی مؤلفه افقی میدان مغناطیسی ثبت شده در نیروگاه هسته‌ای لینک آئو به همراه مؤلفه‌ی افقی میدان ژئومغناطیسی از رصدخانه ژائوکینگ در (الف) ۷-۸ و (ب) ۹-۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ [۱۹].



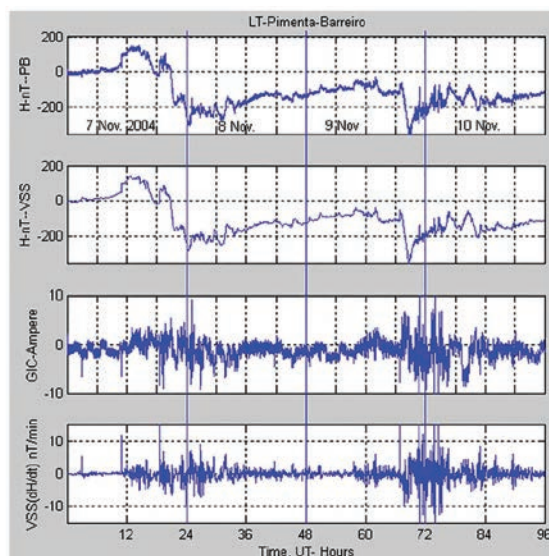
شکل ۲: موقعیت جغرافیایی مگنتومترها (آبی) و خطوط انتقال ایتومبیرا - سیمائو ساو (قرمز) و پیمنتا - باریرو (زرد) [۳].

غربی ایالت میناس، به ترتیب حدود ۷۰۰ و ۳۰۰ کیلومتر از رصدخانه مغناطیسی ریودوژانیرو (ایستگاه مرجع) برای بررسی فاصله دارند. این فواصل برای مناطقی در عرض‌های جغرافیایی پایین که تغییرات میدان ژئومغناطیسی به‌طور کلی یکنواخت است قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری GIC یک روش ساده و مستقیم انتخاب شد. تغییرات میدان ژئومغناطیسی افقی (X مؤلفه شمال جغرافیایی و Y مؤلفه شرق جغرافیایی است) با نصب مغناطیس‌سنج‌های فلاکسگیت به‌طور

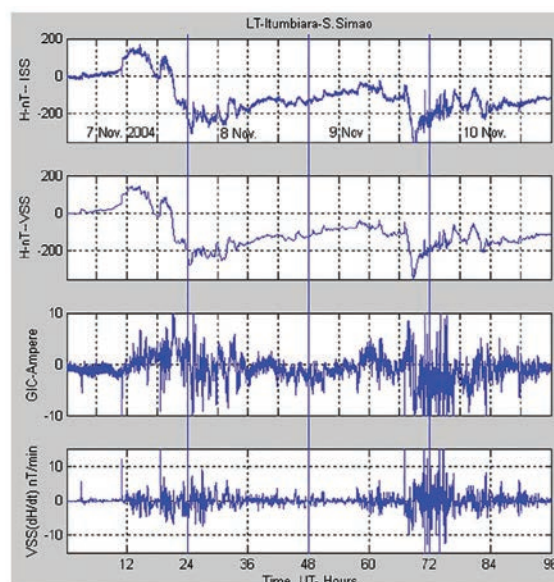
انتقال و دیگر ترانسفورماتورها به سمت نقطه خنثی زمینی و در نتیجه داخل زمین شارش می‌یابد [۲۰].

۱-۶- استفاده از طرح خاصی از ترانسفورماتور جهت کاهش اثرات جریان القایی ژئومغناطیسی

طراحی خاصی از ترانسفورماتورها می‌توانند سبب کاهش میزان خسارت‌های وارده شوند. ترانسفورماتورهای اشباع شده علت اصلی اختلاهای ناشی از جریان‌های القایی ژئومغناطیسی در سامانه‌های انتقال برق هستند که با توجه به حساسیت‌های مختلف ترانسفورماتورها، میزان اختلال‌های منتشر شده متفاوت خواهد بود. ترانسفورماتورهای افزایش‌دهنده نیروگاهی (GSU) و ترانسفورماتورهای کاهش‌دهنده انتقال به توزیع به‌طور معمول در سمت ولتاژ بالا یک سیم‌پیچ با اتصال ستاره زمین شده و در طرف ولتاژ کم با اتصال مثلث هستند که جریان القایی عبوری از سیم‌پیچ زمین شده ستاره می‌تواند سبب اشباع ترانسفورماتور شود. تقسیم جریان GIC در خطوط انتقال و زمین به سطح GIC در ترانسفورماتورها وابسته است که می‌تواند بر اشباع ناشی از اشباع نیز تأثیرگذار باشد. ترانسفورماتورهای با سیم‌پیچ مثلث از اشباع توسط GIC مصون هستند، زیرا سیم‌پیچ‌های مثلث نقطه اتصال به زمین نداشته و در نتیجه GIC نمی‌تواند با عبور از سیم‌پیچ‌ها سبب اشباع ترانسفورماتور شود. با این حال، بخش ولتاژ بالای این ترانسفورماتورها به‌طور عموم به‌صورت مثلث در انتقال استفاده نمی‌شوند. ترانسفورماتورهای سه فاز با طراحی خاص نسبت به سایر طرح‌ها و از آنجایی که برای رسیدن به اشباع نیازمند سطح بالایی از GIC هستند، کمتر مستعد اشباع هستند. شکل (۶) یک خط انتقال را نشان می‌دهد که در سمت چپ اتصال ستاره و در سمت راست اتصال مثلث دارد. از آنجایی که خط انتقال تنها در یک انتها به زمین متصل است، هیچ مسیری برای شارش جریان GIC وجود ندارد. بزرگ‌ترین مشکل با این رویکرد این است که اتوترانسفورماتورهای تک فاز به‌دلیل کارایی بالا و هزینه ساخت کم (با سیم‌پیچ مشترک) بهترین گزینه برای انتقال عمده در ولتاژهای بالا هستند. اتوترانسفورماتورها به‌طور معمول همیشه زمین خنثی هستند تا مشکلات اضافه ولتاژ را محدود کنند. بنابراین، نه تنها یک نقطه خنثی زمین شده برای شارش GIC فراهم می‌کنند، بلکه یک مسیر عبوری برای GIC برای جریان از خط انتقال سمت بالا به خط انتقال سمت پایین یا بالعکس فراهم می‌کنند. حتی اگر از اتوترانسفورماتورها استفاده نشوند، ساختار موجود برای اتصال همیشگی خط انتقال مطابق شکل (۶) شامل اتصال ستاره در یک بخش و اتصال مثلث در بخش دیگر است و قطع اتصال به زمین بر اساس ملاحظات سامانه امکان‌پذیر و با عملی نیست. به‌عنوان مثال، یک اتصال مثلث-ستاره یک تغییر فاز خاص را معرفی می‌کند و اتصالات ترانسفورماتور باید مطابق با طراحی استاندارد ایجاد شوند تا هم‌فازی بین ولتاژهای مختلف

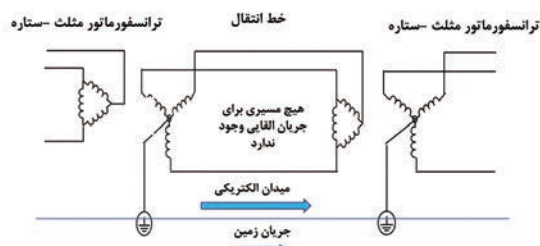


شکل ۳: تغییرات مؤلفه افقی میدان مغناطیسی H، تغییرات GIC محاسبه شده در طولان مغناطیسی در بازه زمانی ۷ تا ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ در زیر خط انتقال پیمنتا-باریرو و در ایستگاه مرجع و dH/dt در ایستگاه مرجع است [۳].

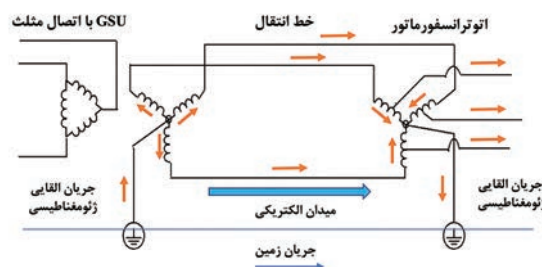


شکل ۴: تغییرات مؤلفه افقی میدان مغناطیسی H، تغییرات GIC محاسبه شده در طولان مغناطیسی در بازه زمانی ۷ تا ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ در زیر خط انتقال ایتومبیرا-سیمائو سائو و در ایستگاه مرجع و dH/dt در ایستگاه مرجع است [۳].

شده و باعث اشباع هسته ترانسفورماتور و اختلال در عملکرد عادی شبکه قدرت خواهد بود. سازوکار چرخش جریان القایی در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق شکل GIC از سمت چپ و نقطه خنثی زمینی ترانسفورماتور وارد سیستم شده و از طریق خط



شکل ۶: طرح‌واره‌ای که نشان می‌دهد استفاده از اتصال مثلث در انتهای ترانسفورماتور مانع عبور GIC می‌شود [۲۰].

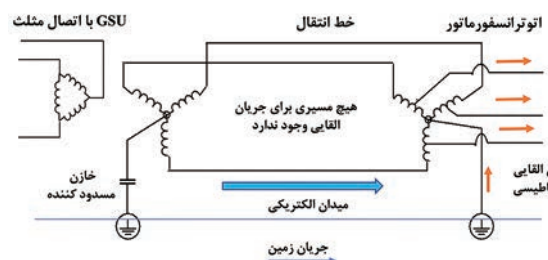


شکل ۵: مسیر گردش GIC در سامانه برق قدرت [۲۰].

سیستم (برای اتصالات متقابل) برقرار باشد [۲۰].

۲-۶- کاهش اثرات جریان القایی با خازن‌های سری

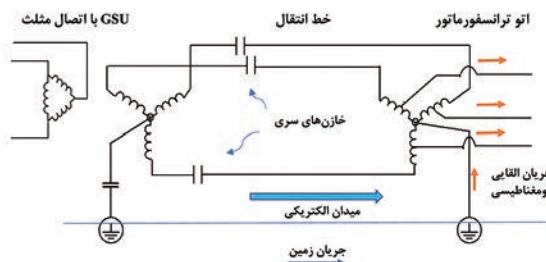
آشکارترین روش برای جلوگیری از ایجاد مشکل در ترانسفورماتورها در طول یک اختلال ژئومغناطیسی، سامانه‌های محدودکننده جریان القایی پیشرفته‌ای هستند که به‌صورت عملی در شبکه آزموده شده‌اند. این روش فناوری خازنی مسدودکننده جریان القایی ژئومغناطیس است که با استفاده از یک خازن برای مسدود کردن جریان القایی شبه ایستای دی‌سی کار می‌کند. علاوه بر جریان دی‌سی، جریان‌های شبه استاتیک و همچنین کم‌فرکانس نیز قادر به عبور از یک خازن نبوده و به‌طور مؤثری شارش این جریان‌ها را مسدود می‌کنند. این روش ممکن است به علت نیاز به تعویض چند باره هر خازن در طول یک سال مقرون به صرفه نباشد، در صورتی که استفاده از خازن‌های سری توان بیشتری را در خطوط انتقال جابه‌جا کرده و ممکن است استفاده از آن‌ها برای خدمات شهری حتی بدون در نظر گرفتن تأثیر احتمالی GIC مورد استقبال بیشتری قرار بگیرد. ولی مزیت اصلی این فناوری نیز نسبت به خازن‌های سری این است که فقط یک خازن مسدودکننده خنثی به جای سه خازن سری در هر ترانسفورماتور مورد نیاز است (یک خازن برای هر سه فاز جداگانه در خطوط انتقال). طرحی از نحوه اتصال یک خازن در بخش اتصال زمین در شکل (۷) آورده شده است. از ویژگی‌های الکتریکی خط انتقال توان هوایی یک سلف القایی سری و یک خازن شنت است که در طول آن توزیع شده‌اند. سلف القایی سری که با افزایش طول خط افزایش می‌یابد به‌طور چشم‌گیری قادر است مقدار توانی که می‌تواند در میان رسانا شارش پیدا کند را محدود نماید. در واقع از خازن‌های سری می‌توان برای بهبود قابلیت انتقال توان خطوط انتقال طولانی از طریق افزایش انتقال توان اکتیو با حفظ ثبات ولتاژ خط استفاده کرد. خازن‌های سری تلفات توان راکتیو که برای حفظ ولتاژ و همچنین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی خطوط انتقال لازم است را جبران می‌کنند [۲۰]. در واقع این امر شامل حذف یکی از دو اتصال زمین خنثی در دو انتهای خط انتقال است. با اعمال این گزینه‌ها GIC نمی‌تواند از ترانسفورماتور عبور کنند و مشکلات ناشی از اشباع نیم‌چرخه-مانند هماهنگ‌ها، گرمایش و مصرف VAR- حذف می‌شوند.



شکل ۷: برای مسدود کردن GIC، خازن مسدودکننده در اتصال زمین خنثی وارد شده است [۲۰].

با این‌که خازن‌های سری سبب مسدود شدن GIC در سیستم می‌شوند با این حال، باید در قرار دادن خازن‌های سری در سیستم انتقال قدرت الکتریکی دقت شود زیرا مسدود شدن GIC در یک قسمت از شبکه می‌تواند بر جریان GIC در بخش‌های دیگر سیستم انتقال قدرت تأثیرگذار باشد. بنابراین لازم است ابتدا تأثیر نصب خازن‌های سری در یک بخش بر سایر بخش‌های سیستم انتقال قدرت ارزیابی شود. شکل (۸) طرحی از نحوه قرارگیری

خازن‌های سری در سامانه را نشان می‌دهد. خازن‌های سری با مهندسی مناسب می‌توانند این القایی سری را جبران کرده و ظرفیت انتقال قدرت خط را افزایش دهند. با توجه به قیمت بالای خازن‌های سری تصمیم برای نصب این خازن‌ها زمانی گرفته می‌شود که مزیت قابلیت افزایش توان، هزینه صرف شده جهت انجام آن را جبران کند. نصب خازن‌ها نیازمند سازه‌های بزرگ، گران‌قیمت و عایق ولتاژ بالا هستند. برای خازن‌های سری، مسائل اصلی؛ امپدانس خط، امپدانس بار و پایداری سیستم (به دلیل رزونانس) می‌باشند.



شکل ۸: جبران سازی سری (خازن‌ها) مسیر CIG را قطع می‌کند [۲۰].

۳-۶- کاهش اثرات جریان القایی ژئومغناطیسی با رله‌های حفاظتی

یکی از روش‌های حفاظت از سیستم استفاده از رله‌های حفاظتی الکترومکانیکی با محافظ‌های مبتنی بر ریزپردازنده‌ها جهت نظارت بر سیستم در راستای کاهش پیامدهای ناشی از رفتار غیرمعارف است. وقتی خطایی در سیستم تشخیص داده می‌شود، اجزای معیوبی که شامل ترانسفورماتورها نیز هستند، از سیستم خارج می‌شوند. معیار خارج کردن یک ترانسفورماتور شامل تشخیص خطای داخلی است که امکان دارد طی افزایش سریع فشار گاز در مخزن ترانسفورماتور روی دهد. وقتی ترانسفورماتورها اشباع می‌شوند، جریان‌هایی با فرکانسی متفاوت از فرکانس اصلی (آلودگی هارمونیک) تولید می‌کنند که می‌تواند منجر به عملکرد نادرست یا نامطلوب رله‌های حفاظتی شده و در زمان پشتیبانی ولتاژ بحرانی سیستم به‌طور ناخواسته تجهیزات کلیدی را از سیستم جدا کند. در نتیجه ممکن است ایمنی کاهش یافته و با نزدیک کردن سیستم به نقطه فروپاشی ولتاژ، به‌طور بالقوه نیروی الکتریکی از دسترس خارج شود. با این وجود امروزه ترانسفورماتورها به‌علت پیش‌بینی خسارت‌هایی که ممکن است توسط آشکار شدن سطوح مختلفی از جریان‌های القایی ژئومغناطیسی روی دهند، از سیستم خارج نمی‌شوند. ولی اگر بتوان از امکانات قابل اعتمادی برای تشخیص و جداسازی ترانسفورماتورها در معرض خطر، قبل از ایجاد صدمه شدید از طریق GIC استفاده کرد، سناریوهای فاجعه‌بار طولانی مدت بهبود خواهند یافت. استفاده نکردن درست از رله‌های حفاظتی الکترومکانیکی، عامل اصلی خاموشی ناشی از اختلالات ژئومغناطیسی سال ۱۹۸۹ در هیدروکبک کانادا بود.

۴-۶- تصحیحات اعمال شده در راستای خرابی‌های شبکه قدرت هیدرو-کبک

پس از رویداد مارس ۱۹۸۹ شرکت هیدرو-کبک متعهد شد طی انجام یک سری بررسی‌ها، تعدادی تغییرات را اعمال کند. در تغییرات اعمال شده موارد زیر به‌طور ویژه مد نظر قرار گرفتند. • مشخص شد که SVC‌ها می‌توانند تأثیرات GIC را مدیریت کنند، اما تنظیمات اجازه محافظت را به آن‌ها نمی‌دهد. بنابراین

تنظیمات سیستم حفاظتی SVC تغییر کرد. اگر تنظیمات در زمان رویداد GIC در سطوح جدید بود، هیچ یک از SVCها خاموش نمی شد.

- دو SVC اضافه شد که تعداد کل SVCهای نصب شده در سیستم را به ۱۱ عدد رساند.
- مشخص شد که سیم پیچ های ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت بیش از حد انتظار در برابر جریان DC مقاوم بودند. آزمایش ها نشان داد که جریان DC ترانسفورماتورها را گرم می کند، اما آسیب پذیرترین قسمت مربوط به صفحه اتصال است. صفحه اتصال یک قطعه مکانیکی به نسبت ساده است که می تواند از مواد غیرمغناطیسی ساخته شود.
- طرحی برای مسدود کردن جریان DC در ترانسفورماتورها ی خنثی ایجاد و یک پایلوت نصب شد. با این حال، ممکن است نیاز به چنین طرحی نباشد، زیرا هیدروکبک خازن های جبرانی سری را در بیشتر خطوط طولانی در شبکه ۷۳۵ کیلوولتی نصب کرده است.

باید دقت داشت که تحقیقات انجام شده در هیدروکبک نشان داد که راستای شرق به غرب جهت مورد علاقه برای حرکت الکتروجت ها (جریان های عرض های جغرافیایی بالا ناشی از CME ها) است. بنابراین راستای شرق به غرب برای جهت گیری خطوط برق مطلوب نخواهد بود. خطوط شرق به غرب در لاگرانده خطوط کم ولتاژ و به نسبت کوتاه هستند. بر اساس این درک، هیدروکبک بیشتر خطوط طولانی تر را در راستای شمال به جنوب در شبکه قدرت ایجاد کرد.

دستورالعمل های زیر برای راه اندازی سیستم در طول یک رویداد CME ایجاد شده است:

- به جای تکیه بر انتقال قدرت بزرگ، تولید به طور یکنواخت پخش شود.
- اگر یک ژنراتور از بین رفت، ذخیره چرخشی برای پاسخ سریع افزایش یابد.
- تا حد امکان خطوط زیادی در شبکه به کار گرفته شود.
- کاهش جریان در خطوط انتقال به سطوح کمتر از ظرفیت نامی آن ها.
- تغییر وضعیت حفاظت SVC به «حالت هشدار» و عدم اجازه خاموشی.
- کاهش عملیات سوئیچینگ تا حد امکان.

در طی طوفان ژئومغناطیسی سال ۱۹۸۹ تجربه های زیر به دست آمدند:

- به محض شروع به کار سیستم حفاظتی، رویدادها به سرعت در شبکه منتشر می شوند.
- سامانه های حفاظتی برای محافظت از تجهیزات ساخته شده اند، اما عموماً برای مقابله با اختلالات بزرگ مفید نبوده اند.
- انتشار اختلالات می تواند ناشی از اقدامات سیستم حفاظتی باشد که می تواند درست در نظر گرفته شده باشد. به علت فعال بودن سیستم حفاظتی، هیچ خرابی ناشی از GIC وجود نداشت [۱۴].

۵-۶- تجزیه و تحلیل ۱۰۰ ساله خطر ژئوالکتریک برای شبکه قدرت فشارقوی ایالات متحده

بعد از رویداد مارس ۱۹۸۹ در کبک کانادا برای شبکه قدرت فشارقوی ایالات متحده آمریکا یک نقشه مخاطرات ژئوالکتریک در هر قرن تهیه می شود. بدین منظور طی یک برون یابی آماری از ۳۱ سال اندازه گیری میدان مغناطیسی که با شاخص های ژئومغناطیسی انجام شد، ۸۴ طوفان ژئومغناطیسی شناسایی شدند.

در راستای تهیه این نقشه داده های ۲۴ رصدخانه ژئومغناطیسی، ۱۰۷۹ سایت بررسی مگنتوتلوریک و ۱۷۲۵۸ خط انتقال برای انجام تجزیه و تحلیل خطر ژئوالکتریک با جامع ترین داده های در دسترس، مورد استفاده قرار گرفتند. هزاران خط انتقال فشار قوی در ایالات متحده یک ارتباط ستون فقراتی برای انتقال برق ایجاد می کنند که در اینجا مطالعه انجام شده به محاسبه ولتاژهای تنظیم شده در خطوط انتقال توسط میدان های ژئوالکتریک القایی محدود شده است. این ولتاژها با اتصال مستقیم خطوط انتقال به زمین در پست ها ایجاد می شوند. همراه با توپولوژی شبکه و وضعیت عملکرد شبکه، از این ولتاژها می توان برای تخمین مقدار جریان های القای ژئومغناطیسی استفاده کرد. در این مطالعه سری های زمانی میدان های ژئومغناطیسی و ژئوالکتریک و تفاوت های دقیقی که در هنگام مقایسه داده های واقعی با تجزیه و تحلیل های یک طرفه ایجاد شده بودند مورد بررسی قرار گرفتند. سپس همان روش ها برای همه ۱۰۷۹ ایستگاه مغناطیسی تلوریک در سراسر ایالات متحده به کار برده شد تا یک سری زمانی منحصربه فرد در هر مکان به ازای روش مطالعاتی SECS خاص تولید شود. برای هر سری زمانی، بیشینه بزرگی میدان ژئوالکتریک را در طول طوفان برای تجزیه و تحلیل بیشتر انتخاب کردند. توزیع جغرافیایی بردارهای ژئوالکتریک را می توان به هندسه شبکه انتقال برای محاسبه ولتاژ خطوط انتقال ترکیب کرد. با استفاده از روش دلونی میدان الکتریکی را در نقاط متعدد مشخص شده در امتداد خط انتقال (E_{line}) و با در نظر گرفتن وزن ها بر اساس فاصله از نقطه مورد نظر تا سه میدان الکتریکی اطراف سایت محاسبه کرده و سپس با انتگرال گیری از میدان الکتریکی در امتداد هندسه خط انتقال، ولتاژ در خط انتقال محاسبه می شود (معادله ۱)،

$$V_{line} = \int_G E_{line} \cdot dl \quad (1)$$

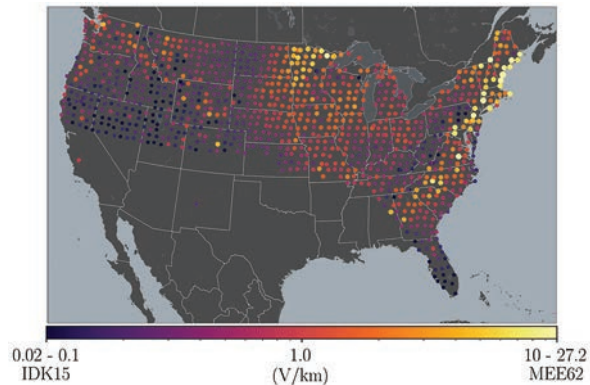
ولتاژ خط انتقال به دلیل ادغام میدان الکتریکی در طول کل مسیر پیچیده خط بین دو اتصال، به شدت به طول خطوط انتقال وابسته است. این به طور بالقوه می تواند خطر ناشی از میدان های ژئوالکتریک را پنهان کند. برای بهتر نشان دادن خطر مورد نظر، این ولتاژها را بر طول خط انتقال تقسیم می شود تا یک میدان الکتریکی متوسط برای هر خط انتقال به دست آید،

$$\bar{E}_{line}(t) = \frac{V_{line}}{L_{line}} \quad (2)$$

شکل (۹) مقادیر تخمینی میدان ژئوالکتریک را در ۱۰۷۹ سایت مگنتوتلوریک که در سراسر ایالات متحده پخش شده اند و امکان رویداد آن یک بار در یک قرن وجود دارد را نشان می دهد. تحقیقات منطقه ای نزدیک به رصدخانه های ژئومغناطیسی نشان می دهد که علم زمین شناسی تأثیر زیادی در تعیین خطرات ژئوالکتریک در مناطق کوچک ایفا می کند. بزرگ ترین میدان ژئوالکتریک تخمین زده شده که یک بار در هر قرن می تواند روی دهد، ۲/۲۷ ولت بر کیلومتر در سایتی واقع در مین (MEE62) و کم ترین میدان ژئوالکتریک تخمین زده شده ۰/۰۲ ولت بر کیلومتر در سایتی واقع در آیداهو (IDK15) است [۲۱].

۶-۶- ارائه الگوریتمی جهت تقویت شبکه قدرت در برابر خطرات طوفان های ژئومغناطیسی در روسیه

در پژوهشی که در روسیه در سال ۲۰۱۸ انجام گرفت، تجسم گرافیکی از آسیب پذیری شبکه قدرت یکپارچه در سیبری در برابر اختلالات ژئومغناطیسی شدید ارائه شد. در این راستا الگوریتمی ارائه شد تا بتوان میزان آسیب پذیری شبکه قدرت از طوفان های



شکل ۹: پیش‌بینی رویداد طوفان ژئومغناطیسی شدید یکبار در قرن از میدان ژئوالکتریک اندازه‌گیری شده در سایت‌های مگنوتلوریک در ایالات متحده آمریکا. مناطق با خطر بالا و کم در سراسر کشور وجود دارند که پیچیدگی ژئوالکتریک ایالات متحده را نشان می‌دهد [۲۱].

مورد یک مقدار منحصربه‌فرد دارد. از آنجایی که توپولوژی شبکه نقش مهمی در تعیین آسیب‌پذیری شبکه قدرت دارد، بنابراین، گام هفتم شامل بررسی مکان‌های تجهیزات بالقوه آسیب‌پذیر در شبکه است. اگر خطوط انتقال بیش از ۵۰ کیلومتر به گرهای بالقوه آسیب‌پذیر متصل شوند، باید تحقیقات بیشتری انجام شود. مرحله هشتم، بازرسی بیشتر از ویژگی‌های شبکه، جستجوی خطوط انتقال را که در آن دستگاه‌های جبران توان راکتیو نصب شده‌اند، پوشش می‌دهد. با این کار با به کمینه رساندن کسری توان راکتیو ناشی از اشباع ترانسفورماتور قدرت که از GIC ناشی می‌شود، به حفظ سطح ولتاژ در محدوده مجاز کمک خواهد شد. اثر دیگری که باید بررسی شود، خازن‌های سری نصب شده در خطوط انتقال هستند که از منظر GIC به صورت قطع مدار عمل می‌کنند. در مرحله آخر (مرحله ۹)، داده‌های مربوط به رسانایی زمین در منطقه خلاصه می‌شوند. شبکه‌های برق واقع در مناطق با پوسته مقاومت بالا دارای خطرات بالاتری هستند [۲].

۶-۷- شبیه‌سازی اختلالات ژئومغناطیسی ناشی از طوفان‌های مغناطیسی خورشید و پیش‌بینی تأثیر آنها در شبکه‌های قدرت

پژوهشی با عنوان همین بخش توسط صفری و همکاران و تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران ریاست جمهوری و با شماره طرح ۹۳۰۴۳۷۰۱ انجام شد. در این طرح طی محاسبات تحلیلی و عددی ابتدا پارامترهای یک باد خورشیدی دوشارهای سریع در نزدیکی جو زمین محاسبه شد [۲۱]. با در دست داشتن دما و شدت میدان مغناطیسی شاره خورشیدی در نزدیکی جو زمین و نیز شرایط آرام مغناطیسی جو زمین، برهم‌کنش جو زمین با باد خورشیدی ورودی در کد شبیه‌سازی پلوتو شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده اختلال ۲/۲ نانوتسلایی در میدان مغناطیسی زمین بود.

۷- نتایج

در توسعه و حفظ سامانه‌های برق ملی باید در نظر گرفت که طوفان‌های ژئومغناطیسی یک خطر واقعی برای توسعه و حفظ سامانه‌های تولید و انتقال برق در هر کشوری هستند و می‌توانند آسیب‌های اساسی را هم به شبکه قدرت و هم به سایر زیرساخت‌های حیاتی وارد کنند که در صورت عدم مدیریت صحیح، پیامدهای مخرب اقتصادی و اجتماعی شدید با خود به همراه خواهند داشت. بنابراین، تجزیه و تحلیل با استفاده از ابزارهای مختلف ریاضی و آماری و اینکه تا چه حد زیرساخت انرژی ایران تحت تأثیر نتایج آب و هوای فضایی قرار دارد، بسیار مهم است. شایان ذکر است که تحلیل سری زمانی بیشتر در مطالعات مسائل آب‌وهوای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رویدادهای ثبت شده در مناطق مختلف جغرافیایی نشان داد که مقدار GIC تولید شده در شبکه‌های برق قدرت بیشتر از آن‌که تابع میزان تغییرات اندازه میدان ژئومغناطیسی باشد به تغییرات زمانی این رویداد وابسته است. در مناطقی با عرض جغرافیایی بالا، آسیب‌هایی به ترانسفورماتورهای قدرت گزارش شده است که در آن تغییرات ژئومغناطیسی زمان طوفان بسیار سریع و بزرگ بوده است (بزرگتر از ۱۰۰۰ نانو تسلا) و از این‌رو GIC‌هایی به بزرگی و یا بیشتر از ۱۰۰ آمپر در پایان طوفان از سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت جریان می‌یابند. در کشورهای با عرض‌های جغرافیایی پایین همانند ژاپن (۲۰ تا ۴۵ درجه‌ی شمالی) نیز اختلالاتی در شبکه قدرت به ثبت رسیده است که گواهی بر عدم وابستگی محض GMD به موقعیت جغرافیایی است. کشورهای که پیش‌تر

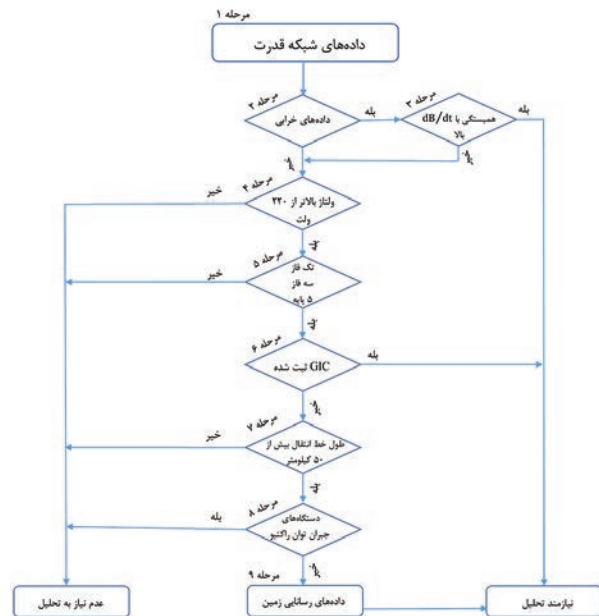
ژئومغناطیسی را تخمین بزنند. پارامترهای بحرانی که میزان مقاومت شبکه در برابر اختلالات ژئومغناطیسی را تعیین می‌کنند به چهار بخش اساسی تقسیم شدند:

- پارامترهای GMD: نوع GMD، رسانایی زمین و احتمال ظهور آثار GMD در شبکه
- پارامترهای شبکه قدرت: ساختار، سطح ولتاژ، وضعیت سیستم قدرت و موقعیت جغرافیایی
- پارامترهای تجهیزات سیستم برق قدرت: سطح ولتاژ، نوع تجهیزات، طرح ساخت و ویژگی‌های جداسازی
- آگاهی: آگاهی اجتماعی و پیش‌بینی

مراحل الگوریتم ارائه شده برای ارزیابی اولیه آسیب‌پذیری شبکه قدرت در برابر GMD در شکل (۱۰) آورده شده است. در مرحله اول، باید داده‌های مربوط به شبکه قدرت جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شوند. این داده‌ها اطلاعاتی در مورد تجهیزات نصب شده و موقعیت جغرافیایی آن‌ها، توپولوژی شبکه، سطوح ولتاژ و طول خطوط انتقال و رسانایی زمین در منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. مرحله دوم نیازمند تجزیه و تحلیل داده‌های خرابی شبکه، از جمله طبقه‌بندی علت‌های خرابی است. خرابی‌های ناشی از دلایل فنی غیر مشخص می‌توانند به صورت بالقوه ناشی از یک GMD باشند. همبستگی خرابی‌ها (ناشی از دلایل فنی نامشخص) با بالا در مرحله سوم انجام می‌گیرد. اگر چنین همبستگی‌ای آشکار شد، مطالعه دقیق استحکام شبکه قدرت خاص نسبت به GMD مورد نیاز است. اگر چنین همبستگی‌ای آشکار نشد یا قابل تعریف نبود، باید گام چهارم حذف شود. مرحله چهارم شامل بررسی سطوح ولتاژ تجهیزات سیستم قدرت نصب شده است. اگر شبکه قدرت شامل گرهای باشد که تجهیزات با سطح ولتاژ بالاتر از ۲۲۰ کیلوولت در آن‌ها نصب شده باشند، انجام مرحله پنجم ضروری است. اگر سطوح ولتاژ تمام تجهیزات نصب شده کمتر از ۲۲۰ کیلوولت باشد، مطالعه دقیقی لازم نیست و می‌توان نتیجه گرفت که این شبکه قدرت خاص در برابر اثرات GMD مقاوم است. در مرحله پنجم باید بررسی کرد که آیا ترانسفورماتورهای قدرت تک‌فاز یا سه‌فاز پنج‌پایه در شبکه نصب شده‌اند یا خیر. اگر تجهیزات ثبت GIC در بخش‌های خنثی ترانسفورماتور قدرت آسیب‌پذیر نصب شده باشند، بررسی دامنه‌های اندازه‌گیری شده GIC باید در مرحله ششم انجام شود. اگر سطوح GIC از مقدار آستانه فراتر رود، مطالعه دقیق مورد نیاز است. مقدار آستانه توسط تولیدکننده ترانسفورماتور قدرت تعریف می‌شود و برای هر

grid for Carrington-class magnetic storms. Earth, Planets and Space (Online), 73(1).

- [7] Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., & De Gonzalez, A. L. C. (1999). Interplanetary origin of geomagnetic storms. Space Science Reviews, 88(3), 529-562.
- [8] Hynes, B. J. (2016). The effects of geomagnetic disturbances on electric power systems (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Milwaukee).
- [9] Priest, Eric. Magnetohydrodynamics of the Sun. Cambridge University Press, 2014
- [10] Bolduc, L., Langlois, P., Boteler, D., & Pirjola, R. (1998). A study of geoelectromagnetic disturbances in Quebec. I. General results. IEEE Transactions on Power Delivery, 13(4), 1251-1256.
- [11] Viljanen, A. (1997). The relation between geomagnetic variations and their time derivatives and implications for estimation of induction risks. Geophysical research letters, 24(6), 631-634.
- [12] Kappenman, J. G. (2005). An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts.
- [13] Daglis, I. A. (2006). Ring current dynamics. Space Science Reviews, 124(1), 183-202.
- [14] Kirkham, H., Makarov, Y. V., Dagle, J. E., DeSteele, J. G., Elizondo, M. A., & Diao, R. (2011). Geomagnetic storms and long-term impacts on power systems (No. PNNL-21033). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- [15] Bolduc, L. (2002). GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 64(16), 1793-1802.
- [16] Wik, M., Pirjola, R., Lundstedt, H., Viljanen, A., Wintoft, P., & Pulkkinen, A. (2009, April). Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems. In Annales Geophysicae (Vol. 27, No. 4, pp. 1775-1787). Copernicus GmbH.
- [17] Gil, A., Modzelewska, R., Moskwa, S., Siluszyk, A., Siluszyk, M., Wawrzynczak, A., & Zakrzewska, S. (2019). Does time series analysis confirms the relationship between space weather effects and the failures of electrical grids in South Poland?. Journal of Mathematics in Industry, 9(1), 1-16.
- [18] Watari, S., Kunitake, M., Kitamura, K., Hori, T., Kikuchi, T., Shiokawa, K., ... & Tsuneta, Y. (2009). Measurements of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido, Japan. Space Weather, 7(3).
- [19] Liu, C., Li, Y., & Pirjola, R. (2014). Observations and modeling of GIC in the Chinese large-scale high-voltage power networks. Journal of Space Weather and Space Climate, 4, A03.
- [20] Monitoring and Mitigation of Geomagnetically Induced Currents. EPRI, Palo Alto, CA: 20081015938 .
- [21] Lucas, G. M., Love, J. J., Kelbert, A., Bedrosian, P. A., & Rigler, E. J. (2020). A 100-year geoelectric hazard analysis for the US high-voltage power grid. Space Weather, 18(2), e2019SW002329.
- [22] Taran, S., Safari, H., & Daei, F. (2019). Kappa-Maxwellian electrons and Bi-Maxwellian protons in a two-fluid model for fast solar wind. The Astrophysical Journal, 882(2), 157.



شکل ۱۰: الگوریتمی برای یافتن گلوگاه‌های شبکه قدرت برای تأثیر منفی اختلالات ژئومغناطیسی [۲].

اثرات در عرض‌های جغرافیایی پایین داشتند، دارای تغییرات ژئومغناطیسی ضعیف‌تر هستند و از این رو به‌طور معمول در آنجا مقادیر GIC بسیار کوچک‌تر گزارش می‌شوند. با این حال، جریان GICها و اثرات آنها بر ترانسفورماتورهای قدرت فرآیندهای پیچیده‌ای هستند و ارزیابی دقیق حتی در چنین مناطقی با عرض جغرافیایی کم مورد نیاز است.

۸- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت پژوهشگاه فضایی ایران از طرح پژوهشی مرتبط با این مقاله با شماره سند ۱۰/۱۶۲/م تشکر می‌نمایند.

۹- مراجع

- [1] Marusek, J. A. (2007). Solar storm threat analysis. J. Marusek.
- [2] Sokolova, O., Burgherr, P., Sakharov, Y., & Korovkin, N. (2018). Algorithm for analysis of power grid vulnerability to geomagnetic disturbances. Space Weather, 16(10), 1570-1582.
- [3] Trivedi, N. B., Vitorello, I., Kabata, W., Dutra, S. L., Padilha, A. L., Bologna, M. S., ... & Viljanen, A. (2007). Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study. Space Weather, 5(4).
- [4] Watari, S. (2015). Estimation of geomagnetically induced currents based on the measurement data of a transformer in a Japanese power network and geoelectric field observations. Earth, Planets and Space, 67(1), 1-12.
- [5] Fujii, I., Ookawa, T., Nagamachi, S., & Owada, T. (2015). The characteristics of geoelectric fields at Kakioka, Kanoya, and Memambetsu inferred from voltage measurements during 2000 to 2011. Earth, Planets and Space, 67(1), 1-17.
- [6] Shinichi, W., & Kumar, S. (2021). Prediction of geomagnetically induced currents (GICs) flowing in Japanese power



مقاله علمی-ترویجی

امکان سنجی وقوع تشدید در خط ۴۰۰ کیلوولت ابوطالب- تربت جام

جواد مدرسی^{*}، مهندس برق، دانشگاه صنعتی قوچان، j.modarresi@qiet.ac.ir

عباداله کامیاب، مدیر دفتر تحقیقات و کنترل کیفیت تجهیزات، شرکت برق منطقه‌ای- خراسان، ebad.kamyab@gmail.com
^{*} نویسنده مسئول

چکیده

وقوع تشدید در خطوط انتقال می‌تواند باعث ایجاد اضافه ولتاژهای نامتعارف شده و تجهیزات را در معرض خطر قرار دهد. یکی از شرایطی که می‌تواند منجر به ایجاد تشدید در خطوط انتقال شود، وصل نامتقارن (تک‌فاز و دوفاز) در خطوط انتقال جبران‌سازی شده با راکتور موازی است. وصل نامتقارن خط می‌تواند ناشی از عدم عملکرد فازهای کلید، فعال بودن ریکلوزر تک‌فاز و یا وجود سونیچ سنکرون در خط باشد. در این مقاله، امکان سنجی وقوع تشدید در خط ۴۰۰ kV ابوطالب- تربت جام با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده در حالت وصل نامتقارن (تک‌فاز و دوفاز) خط ابوطالب- تربت جام، تشدید در فرکانس قدرت اتفاق نمی‌افتد. اما این خط دارای فرکانس تشدید در محدوده‌ی هارمونیک‌ها است. برای بررسی تاثیر هارمونیک‌ها، مطالعات هارمونیک‌ی انجام گرفته و نشان داده می‌شود که هارمونیک‌ها نمی‌توانند اضافه ولتاژهای نامتعارف در این خط ایجاد نمایند.

کلمات کلیدی: تشدید، خط انتقال، راکتور موازی، وصل نامتقارن.

Feasibility of Resonance in the 400 kV Abu Taleb-Torbat Jam Transmission line

Javad Modarresi^{*}, Department of Electrical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran, j.modarresi@qiet.ac.ir

Ebadollah Kamyab, Research and quality control office, Khorasan Regional Electricity Company, ebad.kamyab@gmail.com

^{*}Corresponding Author

Abstract

Resonance in transmission lines can cause unusual over-voltages and put the equipment at risk. One of conditions that can lead to resonance in transmission lines is the asymmetrical connection (single-phase and two-phase) of transmission lines compensated by shunt reactor. The asymmetrical connection of the line can be caused by the failure of the circuit breaker, activation of the single-phase recloser, or the presence of switchsync relay. In this paper, the feasibility of resonance in the 400 kV Abu Taleb-Torbat Jam transmission line is investigated using EMTP-RV software. According to the results, in the case of asymmetrical connection (single-phase and two-phase) of the Abu Taleb-Torbat Jam transmission line, resonance does not occur in the power frequency. But this line has a resonant frequency in the range of harmonics. In order to investigate the effect of harmonics, harmonic studies have been conducted and it is shown that harmonics cannot cause unusual over-voltages in this line.

Key words: Resonance, Transmission line, Shunt reactor, Asymmetrical connection

به صورت خلاصه مورد بررسی قرار می گیرند.

۲-۱- خطوط با راکتور موازی و وصل نامتقارن خط

تشدید می تواند در خطوط تک مداره و چند مداره در شرایطی که یک مدار به صورت نامتقارن (تک فاز و یا دو فاز) متصل شده باشد، ایجاد شود. اتصال نامتقارن خط می تواند ناشی از موارد زیر باشد:

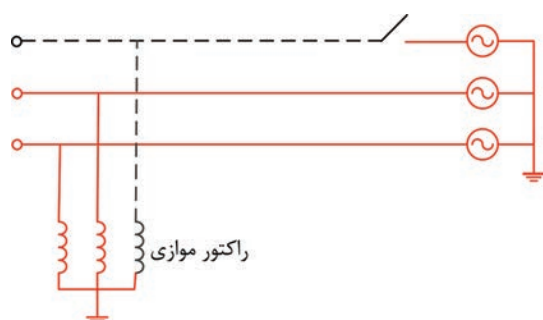
۱- فعال بودن ریکلوزرها بر روی کلیدهای ابتدا و انتهای خط؛

۲- خطای کلید در حالت وصل و یا قطع جریان؛

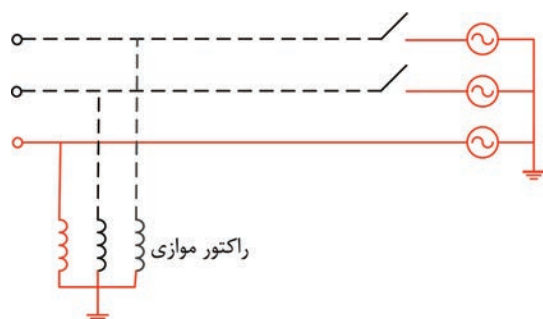
۳- استفاده از سوئیچ سنکرون در خطوط انتقال به منظور مقابله با اضافه ولتاژهای کلیدزنی.

با وصل نامتقارن خط، یک مدار تشدید سری بین راکتور فازهای قطع شده و ظرفیت خازنی های خط انتقال ایجاد می شود. به طور معمول با عملکرد سیستم های حفاظتی و یا سیستم های خودکار (نظیر ریکلوزرها و سوئیچ سنکرون ها)، وصل نامتقارن خط در مدت زمان کوتاهی از بین می رود. اما به دلیل اضافه ولتاژهای زیادی که تشدید می تواند ایجاد کند، امکان آسیب دیدن تجهیزات وجود دارد [۷].

در شکل (۱) مدارهایی که می توانند در حالت وصل نامتقارن باعث ایجاد تشدید شوند نشان داده شده است. با توجه به این شکل، شرط ایجاد تشدید در خطی که تنها در یک سمت آن راکتور موازی نصب شده است، این است که خط از سمت راکتور مدار باز بوده و از سمت دیگر به صورت نامتقارن متصل گردد [۷].



الف



ب

شکل ۱: ایجاد تشدید در خطوط جبران سازی شده با راکتور موازی: (الف) وصل نامتقارن دو فاز، (ب) وصل نامتقارن تک فاز

در شکل (۲)، مدار معادل وصل نامتقارن دو فاز نشان داده شده است. با صرف نظر کردن از فازهای b و c که توسط فرکانس اصلی سیستم قدرت تغذیه می شوند، یک مدار LC شامل راکتور فاز قطع شده و ظرفیت خازنی خط ایجاد می شود. این مدار ممکن است شرایط تشدید را داشته باشد و ولتاژ از مقدار نامی خود بسیار بالاتر رود.

در یک خط انتقال که با راکتور موازی جبران سازی شده است،

امروزه با گسترش شبکه های برق و نیاز به انتقال برق از محل تولید به محل مصرف، استفاده از خطوط انتقال بلند اموری اجتناب ناپذیر است. یکی از مشکلاتی که در خطوط انتقال بلند ایجاد می شود، افزایش ولتاژ انتهای خط به دلیل اثر فرانتی است. از این رو، برای کاهش اثر فرانتی و کنترل ولتاژ انتهای خطوط بلند به طور معمول از راکتورهای موازی استفاده می شود [۱]. اگر چه وجود راکتورها در کاهش اضافه ولتاژها در شرایط کمباری و قطع بار بسیار مفید است، اما آن ها می توانند باعث ایجاد تشدید در خط انتقال شوند. برای به وجود آمدن تشدید، به طور معمول باید یک طرف خط باز بوده و خط از طرف دیگر به صورت نامتقارن به شبکه متصل شود [۵-۲].

تاکنون موارد متعددی از وقوع تشدید در ایران و جهان گزارش شده است که در آن ها ولتاژ بالای ایجاد شده به دلیل تشدید باعث صدمه دیدن تجهیزات شده است [۸-۶]. به طور مثال در زمستان ۱۳۹۳ یک مورد تشدید در برق منطقه ای اصفهان و در خط گلپایگان- اراک گزارش شده است که در آن به دلیل خطا در عملکرد قطع کلید، خط به صورت تک فاز از سمت اراک برق دار شده و ولتاژ راکتور تا ۱/۲۵ pu افزایش یافته است. این حادثه به دلیل عملکرد مناسب اپراتور پست گلپایگان و وصل خط از طرف گلپایگان خسارتی در پی نداشته است. در خط زاهدان- ایرانشهر نیز یک مورد تشدید گزارش شده است. در این حادثه ولتاژ تا ۱/۱۵ pu بالا رفته و به سیم پیچ راکتور آسیب وارد کرده است [۹]. در کشور کانادا و در سال ۲۰۱۲ یک مورد تشدید گزارش شده است که در این حادثه ولتاژ تا ۱/۷۱ pu بالا رفته و در مدت ۶/۸۵ ثانیه یک کلید و دو برق گیر آسیب دیده اند [۱]. با توجه به موارد گفته شده، وقوع تشدید در خطوط جبران سازی شده با راکتور موازی محتمل بوده و باید مورد توجه قرار گیرد.

هر چه فرکانس تشدید به فرکانس کاری شبکه نزدیک تر گردد، دامنه ی ولتاژ ایجاد شده به دلیل تشدید بیشتر خواهد بود [۱۰]. فرکانس تشدید و دامنه ی اضافه ولتاژ ایجاد شده به ساختار خط انتقال، نحوه ی تغذیه ی نامتقارن خط انتقال (تک فاز یا دو فاز) و ساختار راکتور نصب شده در انتهای خط بستگی دارد [۱۱-۱۳]. با وقوع تشدید و افزایش ولتاژ دو سر راکتور، هسته ی راکتور به اشباع رفته و امپدانس آن کاهش می یابد. کاهش امپدانس راکتور باعث جابه جایی فرکانس تشدید شده و می تواند دامنه ی اضافه ولتاژ ایجاد شده را تغییر دهد. در صورت وقوع تشدید در خط انتقال، باید اثر اشباع راکتور، پدیده ی کرونا و برق گیرها مورد مطالعه قرار گیرند [۷].

در این مقاله، امکان وقوع تشدید در خط ۴۰۰ kV ابوطالب- تربت جام مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور، وصل نامتقارن (تک فاز و دو فاز) خط در نرم افزار EMTP-RV شبیه سازی شده و در هر حالت عدم قطعیت فاصله ی هادی های فاز نسبت به زمین و تاثیر هارمونیک ها مورد مطالعه قرار می گیرد. نتایج حاصل از این مطالعه می تواند در فعال سازی ریکلوزرهای ۴۰۰ kV و همچنین استفاده از سوئیچ سنکرون ها در خط بیان شده بسیار مفید باشد.

۲- تشدید در خطوط انتقال جبران سازی شده با راکتور موازی

ساختارهای مختلفی از خطوط انتقال می توانند منجر به تشدید شوند [۷]. در این بخش، ساختارهای مرتبط با موضوع مقاله

و رفع آن موضوعی مهم در حفظ امنیت سیستم قدرت است.

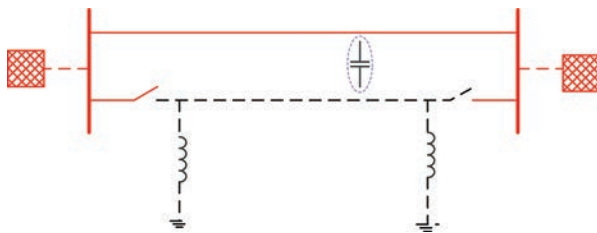
۲-۲- خطوط با راکتور موازی و کلیدزنی سه فاز

این حالت تنها در خطوط چند مداره وقتی اتفاق می افتد که یک مدار بی برق بوده و مدار دیگر برق دار باشد. به دلیل وجود القای ولتاژ خازنی بین مدارها، ولتاژی در مدار بی برق (مدار بی برق زمین نشده باشد) القا می شود. ولتاژ القا شده در حالت عادی با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می شود:

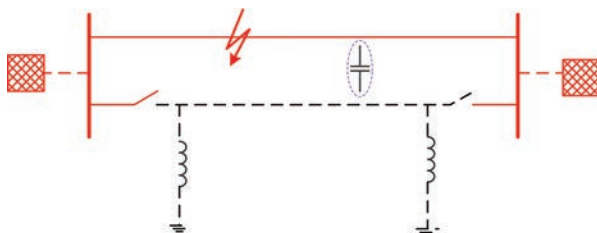
$$V_{\text{Circuit_II}} = V_{\text{Circuit_I}} \frac{C_s}{C_s + C_p} \quad (۸)$$

در این رابطه C_s ظرفیت خازنی بین دو مدار و C_p ظرفیت خازنی بین مدار بی برق و زمین است. در حالت عادی، مقدار ولتاژ القا شده در مدار بی برق برابر کسر کوچکی از ولتاژ مدار برق دار است. با نصب راکتور موازی، امکان ایجاد مدار تشدید به وجود می آید. در فرکانس تشدید و یا نزدیک آن مقدار ولتاژ القا شده در مدار بی برق می تواند به چندین برابر مقدار به دست آمده از رابطه‌ی (۸) برسد [۷].

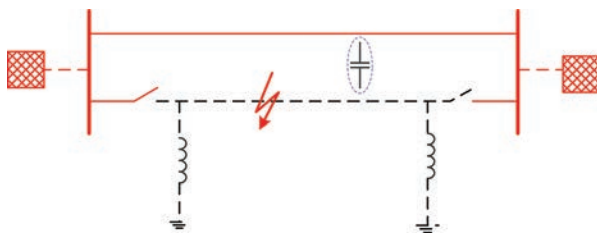
در شکل (۳)، سه مدار ایجاد تشدید در خطوط دو مداره نشان داده شده است. در حالت (الف) مدار جبران سازی شده بی برق است و با القای ولتاژ از طریق مدار برق دار، تشدید ایجاد می شود. در این حالت، مدار تشدید در حالت کار عادی شبکه ایجاد می شود. در حالت (ب) یک خطا در مدار برق دار اتفاق افتاده و باعث ایجاد مدار تشدید می شود. این مدار تشدید با رفع خطا از بین می رود. در حالت (ج) خطا در خط بی برق اتفاق افتاده و با رفع خطا مدار تشدید از بین می رود.



الف

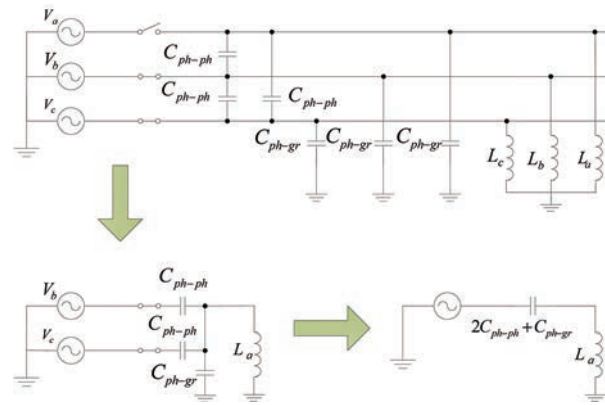


ب



ج

شکل ۳: مدار تشدید در خطوط چند مداره: (الف) حالت دائم، (ب) وقوع خطا در خط برقرار، (ج) وقوع خطا در خط بی برق



شکل ۲: مدار معادل برای تحلیل تشدید در حالت وصل نامتقارن دو فاز خط

ضریب جبران سازی خط K به صورت (۱) تعریف می شود [۱۴].

$$k = \frac{B_L}{B_C} = \frac{1/\omega L}{\omega C} = \frac{1}{\omega^2 L(C_{ph-gr} + 3C_{ph-ph})} \quad (۱)$$

با توجه به شکل (۲)، فرکانس تشدید مدار LC به دست آمده به صورت (۲) قابل محاسبه است.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{ph-gr} + 2C_{ph-ph})}} \quad (۲)$$

با ضرب صورت و مخرج (۲) در $\sqrt{C_{ph-gr} + 3C_{ph-ph}}$ و کمی ساده سازی داریم:

$$f_0 = f \sqrt{\frac{1+3m}{1+2m}} k \quad (۳)$$

در (۲) f فرکانس سیستم قدرت، f فرکانس تشدید و m به صورت (۴) محاسبه می شود.

$$m = \frac{C_{ph-ph}}{C_{ph-gr}} \quad (۴)$$

در حالت وصل نامتقارن دوفاز خط انتقال، اگر رابطه‌ی (۵) برقرار باشد، آنگاه $f = f_0$ شده و ولتاژ به بی نهایت میل می کند.

$$k = \frac{1+2m}{1+3m} \quad (۵)$$

در حالتی که خط به صورت نامتقارن تک فاز وصل شده باشد، فرکانس تشدید به صورت (۶) به دست می آید [۱۴].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{ph-gr} + C_{ph-ph})}} = f \sqrt{\frac{1+3m}{1+m}} k \quad (۶)$$

در این حالت اگر رابطه‌ی زیر برقرار باشد، $f = f_0$ شده و ولتاژ به بی نهایت میل می کند.

$$k = \frac{1+m}{1+3m} \quad (۷)$$

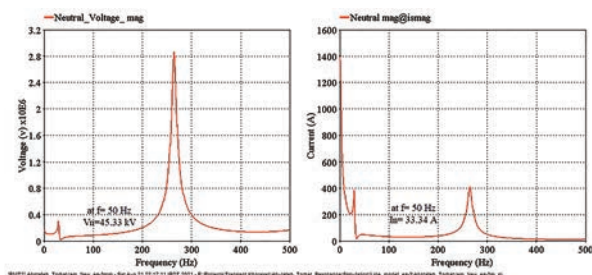
اضافه ولتاژ ناشی از تشدید تا وقتی که عدم تقارن در سیستم وجود دارد برطرف نمی شود و عایق خطوط، برق گیرها، راکتورهای موازی، ترانسفورماتورهای اندازه گیری و کلیدهای باز شده را تحت تنش الکتریکی قرار می دهد. بنابراین تشخیص به موقع عدم تقارن

راکتور و وصل نامتقارن خط (تک فاز و یا دو فاز) از سمت دیگر است. این حالت می تواند در باز و بست تک فاز و یا استفاده از سوئیچ سنکرون ایجاد شود. در نتیجه، وصل نامتقارن خط از سمت پست ابوطالب مورد بررسی قرار می گیرد.

روابط ارائه شده در بخش دوم برای خطوطی که دارای ساختار یکسان در تمامی طول خود هستند صادق است و در این مقاله به منظور فهم بیشتر پدیده تشدید ارائه شده اند. از این رو این روابط قابل اعمال به خط ابوطالب- تربت جام نیستند.

۴-۱- وصل نامتقارن تک فاز

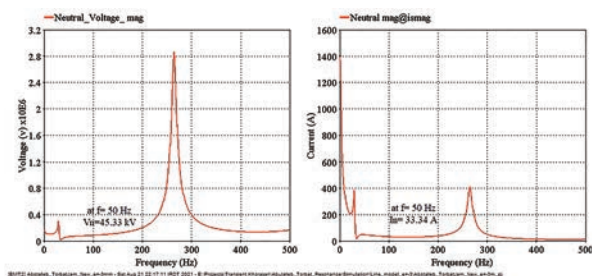
در شکل (۵)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن تک فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیک ترین فرکانس های تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانس های ۲۹۲ و ۳۰ هرتز هستند.



شکل ۵: ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین در وصل نامتقارن تک فاز

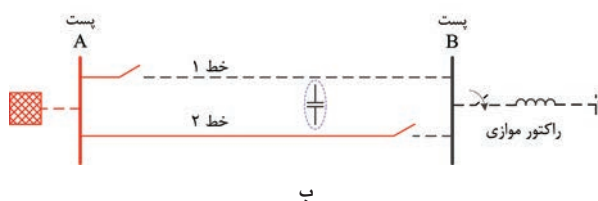
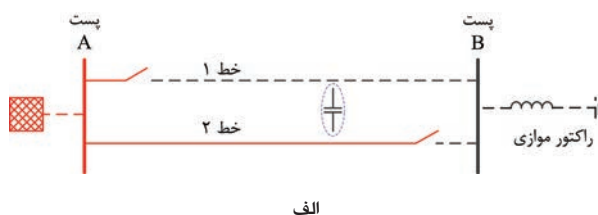
در شکل (۵)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن تک فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیک ترین فرکانس های تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانس های ۲۹۲ و ۳۰ هرتز هستند. باند فرکانسی مطلوب که در آن ولتاژ کمتر از ۱/۰۵ pu است نشان داده شده است. این باند فرکانسی در محدوده ۹/۳۴ Hz تا ۸/۶۴ Hz قرار دارد. در نتیجه در فرکانس اصلی سیستم قدرت و محدوده مجاز تغییرات آن (± 0.3 Hz) تشدید اتفاق نمی افتد. اما با توجه به این که فرکانس تشدید ۲۹۲ Hz نزدیک به فرکانس هارمونیک ششم بوده و در محدوده فرکانس هارمونیک پنجم و هفتم ولتاژ تا حدود ۲ pu بالا می رود، در نتیجه در صورت وجود هارمونیک ها امکان ایجاد ولتاژهای نامتعارف در خط وجود دارد.

در شکل (۶)، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن تک فاز به ازای فرکانس های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در فرکانس ۵۰ Hz به ترتیب برابر ۳۴/۳۳ A و ۳۳/۴۵ kV است. با توجه به پلاک مشخصات راکتور نوترال، این راکتور توانایی تحمل چنین جریان و ولتاژی را به مدت محدود دارد. از این رو، در صورت وصل نامتقارن خط باید هرچه سریع تر نسبت به رفع نامتقارنی اقدام گردد.



شکل ۶: جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن تک فاز

موقعی هم امکان ایجاد تشدید وجود دارد. دو نمونه از چنین شرایطی در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل، خط بی برق به همراه راکتور موازی تشکیل مدار تشدید می دهند و انرژی مورد نیاز توسط خط ۲ و از طریق القای ولتاژ تامین می شود. در نتیجه برای آن که تامین انرژی به درستی انجام گیرد، باید دو خط بر روی یک دکل نصب شده باشند.



شکل ۴: مدار تشدید در راکتور نصب شده بر روی باسباب: (الف) حالت اول، (ب) حالت دوم

۳- مدل سازی

خط ابوطالب- تربت جام دارای طول ۱۵۴/۵ km است. این خط دارای سه بخش متفاوت است. در بخش نخست به صورت دو مداره اجرا شده است. اما چون مدار دوم بی برق است، در نتیجه تشدید بررسی شده در بخش ۲-۲ نمی تواند در این خط ایجاد شود. در بخش دوم دکل ها به صورت دو مداره هستند اما فقط یک بخش سیم کشی شده است. در بخش سوم دکل ها تک مداره هستند. با توجه به اینکه پدیده تشدید در فرکانس پایین اتفاق می افتد، در نتیجه مدل سازی دقیق سیم های محافظ، امپدانس زمین دکل ها و مقرها لازم نیست. علاوه بر این، خازن های پراکندگی تجهیزات تأثیری در نتایج نخواهد داشت. اما چون نیاز به بررسی وضعیت هارمونیک ها وجود دارد، خط باید به صورت وابسته به فرکانس مدل سازی شود.

در پست تربت جام یک راکتور با توان نامی ۵۰ MVar نصب شده است. در نقطه زمین این راکتور، یک راکتور نوترال با ولتاژ و توان نامی ۶/۲۵ kv و ۵۱/۰ MVar وجود دارد.

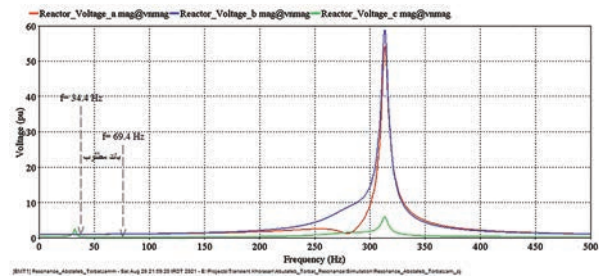
بنا به گفته ی CIGRE، راکتورهای با فاصله ی هوایی در ولتاژ pu ۱/۲۵ تا ۱/۷۵ به اشباع می روند. با توجه به اینکه در شرایط عادی امکان ایجاد چنین اضافه ولتاژ وجود ندارد، بنابراین تأثیر اشباع هسته در نظر گرفته نمی شود. زیرا در ولتاژهای کمتر از این مقادیر سیستم های حفاظتی عمل کرده و خط را بی برق می کنند.

۴- شبیه سازی

در این بخش امکان وقوع تشدید در خط ابوطالب- تربت جام با استفاده از نرم افزار EMTP-RV مورد مطالعه قرار می گیرد. برای آن که تشدید نتواند مشکلی را در خط ایجاد کند، باید دامنه ی ولتاژها و جریان ها در فرکانس ۵۰ Hz در محدوده ی مجاز قرار داشته باشد. علاوه بر این، در صورت وجود هارمونیک در شبکه، باید فرکانس تشدید به اندازه ی کافی از فرکانس هارمونیک ها دور باشد. در خطوط تک مداره، شرط ایجاد تشدید قطع بودن خط از سمت

۴-۲- وصل نامتقارن دو فاز

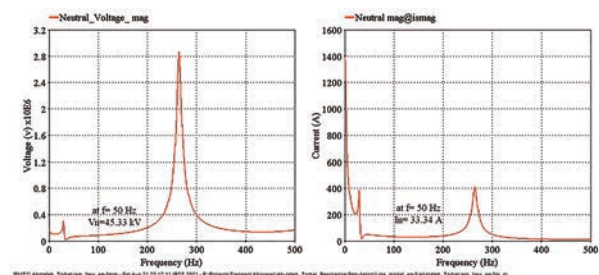
در شکل (۷)، ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین به ازای وصل نامتقارن دو فاز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نزدیک‌ترین فرکانس‌های تشدید به فرکانس ۵۰ هرتز، فرکانس‌های ۳۱۳ و ۳۲ هرتز هستند.



شکل ۷: ولتاژ فازهای راکتور نسبت به زمین در وصل نامتقارن دو فاز

در شکل (۷)، باند فرکانسی مطلوب که در آن ولتاژ کمتر از ۱/۰۵ است نشان داده شده است. این باند فرکانسی در محدوده ۴/۳۴ Hz تا ۴/۶۹ Hz قرار دارد. در نتیجه در فرکانس اصلی سیستم قدرت و محدوده مجاز تغییرات آن ($\pm 3/0$ Hz) تشدید اتفاق نمی‌افتد. اما با توجه به اینکه فرکانس تشدید ۳۱۳ Hz نزدیک به فرکانس هارمونیک ششم بوده و در محدوده فرکانس هارمونیک پنجم و هفتم ولتاژ تا حدود ۵ pu بالا می‌رود، در نتیجه در صورت وجود هارمونیک‌ها امکان ایجاد ولتاژهای نامتعارف در سیستم قدرت وجود دارد.

در شکل (۸)، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن دو فاز به ازای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل، جریان و ولتاژ راکتور نوترال در فرکانس ۵۰ Hz به ترتیب برابر ۳/۳۳ A و ۱۱/۴۴ kV است. با توجه به پلاک مشخصات راکتور نوترال، این راکتور توانایی تحمل چنین جریان و ولتاژی را به مدت محدود دارد. از این‌رو، در صورت وصل نامتقارن خط باید هرچه سریع‌تر نسبت به رفع نامتقارنی اقدام گردد.

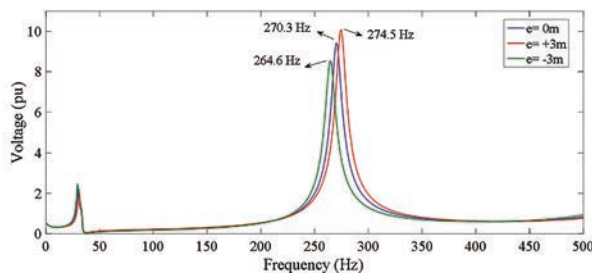


شکل ۸: جریان و ولتاژ راکتور نوترال در حالت وصل نامتقارن دو فاز

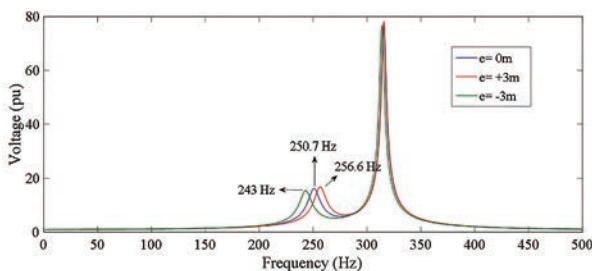
۴-۳- بررسی عدم قطعیت فاصله‌ی هادی‌ها از زمین

مسیر عبور خطوط انتقال همواره با پستی و بلندی‌هایی همراه است. این پستی و بلندی‌ها بر روی خازن فاز به زمین تاثیر می‌گذارند. ارتفاع هادی استفاده شده در بخش‌های قبل ارتفاع متوسط هادی‌ها از سطح زمین در طول خط انتقال است و ممکن است همراه با خطا باشد. برای مطالعه‌ی تاثیر ارتفاع هادی‌ها بر روی فرکانس تشدید، ارتفاع هادی‌ها از زمین در سه حالت ارتفاع استفاده شده در بخش قبل ($e=0m$)، افزایش ارتفاع به

مقدار ۳ متر ($e=+3m$) و کاهش ارتفاع به مقدار ۳ متر ($e=-3m$) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همان‌طور که از شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است، افزایش ارتفاع هادی‌ها باعث دور شدن فرکانس تشدید از فرکانس اصلی و کاهش ارتفاع هادی‌ها باعث نزدیک شدن فرکانس تشدید به فرکانس اصلی می‌شود. ولی چون مقدار تغییرات فرکانس تشدید در سه حالت در حد چند هرتز است، در نتیجه پستی و بلندی‌های طول خط که منجر به افزایش و کاهش ارتفاع هادی‌ها می‌شود، نمی‌تواند بر روی نتایج به‌دست آمده در بخش قبل تاثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارد.



شکل ۹: تاثیر ارتفاع هادی‌ها بر روی فرکانس تشدید در حالت وصل نامتقارن تک فاز



شکل ۱۰: تاثیر ارتفاع هادی‌ها بر روی فرکانس تشدید در حالت وصل نامتقارن دو فاز

۴-۴- بررسی تاثیر هارمونیک‌ها

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، هارمونیک‌های ولتاژ ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ با دامنه‌ی نشان داده شده در جدول (۱) در باس پست ابوطالب وجود دارند. با توجه به این که خط ابوطالب-تربت جام دارای فرکانس تشدید در محدوده‌ی هارمونیک‌های نشان داده شده در جدول (۱) است، از این‌رو امکان ایجاد اضافه ولتاژ نامتعارف در حضور هارمونیک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱: هارمونیک‌های ولتاژ در باس پست ابوطالب

مرتب‌ه هارمونیک	دامنه (درصد از مولفه‌ی اصلی)
سوم	۰/۳۱
چهارم	۰/۰۶
پنجم	۲/۶۵
ششم	۰/۰۵
هفتم	۰/۵۷

با توجه به شکل‌های (۵) و (۷) در صورت وجود هارمونیک‌ها،

۶- مراجع

- [1] T. Martinich, M. Nagpal, and S. Manuel, "Analysis of Damaging Open-Phase Event on a Healthy Shunt Compensated 500 kV Line Initiated by Unintended Trip", in International Conference on Power Systems Transients, pp.2015, 1-7.
- [2] L. Wei, N. Wen-hui, and H. Dong-shan, "Analysis and Modification of a 500 kV Transmission Line Overvoltage Problem", China International Conference on Electricity Distribution, pp.2010, 1-6.
- [3] M. V. Escudero, and M. Redfern, "Effects of Transmission Line Construction on Resonance in Shunt Compensated EHV Lines", in International Conference on Power Systems Transients, pp.2005, 1-6.
- [4] M. V. Escudero, and M. Redfern, "Parametric Analysis of Parallel Resonance on Shunt Compensated Transmission Lines", in International Universities Power Engineering Conference, pp.2004, 1181-1185.
- [5] E. Nashawati, N. Fischer, B. Le, and D. Taylor, "Impacts of Shunt Reactors on Transmission Line Protection", pp.2011, 1-16.
- [6] J. Klucznik, Z. Lubosny, K. Dobrzynski, and S. Czapp, "Resonance problems in UHV transmission lines", International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp.2017, 1-6.
- [7] CIGRE, "Resonance and Ferroresonance in Power Networks", Working Group C4.307.2014.
- [8] N. G. Alvijeh, M. H. Samimi, A. A. Joneidi, and M. Rezaei, "Investigation of Resonance for Shunt Reactor in 230 Kv Minab-Jask Parallel Lines", International Power System Conference, pp.2017, 1-6.
- [9] M. H. Samimi, M. Abedini, A. H. Mostajabi, D. Farokhzad, H. Ayoubzadeh, A. A. S. Akmal, and H. Mohseni, "Reactor Failure due to Resonance in Zahedan -Iranshahr Parallel EHV Lines, Analysis and Practical Solutions", Acta Polytechnica Hungarica, vol.11, no. 1, pp.2014, 63-78.
- [10] D. A. Hammad, S. Boshoff, W. C. v. d. Merwe, C. v. Dyk, W. Otto, and U. H. E. Kleynstüber, "SVC for Mitigating 50 Hz Resonance of a Long 400 kV ac Interconnection", pp.1999, 1-6.
- [11] V. Kuchanskyy, "Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymetric Modes", International Conference on Energy Smart Systems (ESS), (pp.2019, 122-125).
- [12] M. V. Escudero, and M. Redfern, "Parametric analysis of parallel resonance on shunt compensated transmission lines", International Universities Power Engineering Conference, pp.2004, 1181-1185.
- [13] V. Kuchanskyy, "The prevention measure of resonance overvoltages in extra high voltage transmission lines", First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), (pp.2017, 436-441).
- [14] F. Illiceto, E. Cinieri, and A. D. Vita, "Overvoltages due to open-phase occurrence in reactor compensated EHV lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS, 103-no. 3, pp.1984, 474-483.

دامنه‌ی هارمونیک‌ها مطابق جدول (۲) افزایش خواهد یافت. اما به دلیل دامنه‌ی بسیار کم مؤلفه‌های هارمونیک‌ی، این افزایش ولتاژ قابل ملاحظه نخواهد بود.

جدول ۲: مقدار افزایش دامنه‌ی هارمونیک‌ها

نوع اتصال	مرتبه هارمونیک	ضریب افزایش دامنه
نامتقارن تک‌فاز	سوم	۱/۴۲
	چهارم	۲/۰۴
	پنجم	۴/۰۶
	ششم	۱۰/۲۹
	هفتم	۳/۰۶
نامتقارن دو‌فاز	سوم	۱/۴۲
	چهارم	۲/۰۷
	پنجم	۴/۳۷
	ششم	۱۴/۵۰
	هفتم	۴/۹۰

به منظور بررسی دقیق‌تر، مقدار ولتاژ دو سر راکتور در شرایطی که هارمونیک‌ها وجود دارند و ولتاژ پست ابوطالب برابر ۱/۰۵ pu است، به‌دست می‌آید. تحت این شرایط، مقدار حداکثر ولتاژ راکتور در وصل نامتقارن تک‌فاز و دو فاز به ترتیب برابر ۱/۰۶۹۲ pu و ۱/۰۶۵۵ pu به‌دست می‌آید. بنابراین، وجود هارمونیک‌ها باعث اضافه ولتاژی به اندازه‌ی یک درصد می‌شود. با توجه به دوره‌ی کوتاه باز و بست خودکار تک‌فاز و قدرت عایقی تجهیزات، این اضافه ولتاژ نمی‌تواند مشکلی را برای خط ایجاد نماید.

۵- نتیجه‌گیری

تشدید در خطوط انتقال می‌تواند تحت شرایط مختلف ایجاد شود. یکی از این شرایط، وصل نامتقارن خطوط انتقال جبران‌سازی شده با راکتور موازی است. وصل نامتقارن خطوط می‌تواند در باز و بست خودکار تک‌فاز خطوط و استفاده از سوئیچ سنکرون ایجاد شود. در این مقاله وصل نامتقارن خط ابوطالب- تربت‌جام مورد بررسی قرار گرفت. در این خط، راکتور موازی در پست تربت‌جام وجود دارد. در نتیجه وصل نامتقارن تک‌فاز از پست ابوطالب می‌تواند شرایط ایجاد تشدید را به‌وجود آورد. با شبیه‌سازی در نرم‌افزار EMTP-RV، فرکانس‌های تشدید خط ابوطالب- تربت‌جام در حالت وصل نامتقارن تک‌فاز و دو فاز از پست ابوطالب به‌دست آمد و نشان داده شد که در فرکانس سیستم قدرت (۵۰ Hz) امکان ایجاد تشدید وجود ندارد. اما فرکانس‌های تشدید در محدوده‌ی هارمونیک‌های ۵، ۶ و ۷ قرار دارند. از این‌رو، هارمونیک‌های پست ابوطالب با استفاده از نتایج اندازه‌گیری در نرم‌افزار EMTP-RV، مدل‌سازی شد و نتایج حاصل نشان داد که مقدار موثر ولتاژ راکتور در وصل نامتقارن تک‌فاز و دو فاز به ترتیب برابر ۱/۰۶۹۲ pu و ۱/۰۶۵۵ pu به‌دست می‌آید. با توجه به دوره‌ی کوتاه باز و بست خودکار تک‌فاز و قدرت عایقی تجهیزات، این اضافه ولتاژ نمی‌تواند مشکلی را برای خط ایجاد نماید.



مقاله علمی-ترویجی

برنامه‌ریزی بهینه تولید انرژی الکتریکی و توزیع اقتصادی بارها در حضور توربین بادی

محمد حسن همت پور، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جهرم، فارس- ایران، m.h.hematpour@jahromu.ac.ir

چکیده

باتوجه به رشد چشمگیر بار در صنعت برق و همچنین نفوذ بالای توربین‌های بادی (WTs) در سیستم‌های قدرت، مساله برنامه‌ریزی تولید واحدها (UC) به یک مساله حیاتی تبدیل شده است. UC مساله برنامه‌ریزی تولید واحدها، زمان روشن و خاموش شدن واحدها و نحوه توزیع بار بین واحدهای روشن را طوری تعیین می‌کند که هزینه کمینه شود؛ از این‌رو محور اصلی این مقاله، شامل دو سناریو که بررسی برنامه‌ریزی تولید واحدها با قیود مختلف از جمله نرخ شیب و ناحیه ممنوعه تولید در حضور و عدم حضور WTs است؛ بنابراین در ابتدا برنامه‌ریزی تولید واحدها را با در نظرگیری بار ساعت‌های آتی انجام می‌شود که این کار باعث افزایش قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی و همچنین کمینه نمودن هزینه‌ها می‌شود. در قسمت دوم روشی برای برنامه‌ریزی تولید واحدها ارائه می‌شود که در این روش، کمترین زمان خاموشی واحدها نیز در تابع هدف گنجانده شده است. در واقع هزینه‌های راه‌اندازی به‌صورت ساعتی در نظر گرفته شده‌اند. این روش پیشنهادی الگوی برنامه‌ریزی تولید را طوری تغییر می‌دهد که هزینه‌ها، کاهش می‌یابند. در نهایت پیاده‌سازی مساله در دو سناریو با در نظر گرفتن توربین‌های بادی و عدم حضور توربین‌های بادی انجام می‌شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی تولید، توربین بادی، زمان‌بندی واحدها، توزیع اقتصادی بار، نرخ شیب واحدها، قیود ناحیه ممنوعه.

Unit Commitment and Economic Load Dispatch in the Presence of Wind Turbines

■ Mohammad Hasan Hemmatpour, Assistant Professor Department of Electrical Engineering, Jahrom University, Jahrom, Iran, m.h.hematpour@jahromu.ac.ir

Abstract

Due to the significant growth of load in the power industry as well as the high penetration of wind turbines (WTs) in power systems, the issue of unit generation (UC) planning has become a critical issue. UC determines the problem of planning the production of units, the time when units are turned on and off, and how to distribute the load between the units that are turned on so that the cost is minimized; Therefore, the main focus of this article includes two scenarios that examine the production planning of units with different constraints, including the slope rate and the production prohibited area in the presence and absence of WTs; Therefore, at first, the production planning of the units is done by considering the load of future hours, which increases the reliability of the planning and also minimizes the costs. In the second part, a method for planning the production of units is presented, in this method, the minimum shutdown time of the units is also included in the objective function, in

fact, the start-up costs are considered hourly. This proposed method changes the production planning pattern so that the costs are reduced. Finally, the implementation of the problem is done in two scenarios considering wind turbines and the absence of wind turbines.

Keywords: Unit commitment, wind turbine, unit scheduling, economic dispatch, unit slope rate, prohibited zones.

۱- مقدمه

در این بخش مروری کوتاه بر روش‌های رایج در مساله گسترش برنامه‌ریزی تولید واحدها (UC) و توزیع اقتصادی بار (ED) می‌شود. UC و ED برای به‌دست آوردن اقتصادی‌ترین حالت برنامه‌ریزی تولید واحدها و همچنین توزیع توان در بین واحدهای روشن در یک افق زمانی مشخص به کار می‌روند، به‌طوری‌که تقاضای بار پیش‌بینی‌شده و رزرو مورد نیاز تأمین شوند و همچنین کلیه قیود واحدهای تولیدی برآورده شده باشند. آن زمان‌بندی از واحدها که منجر به کمترین هزینه کل تولید شود را جواب بهینه UC و ED می‌نامند. از آنجایی‌که مساله UC یک مساله بسیار بزرگ، غیرخطی، غیر محدب و عدد صحیح- مرکب است، بنابراین به‌دست‌آوردن یک جواب بهینه یک چالش بزرگ را می‌طلبد. مدل‌سازی ریاضیاتی برای حل یک مساله UC شامل روش‌های متعارف همچون یکایک شماری جامع، لیست حق تقدم، برنامه‌ریزی پویا، راه‌سازی لاگرانژ، روش‌های ترتیبی، روش از مدار خارج کردن واحدها، برنامه‌نویسی عدد صحیح- مرکب یا بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی است.

روش‌های زیادی برای حل مساله ED همانند مساله UC ارائه شده است. هنگامی‌که تنها بهینه‌سازی توان حقیقی به همراه تلفات و بدون قیود امنیتی مورد نظر باشد، روش‌های متعارف برای حل ED عبارتند از: تکرار لامبدا، روش گرادیان، روش نیوتن، برنامه‌ریزی پویا و شبکه عصبی. در ادامه ضمن دسته‌بندی مطالعات به برخی از مراجع در زمینه مطالعاتی UC و ED اشاره می‌شود.

در زمینه کتاب‌های موجود می‌توان به مراجع زیر اشاره کرد:

پروفسور کونجو و همکاران در فصل کتابی مبحث پخش بار اقتصادی و برنامه‌ریزی تولید را با جزئیات مورد بررسی قرار داده‌اند [۱]. همچنین نویسندگان در [۲] روش‌های مختلف حل مساله یاد شده در حضور منابع ذخیره‌سازی انرژی مورد مطالعه قرار داده‌اند.

● در زمینه مقاله‌های مروری می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد:

در [۳] روش‌های مختلف مدل‌سازی، روش‌های حل، چالش‌ها و مشکلاتی که در آینده، صنعت برق با مساله UC مواجه است، مورد مطالعه قرار می‌دهد. در [۴] مفاهیم اساسی روش‌های برنامه‌ریزی احتمالاتی برای مساله UC مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

● در زمینه ارائه روش‌های جدید حل مساله، مقاله‌های زیر آمده است:

پروفسور نظام‌آبادی و همکاران روشی جدید در زمینه مساله برنامه‌ریزی تولید را ارائه داده‌اند. در این مقاله از الگوریتم باینری جستجوی گرانشی کوانتومی استفاده شده است [۵]. در مقاله [۶] از راه‌حل Conic relaxations بهره گرفته‌اند. در مقاله‌ای دیگر به روش باینری بهینه‌سازی گرگ خاکستری پرداخته شده است [۷]. نویسندگان در [۸] از رویکرد بهبود یافته برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی مبتنی بر کاهش تقارن، در [۹] از الگوریتم جستجوی فاخته باینری بهبود یافته و در [۱۰] از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ باینری برای حل مساله UC بهره بردند.

● در زمینه چالش‌های جدید پیش رو در صنعت برق، می‌توان به مراجع زیر اشاره کرد:

برنامه‌ریزی واحدهای تولید با در نظر گرفتن ناحیه ممنوعه تولید، موضوع مراجع [۱۱] و [۱۲] را تشکیل می‌دهد. یک مساله برنامه‌ریزی احتمالاتی دو مرحله‌ای برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن هزینه متغیر گاز در [۱۳] ارائه شده است. مساله برنامه‌ریزی تولید به همراه توان بادی با قابلیت اشتراک‌پذیری در [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۵] از تأثیر UPFC برای افزایش قابلیت نفوذ توربین‌های بادی در شبکه و مساله برنامه‌ریزی تولید استفاده می‌شود. تأثیر منابع ذخیره‌ساز انرژی در مساله برنامه‌ریزی تولید در [۱۶] آمده است. در [۱۷] برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها در حضور هم‌زمان منابع انرژی بادی و خودروهای قابل اتصال به شبکه (PEV) مورد مطالعه قرار گرفته است. محدودیت‌ها و مشکلاتی که مساله UC در مدل‌های برنامه‌ریزی بلندمدت ایجاد می‌کند، در [۱۸] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بهینه‌سازی UC در کنار ED در ریزشکدها به کمک الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی انجام می‌شود [۱۹]. تأثیر DR و WT بر مساله برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدها و حل آن به کمک روش بندرز در [۲۰-۲۱] دیده شده است.

۲- بیان ریاضی مساله

۲-۱- مدل‌سازی ریاضی مساله برنامه‌ریزی تولید واحدها

تابع هدف یک مساله برنامه‌ریزی تولید واحد تابعی است که شامل هزینه‌های سوخت واحدهای تولیدی، هزینه راه‌اندازی واحدهای وارد شونده در مدار و هزینه خاموش شدن واحدهای خارج شونده از مدار می‌شود. تابع هدف به شکل رایج، به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_{i,t}(P_{i,t}) * u_{i,t} + \right. \quad (1)$$

$$\left. \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N SUC_{i,t} * u_{i,t} * (1 - u_{i,t-1}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N SDC_{i,t} * u_{i,t-1} * (1 - u_{i,t}) \right\}$$

هزینه‌های واحدهای تولیدی و قسمت‌های مؤثر در هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای حرارتی، به‌صورت یک معادله‌ی درجه دوم بیان می‌شود.

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i (P_{i,t})^2 \quad (2)$$

قیود مساله بهینه‌سازی در ادامه بیان می‌شود.

- قید توازن بار

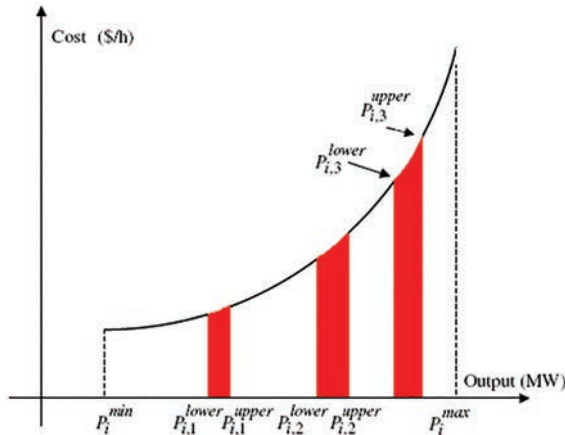
تولید در هر ساعت باید برابر با تقاضای آن ساعت به اضافه تلفات باشد. قید توازن توان را می‌توان در معادله زیر مشاهده نمود.

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,t}) * u_{i,t} = D_t + L_t \quad 1 \leq t \leq T, i \in N \quad (3)$$

- قید رزرو چرخان

بیشینه ظرفیت خروجی واحدهای روشن باید بزرگ‌تر یا مساوی تقاضا به اضافه تلفات و رزرو چرخان سیستم باشد. این رزرو برای برآورده‌سازی افزایش ناگهانی تقاضا یا قطع اجباری واحدهای تولیدی، مورد نیاز است. مقدار نیاز رزرو چرخان به‌طور معمول

بازه بین بیشینه و کمینه تولید خود نمی تواند تولید توان داشته باشد. به نواحی که در آن نیروگاه ها نمی تواند تولید توان داشته باشد، نواحی ممنوعه تولید گفته می شود. تأثیر ناحیه ممنوعه بر منحنی هزینه تولید یک نیروگاه نمونه در شکل (۱) آمده است. در این منحنی نواحی قرمز رنگ بیانگر نواحی ممنوعه هستند که ژنراتور نباید در این مناطق تولید توان داشته باشد.



شکل ۱: تأثیر ناحیه ممنوعه بر منحنی هزینه یک نیروگاه
رابطه ناحیه ممنوعه را می توان به کمک رابطه زیر نمایش داد:

$$\begin{cases} P_i \leq P_i \leq P_{i,1}^{Lower} \\ P_{i,j-1}^{Upper} \leq P_i \leq P_{i,j}^{Lower} \\ P_{i,PZ_i}^{Upper} \leq P_i \leq \bar{P}_i \end{cases}, j = 2, \dots, PZ_z \quad (11)$$

- قیود تولید توان توربین های بادی

تولید توان اکتیو توربین های بادی براساس سرعت باد در محل این توربین از رابطه (۱۲) به دست می آید [۲۲]:

$$P = \begin{cases} 0 & \begin{pmatrix} 0 < V_i < V_{ci} \\ V_i > V_{co} \end{pmatrix} \\ P_r \left(\frac{V_i - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} \right) & V_{ci} \leq V_i \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V_i \leq V_{co} \end{cases} \quad (12)$$

در اینجا فرض می شود، $V_r = 15m/s$, $V_{ci} = 5m/s$ و $V_{co} = 20m/s$ است. در این مقاله توربین بادی با تولید توان در توان نامی و ضریب توان ۰/۹۵ پس فاز در نظر می گیریم.

۲-۲- مدل سازی ریاضی برنامه ریزی مشارکت واحدها

هدف از برنامه ریزی مشارکت واحدها (UC) کسب برنامه ریزی مشارکت واحدها با کمترین هزینه ی تولید بدون تأثیر سوء بر قابلیت اطمینان یک سیستم است. قابلیت اطمینان یک سیستم به صورت برآورده کردن دو تابع کفایت و امنیت تفسیر می شود. مقدار کافی از ظرفیت منابع برای تأمین تقاضای بیشینه باید موجود باشد (کفایت) و سیستم باید بتواند تغییرات و پیشامدها را بر مبنای روزانه و ساعتی تحمل کند (امنیت).

UC را می توان به صورت یک مساله بهینه سازی که در آن هزینه های بهره برداری بر اساس هزینه های افزایشی حاصل از واحدهای تولید، کمینه می شود، بیان کرد. تابع هدف این مساله

به وسیله بیشترین ظرفیت یک یا دو واحد که بیشترین امکان تولید در سیستم را دارند یا با درصدی از اوج تقاضا در کل دوره زمان بندی یا درصدی از تقاضا در هر ساعت مشخص می شود. مقدار رزرو مورد نیاز در این مقاله به وسیله درصدی از بار در نظر گرفته می شود.

$$U_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{if } 1 \leq MU_i^{ON} < T_{i,t}^U \\ 0, & \text{if } -1 \geq MD_i^{OFF} > -T_{i,t}^D \\ 0 \text{ or } 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

- قیود واحدهای حرارتی

هر واحد حرارتی به تنهایی قیود مربوط به خودش را دارد که شامل محدوده کمترین و بیشترین تولید یک واحد، بیشینه نرخ افزایشی و کاهش، کمینه زمان روشن و خاموش بودن و محدودیت حالت واحدها است. جزئیات هر قیود در ادامه آمده است:

کمترین و بیشترین توان تولیدی واحدها

یک محدوده از خروجی های توان واحد به وسیله ی محدودیت خروجی ماشین یا محدوده خروجی اقتصادی تعیین می شود. به هر حال، محدوده های کمینه و بیشینه که خروجی واحدهای تولیدی را در هر واحد تولیدی و در یک ساعت خاص تعیین می کند، همان طور که در معادله (۵) نشان داده شده است می تواند در محدوده ی توان خروجی واحد براساس قیود نرخ شیب واحد تغییر داشته باشد.

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{max} * u_{i,t} \geq D_t + L_t + SRR_t, \quad 1 \leq t \leq T, i \in N \quad (5)$$

- بیشترین نرخ شیب کاهش

بیشترین نرخ شیب کاهش، بیشترین خروجی تولید است که بر اساس آن واحد i قادر به کاهش توان تولیدی در یک ساعت است. نرخ شیب کاهش، کمترین ظرفیت خروجی واحد i در ساعت t ($P_{i,t}^{min}$) را براساس معادله (۷) محدود می کند.

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq RDR_i \quad (6)$$

$$P_{i,t}^{min} * u_{i,t} \leq P_{i,t}^0 * u_{i,t} \leq P_{i,t}^{max} * u_{i,t}, \quad 1 \leq t \leq T, i \in N \quad (7)$$

- بیشترین نرخ شیب افزایشی

بیشترین نرخ شیب افزایشی، بیشترین خروجی تولید است که واحد براساس آن قادر به افزایش توان تولیدی در یک ساعت است. نرخ شیب افزایشی، بیشینه ظرفیت خروجی واحد i در ساعت t ($P_{i,t}^{max}$) را بر طبق معادله (۹) تعیین می کند.

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq RUR_i \quad (8)$$

$$P_{i,t}^{max} = \min(P_{i,t}^{max}, P_{i,t-1} + RUR_i) \quad (9)$$

کمترین زمان روشن و خاموش بودن واحد کمترین زمان روشن بودن واحد، کمترین ساعاتی است که واحد باید پس از روشن شدن به طور پیوسته روشن بماند. کمترین زمان خاموش بودن واحد، کمترین ساعاتی است که واحد باید پس از خاموش شدن، به طور پیوسته خاموش بماند.

$$U_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{if } 1 \leq MU_i^{ON} < T_{i,t}^U \\ 0, & \text{if } -1 \geq MD_i^{OFF} > -T_{i,t}^D \\ 0 \text{ or } 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

- قیود ناحیه ممنوعه

در برخی از موارد به دلیل محدودیت های فیزیکی، نیروگاه در تمامی

راه اندازی هر واحد بر کمترین زمان خاموشی آن واحد تقسیم می شود و به این ترتیب هزینه راه اندازی به صورت ساعتی در نظر گرفته می شود.

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_{i,t}(p_{i,t}) * u_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \frac{CSC_{i,t}}{T_i^D} * u_{i,t} * (1 - u_{i,t-1}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \frac{HSC_{i,t}}{T_i^D} * u_{i,t-1} * (1 - u_{i,t}) \right\} \quad (20)$$

روش پیشنهادی شامل پنج زیر مساله است که در شکل (۲) نشان داده شده است. در هر زیر مساله برخی از قیود مورد بررسی قرار می گیرند و سرانجام تابع هدف با تمام قیود و به وسیله الگوریتم PSO به کمترین مقدار خود نزدیک می شود [۲۳].

این زیر مساله ها به طور مفصل در زیر شرح داده شده اند:

– زیر مساله ی بررسی نرخ شیب و رزرو چرخان

این زیر مساله دو قید مهم از جمله نیاز رزرو چرخان و قید نرخ شیب را مورد بررسی قرار می دهد. در ابتدا یک جمعیت اولیه به منظور رسیدن به یک جواب بهینه، مورد نیاز است. این جمعیت اولیه چنان تولید می شود که قید رزرو چرخان برآورده شود و هر جمعیتی که بتواند این قید را (به عنوان یک تابع هدف) برآورده سازد، انتخاب می شود. پس از برآورده شدن قید رزرو چرخان قید نرخ شیب مورد بررسی قرار می گیرد. همان طور که می دانیم قید نرخ شیب، کران بالا یا پایین توان تولیدی هر واحد را براساس توان خروجی ساعت قبل مشخص می کند که این کران ها براساس معادلات (۷) و (۹) برآورده می شوند. در پایان این مرحله می توان مطمئن بود که نیاز رزرو چرخان و قید نرخ شیب برآورده شده اند.

– زیر مساله ی بررسی کمترین زمان روشن و خاموش بودن واحدها و قید ناحیه ممنوعه

در این زیر مساله قیود کمینه زمان روشن بودن (MUT) و کمینه زمان خاموش بودن (MDT) و قیود ناحیه ممنوعه مورد بررسی قرار می گیرند. تنها حالت آن واحدهایی که قیود MUT/MDT و ناحیه ممنوعه را برآورده می سازند می تواند تغییر کند، درحالی که حالت بقیه واحدها ثابت می ماند؛ بنابراین زمانی که واحدی بر اساس کمینه زمان روشن بودن باید روشن بماند، ولی در جمعیت موجود این واحد خاموش در نظر گرفته شده است، این واحد را روشن نموده و هیچ مشکلی برای امکان پذیری این جمعیت به وجود نمی آید. زیرا با این کار مقدار ظرفیت تولید را اضافه کرده ایم. اما زمانی که واحدی بر اساس کمینه زمان خاموش بودن واحد باید خاموش بماند، ولی در جمعیت موجود این واحد روشن در نظر گرفته شده است، به سادگی نمی توان این واحد را خاموش نمود، زیرا ممکن است این جمعیت اصلاح شده به یک جمعیت غیرممکن تبدیل شود که در این صورت یک جمعیت جدید جایگزین این جمعیت می نماییم. که این شرط را برآورده سازد. همچنین در تشکیل جمعیت، قیود ناحیه ممنوعه بررسی می شود.

– زیر مساله ی بررسی T_i^D ساعت آتی

پس از برآورده شدن برخی از قیود همچون SR و RR و حداقل زمان خاموش و روشن بودن واحد، اگر واحدی (واحد i ام) نیاز به خاموش شدن داشته باشد، تقاضای T_i^D ساعات آینده مورد بررسی قرار می گیرد. هنگامی که یک واحد خاموش می شود، حالتش نمی تواند به اندازه ی T_i^D ساعت تغییر کند. بنابراین امکان

همانند مساله UC است و تنها تفاوت این مساله با مساله UC در تعداد قیودی است که مورد بررسی قرار می گیرند. قیود و شرایط مورد بررسی در مشارکت امنیت- مقید واحدها عبارتند از: توازن بار، نیاز رزرو چرخان، نیاز ذخیره بهره برداری سیستم، شرایط آغازین، قیود کمینه و بیشینه توان تولیدی واحدها، قیود بیشینه نرخ شیب کاهشی و بیشینه نرخ شیب افزایشی، قیود کمینه زمان روشن و خاموش بودن واحدها، قید محدودیت حالت واحدها، حد انتقال توان از یک شین به شین دیگر، نیاز ذخیره بهره برداری توان راکتیو، حدود توان راکتیو تولیدی و تعادل شین بار، حدود ولتاژ و تپ ترانسفورماتورها. در ادامه آن قیودی که در مدل سازی برنامه ریزی تولید واحدها بررسی نشده اند را مورد بررسی قرار می دهیم.

– نیاز رزرو بهره برداری سیستم

بارهای قابل قطع به طور معمول به ظرفیت بهره برداری واحدها (طرف چپ رابطه ۱۴) اضافه می شوند و نیاز بهره برداری، به صورت یک مقدار پایه به علاوه سهمی از نیاز بار و سهمی از حد بالای بهره برداری مربوط به بزرگ ترین واحد در مدار، تعریف می شود.

$$\sum_{i=1}^{N_t} p_{i,t}^o U_{i,t} \geq ORR_t \quad t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$r_o(i,t) = \begin{cases} q(i) & \text{if unit } i \text{ is off} \\ r_s(i,t) & \text{if unit } i \text{ is on} \end{cases} \quad (14)$$

– حد انتقال توان از شین k به شین m

مقدار توان انتقالی از خطوط و یا به عبارت دیگر از هر شین به شین دیگر بر اساس فیزیک سیستم و به تولید واحد و کنترل تغییردهنده فاز، بستگی دارد.

$$-P_{km}^{\max} \leq P_{km,t} \leq P_{km}^{\max} \quad (15)$$

نیاز ذخیره بهره برداری توان راکتیو

$$\sum_{i=1}^N Q_{g \max}(i) U_{i,t} \geq Q_D(t) \quad (16)$$

حدود توان راکتیو تولیدی و تعادل شین بار

$$Q_G^{\min} U_t \leq Q_G(t) = F_1(V) \leq Q_G^{\max} U_t \quad (17)$$

$$Q_L(t) = F_2(V) \quad (18)$$

حدود ولتاژ و تپ ترانسفورماتورها

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \\ T^{\min} \leq T \leq T^{\max} \quad (19)$$

۳- پیاده سازی

در این مقاله دو سناریو مورد مطالعه و ارزیابی قرار می گیرد. برنامه ریزی تولید واحدها با ملاحظه قیود مسئله در حضور توربین های بادی و عدم حضور آن ها مورد مطالعه قرار می گیرد. در این قسمت به ارائه روشی در زمان بندی واحدها پرداخته شده است. به طور معمول برای انتخاب زمان بندی واحدها تابع هدف به صورت معادله (۱) در نظر گرفته می شود و در برخی از مطالعات این تابع به صورت ساده تر، یعنی بدون در نظر گرفتن هزینه راه اندازی و خاموشی واحدها در نظر گرفته می شود. در این قسمت از یک تابع هدف جدید استفاده می شود که در واقع در این تابع هدف هزینه راه اندازی به صورت ساعتی در نظر گرفته می شود. تابع هدف جدید به صورت معادله (۲۰) هست.

در این تابع هدف همان طور که مشاهده می شود هزینه های

دارد انتخاب کنیم؛ بنابراین در مسائل زمان‌بندی، یک تابع هدف نیاز است که در روش پیشنهادی تابع هدف به‌صورت معادله (۲۳) تعریف شود.

تمام زیر مساله‌های زیر در مدت‌زمان برنامه‌ریزی تکرار می‌شوند. پس از مشخص نمودن حالت‌های همه واحدهای تولیدی، قیمت بهره‌برداری واقعی محاسبه خواهد شد.

۴- شبیه‌سازی مطالعات موردی و تجزیه و تحلیل نتایج ۴-۱- سناریو نخست

در این سناریو روش پیشنهادی به سیستم تست رایج ۱۰ واحد استاندارد اعمال می‌شود. تغییرات بار و داده‌های واحدها به همراه ناحیه ممنوعه آنها برای سیستم ۱۰ واحد در جدول (الف-۱) در ادامه آمده است. نتایج حالت واحدها و زمان‌بندی تولید سیستم ۱۰ واحد در جدول (۱) نشان داده شده است. برای همه سیستم‌ها رزرو چرخان ۱۰ درصد تقاضای بار در هر ساعت است.

در این حالت هزینه شبیه‌سازی ۵۶۴۸۵۵ دلار است. در مرجع [۱۱] هزینه این مدل‌سازی ۵۶۵۴۶۵/۵ به‌دست آمده که در مقایسه با جواب بهینه شبیه‌سازی مقاله ۶۱۰/۵ دلار بهبود داشته است.

با در نظر گرفتن محدودیت ناحیه ممنوعه بر اساس جدول (الف-۱)، نتایج به‌صورت جدول (۲) به‌دست می‌آید. این در حالی است که تولید واحد (۱) و (۸) به ترتیب در ساعت ۱ و ۱۲ وارد ناحیه ممنوعه می‌شود که توسط الگوریتم این مساله به کمک افزایش تولید واحد ۲ و ۹ در ساعت‌های بیان شده برطرف می‌شود. در این حالت هزینه به ۵۶۴۷۱۴ دلار می‌رسد که نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن ناحیه ممنوعه ۱۱ دلار افزایش می‌یابد. در مرجع [۱۱] هزینه این مدل‌سازی ۵۶۵۴۷۲/۷ به‌دست آمده که در مقایسه با جواب بهینه شبیه‌سازی مقاله ۷۵۸/۷ دلار بهبود داشته است.

۴-۲- سناریو دوم

در این سناریو، سناریو نخست با در نظر گرفتن توربین‌های بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فرضیات و محدودیت‌های حل مساله در این قسمت عبارت است از:

یک مزرعه بادی با ظرفیت ۱۰ MW متشکل از ۴ توربین بادی ۲/۵ مگاوات با تابع احتمالاتی تولید توان ویبل فرض می‌شود [۲۴]. تابع تولید توان احتمالاتی هر توربین بادی از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$f(v, k, c) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (21)$$

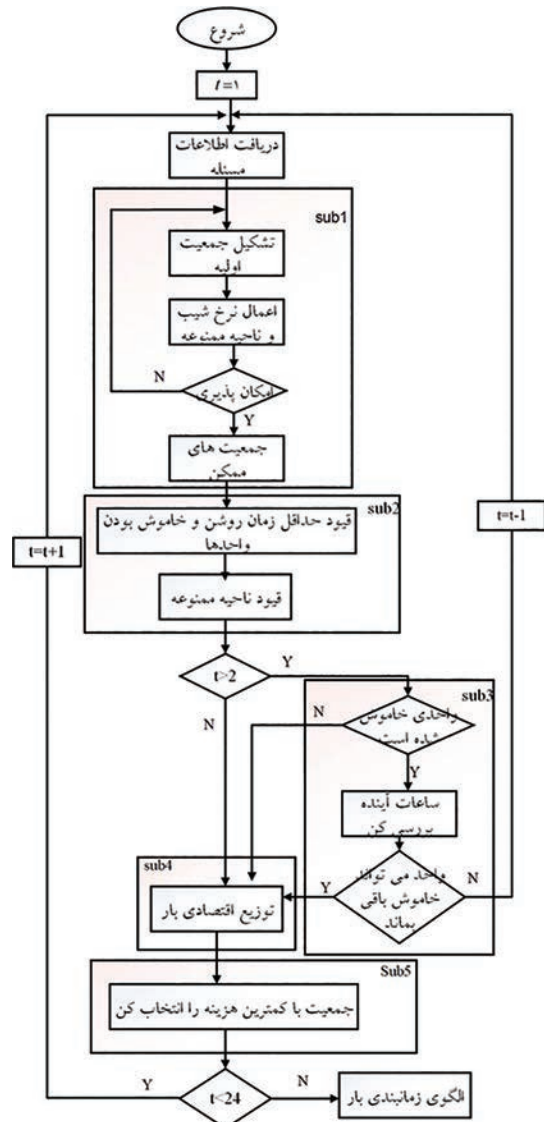
$$F(v, k, c) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (22)$$

که در آن ضریب k و c به ترتیب ۱/۶۹ و ۴ است [۲۴] که در شکل (۳) منحنی تابع توزیع احتمالاتی آن نشان داده شده است.

میزان توان تولیدی در ۲۴ ساعت بر اساس منحنی شکل (۳) در چهار توربین بادی در شکل (۴) آمده است.

نتایج حاصل از UC در حضور WT در جدول (۳) آمده است. هزینه عملکردی در یک دوره ۲۴ ساعته در این سناریو برابر ۵۸۰۵۲۱ دلار است. با مقایسه نتایج سناریو نخست و دوم حدود ۱۵۶۶۶ دلار صرفه‌جویی اقتصادی در ۲۴ ساعت داشته‌ایم که رقم قابل توجهی است.

شکل (۵) بیانگر میزان رزروی است که در حضور توربین‌های بادی نسبت به عدم حضور آن در شبکه بیشتر است. آنچه واضح است، در حضور WT سطح رزرو بالاتری داریم که خود بیانگر قابلیت



شکل ۲: فلوچارت روش پیشنهادی

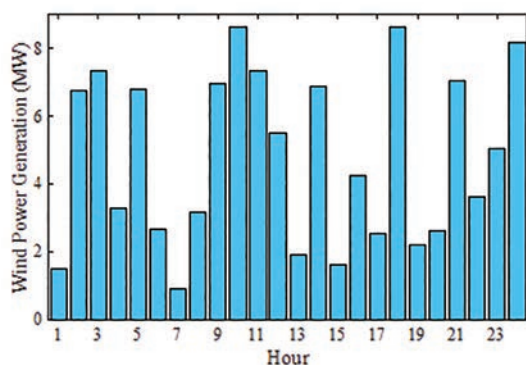
برآورده شدن بارهای T_i^D ساعت آتی، بدون در نظرگیری این واحد بررسی می‌شود. اگر شرایط برآورده نشوند، زمان برنامه‌ریزی یک ساعت به قبل بازگشته و برنامه‌ریزی برای این ساعت با روشن در نظر گرفتن این واحد انجام می‌پذیرد. این فرآیند زمان‌بندی برنامه‌ریزی تولید واحدها را در کل ساعات افق برنامه‌ریزی تضمین می‌کند.

- زیر مساله‌ی توزیع اقتصادی بار

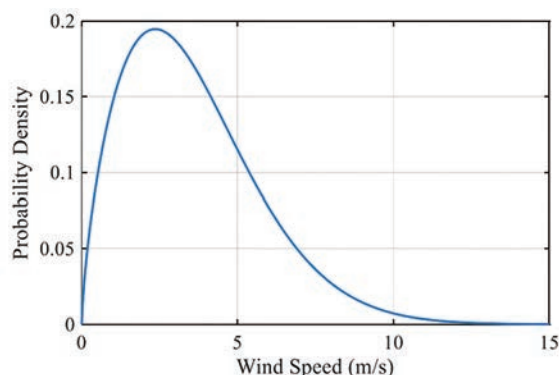
برنامه‌ریزی تولید واحدها و توزیع اقتصادی بار، هنگامی که باهم ترکیب می‌شوند، یک ابزار مفید برای یافتن اقتصادی‌ترین زمان‌بندی است. توزیع اقتصادی بار خروجی همه‌ی واحدهای روشن را، با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی کل بهره‌برداری در یک ساعت مشخص طوری تعیین می‌کند که قید توازن بار و قید حدود خروجی واحدها برآورده شود. روش تکرار لامبدا در این مورد مطالعاتی برای توزیع اقتصادی بار مورد استفاده قرار گرفته است.

- زیر مساله‌ی یافتن کمترین هزینه

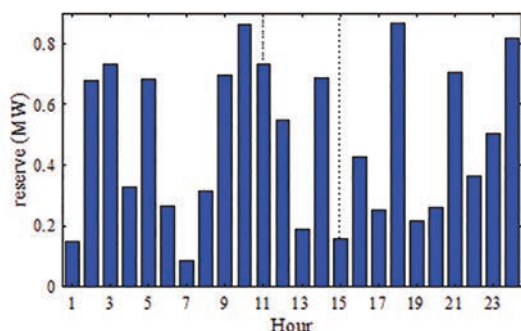
در مراحل قبل تمامی قیود برآورده شده‌اند و در این مرحله از بین جمعیت‌های موجود باید آن جمعیتی که کمترین هزینه را



شکل ۴: توان تولیدی توسط توربین بادی



شکل ۳: تابع توزیع تولید توان در توربین بادی



شکل ۵: تفاضل رزرو سناریو اول و دوم

بنابراین نصب ۱۰ MW توربین بادی که حدود ۲ درصد کمینه بار ۲۴ ساعته (۷۰۰ MW) است، توجیه اقتصادی و فنی دارد.

اطمینان بالاتر در این شبکه‌ها است. از طرفی واحد شماره (۱۰) که تنها در ساعت ۱۲ در عدم حضور WT تولید توان دارد، با حضور WT این واحد دیگر وارد مدار نمی‌شود.

بنابراین توربین بادی علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، شبکه با قابلیت اطمینان بالاتری را فراهم می‌آورند. از طرفی هزینه نصب توربین‌های بادی از رابطه $A_p + B_p P_{rated}$ به دست می‌آید که در آن $A_p = -0.173$ و $B_p = +0.9966$ است [۲۴]. P_{rate} ظرفیت نامی توربین بادی برحسب کیلووات است و هزینه محاسبه شده برحسب کیلو دلار است. بنابراین هزینه چهار توربین بادی ۲،۵ MW در مجموع برابر ۹۹۶۵۰۰ دلار است. با توجه به اینکه در ۲۴ ساعت حدود ۱۵۶۶۶ دلار صرفه‌جویی اقتصادی داشتیم؛ از این‌رو در ۶۳۶ روز بازگشت سرمایه داریم که کمتر از ۲ سال است.

جدول ۱: زمان‌بندی تولید برای سیستم ۱۰ واحد (مگاوات)

ساعت	تقاضا	واحد								
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۷۰۰	۴۵۵	۲۴۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۷۵۰	۴۵۵	۲۹۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۸۵۰	۴۵۵	۳۷۰	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۴	۹۵۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱۰۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۷۰	۲۰	۰	۰	۰
۶	۱۱۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۱۳۰	۴۰	۲۰	۰	۰	۰
۷	۱۱۵۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۱۳۰	۹۰	۲۰	۰	۰	۰
۸	۱۲۰۰	۴۵۵	۴۴۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۲۰	۰	۰	۰
۹	۱۳۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۱۰	۱۴۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۳۳	۲۵	۱۰	۰
۱۱	۱۴۵۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۷۳	۲۵	۱۰	۱۰
۱۲	۱۵۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۲۵	۴۳	۱۰
۱۳	۱۴۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۳۳	۲۵	۱۰	۰
۱۴	۱۳۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۱۵	۱۲۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	۱۰۵۰	۴۵۵	۳۱۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۱۷	۱۰۰۰	۴۵۵	۲۶۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۱۸	۱۱۰۰	۴۵۵	۳۶۰	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰
۱۹	۱۲۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
۲۰	۱۴۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۳۳	۲۵	۱۰	۰
۲۱	۱۳۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۲۲	۱۱۰۰	۴۵۵	۴۵۵	۰	۰	۱۴۵	۲۰	۲۵	۰	۰
۲۳	۹۰۰	۴۵۵	۴۲۵	۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰
۲۴	۸۰۰	۴۵۵	۳۴۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۲: زمان بندی تولید برای سیستم ۱۰ واحد (مگاوات) با در نظر گرفتن ناحیه ممنوعه

ساعت	واحد									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۴۴۷,۹۹۹۹	۲۵۲,۰۰۰۱	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲	۴۵۵,۰	۲۹۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۳	۴۵۵,۰	۲۶۵,۰	۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۴	۴۵۵,۰	۲۳۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۵	۴۵۵,۰	۲۸۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۶	۴۵۵,۰	۳۵۹,۹	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۷	۴۵۵,۰	۴۱۰,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۸	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۹	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۸۴,۹	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۰	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۳۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۱	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۷۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۱۰,۰	۰,۰
۱۲	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۸۰,۰	۲۵,۰	۳۹,۹۹۹۹	۱۲,۹۰۱	۱۰,۰
۱۳	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۳۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۴	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۸۴,۹	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۵	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۶	۴۵۵,۰	۳۰۹,۹	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۷	۴۵۵,۰	۲۶۰,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۸	۴۵۵,۰	۳۵۹,۹	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۹	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۰	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۱۶۲,۰	۳۲,۹	۲۵,۰	۱۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۱	۴۵۵,۰	۴۵۵,۰	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۸۴,۹	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۲	۴۵۵,۰	۳۴۰,۱	۱۳۰,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۲۰,۰	۲۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۳	۴۵۵,۰	۳۱۵,۰	۱۳۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۲۴	۴۵۵,۰	۳۴۵,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰

جدول ۳: زمان بندی تولید برای سیستم ۱۰ واحد (مگاوات) با در نظر گرفتن ناحیه ممنوعه و توربین بادی

ساعت	واحد										تقاضا
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
۱	۴۵۵	۲۴۵,۵۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۰۰,۰
۲	۴۵۵	۲۹۳,۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۵۰,۰
۳	۴۵۵	۳۶۵,۴۹	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۸۵۰,۰
۴	۴۵۵	۴۳۰	۰	۰	۵۸,۵۲	۰	۰	۰	۰	۰	۹۵۰,۰
۵	۴۵۵	۳۸۵,۲۸	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰,۰
۶	۴۵۵	۳۵۵,۱۶	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۰۰,۰
۷	۴۵۵	۳۸۵,۱	۱۳۰	۱۳۰	۲۴,۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۵۰,۰
۸	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۲۲,۴۷	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۰۰,۰
۹	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۸۱,۱	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۳۰۰,۰
۱۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰	۲۵	۱۹,۷	۰	۰	۱۴۰۰,۰
۱۱	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۲۵	۱۰,۸	۰	۰	۱۴۵۰,۰
۱۲	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۷۰,۱	۵۵	۵۵	۰	۱۵۰۰,۰
۱۳	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰	۲۵	۱۹,۱	۰	۰	۱۴۰۰,۰
۱۴	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۷۹,۱	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۳۰۰,۰
۱۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۲۳,۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۰۰,۰
۱۶	۴۵۵	۳۰۶,۳۱	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۵۰,۰
۱۷	۴۵۵	۳۸۳,۱۷	۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰,۰
۱۸	۴۵۵	۳۵۶,۲۹	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۰۰,۰
۱۹	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۲۱,۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۰۰,۰
۲۰	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰	۲۵	۱۹,۶۵	۰	۰	۱۴۰۰,۰
۲۱	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۷۹,۱	۲۰	۲۵	۰	۰	۰	۱۳۰۰,۰
۲۲	۴۵۵	۳۵۴,۹۳	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۰۰,۰
۲۳	۴۵۵	۴۱۷,۶۴	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۹۰۰,۰
۲۴	۴۵۵	۳۲۰,۲۳	۰	۰	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۸۰۰,۰

جدول الف-۱: داده‌های مربوط به سیستم ۱۰ واحدی

واحد	Pmin	Pmax	a	b	c	T ^U	T ^D	HSC	CSC	CST	Init hour	POZ
۱	۱۵۰	۴۵۵	۱۰۰۰	۱۶,۱۹	۰,۰۰۰۴۸	۸	۸	۴۵۰۰	۹۰۰۰	۵	۸	[۱۶۵ ۱۵۰] [۴۵۳ ۴۴۸]
۲	۱۵۰	۴۵۵	۹۷۰	۱۷,۲۶	۰,۰۰۳۱	۸	۸	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵	۸	[۱۱۰ ۹۰] [۲۵۰ ۲۴۰]
۳	۲۰	۱۳۰	۷۰۰	۱۶,۶	۰,۰۰۲	۵	۵	۵۵۰	۱۱۰۰	۴	-۵	-
۴	۲۰	۱۳۰	۶۸۰	۱۶,۵	۰,۰۰۲۱۱	۵	۵	۵۶۰	۱۱۲۰	۴	-۵	-
۵	۲۵	۱۶۲	۴۵۰	۱۹,۷	۰,۰۰۳۹۸	۶	۶	۹۰۰	۱۸۰۰	۴	-۶	-
۶	۲۰	۸۰	۳۷۰	۲۲,۲۶	۰,۰۰۷۱۲	۳	۳	۱۷۰	۳۴۰	۲	-۳	-
۷	۲۵	۸۵	۴۸۰	۲۷,۷۴	۰,۰۰۷۹	۳	۳	۲۶۰	۵۲۰	۲	-۳	-
۸	۱۰	۵۵	۶۶۰	۲۵,۹۲	۰,۰۰۴۱۳	۱	۱	۳۰	۶۰	۰	-۱	[۳۰ ۲۰] [۴۵ ۴۰]
۹	۱۰	۵۵	۶۶۵	۲۷,۲۷	۰,۰۰۲۲۲	۱	۱	۳۰	۶۰	۰	-۱	-
۱۰	۱۰	۵۵	۶۷۰	۲۷,۷۹	۰,۰۰۱۷۳	۱	۱	۳۰	۶۰	۰	-۱	[۱۷ ۱۲] [۴۵ ۳۵]

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برنامه‌ریزی تولید واحدها با بررسی بار ساعت‌های آتی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در ادامه مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن قیود ناحیه ممنوعه و توربین بادی مورد مطالعه قرار گرفت. با در نظر گرفتن این قید ناحیه ممنوعه، هزینه مساله زمان‌بندی تولید، درصد ناچیزی افزایش می‌یابد؛ ولی باعث جلوگیری از آسیب‌های جدی به محور توربو ژنراتور می‌گردد. با در نظر گرفتن توربین بادی علاوه بر کاهش هزینه، قابلیت اطمینان UC به دلیل افزایش رزرو افزایش می‌یابد.

۶- علائم و اختصارات

مقدار رزرو بهره‌برداری مورد نیاز در زمان t	ORR _t
حد نرخ شیب افزایشی واحد i ام	RUR _i
حد نرخ شیب کاهشی واحد i ام	RDR _i
ضریب هزینه بهره‌برداری و نگهداری واحد i ام در زمان t	M
نوع سوخت مصرفی	FT
بیشترین مصرف سوخت برای سوخت نوع	F ^{max} (FT)
کمترین مصرف سوخت برای سوخت نوع	F ^{min} (FT)
مقدار سوخت راه‌اندازی واحد i ام در زمان t	S _{ij} ^f
دوره زمانی که در آن واحد i ام به طور متوالی خاموش بوده است.	MD _{ij} ^{OFF}
مدت زمان راه‌اندازی سرد	CST _i
تعداد واحدها	N
افق زمانی برنامه‌ریزی تولید واحدها	T
ثابت زمانی در تابع‌نمایی مربوط به هزینه راه‌اندازی	τ _i
ضرایب تابع هزینه راه‌اندازی	ν _i , ξ _i
توان نامی توربین بادی	P _r
سرعت باد در محل توربین i ام	V _i
ضرایب مربوط به آلودگی	α _i , β _i , γ _i
ضریب هزینه بهره‌برداری و نگهداری	M
نیاز رزرو بهره‌برداری	ORR _t
تعداد ناحیه ممنوعه	Z _i

توان خروجی واحد i ام در زمان t	P _{ij} ^o
حالت خاموش یا روشن بودن واحدها	u _{ij}
ضرایب هزینه سوخت واحد i ام	a _i , b _i , c _i
هزینه راه‌اندازی واحد i ام در زمان t	SUC _{ij}
هزینه خاموش کردن واحد i ام در زمان t	SDC _{ij}
هزینه راه‌اندازی گرم واحد i ام	HSC _i
هزینه راه‌اندازی سرد واحد i ام	CSC _i
کمینه زمان روشن بودن واحد i در زمان t	T _{ij} ^U
کمینه زمان خاموش بودن واحد i در زمان t	T _{ij} ^D
دوره زمانی که در آن واحد i ام به طور متوالی روشن بوده است.	MD _{ij} ^{ON}
تقاضا در ساعت t	D _t
مقدار رزرو چرخان مورد نیاز در زمان t	SRR _t

- [13] B. Zhao, A. J. Conejo, and R. Sioshansi, "Unit Commitment Under Gas-Supply Uncertainty and Gas-Price Variability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, pp. 2394-2405, 2017.
- [14] G. Morales-España, Á. Lorca, and M. M. de Weerd, "Robust unit commitment with dispatchable wind power," *Electric Power Systems Research*, vol. 155, pp. 58-66, 2018/02/01/ 2018.
- [15] J. Li, F. Liu, Z. Li, S. Mei, and G. He, "Impacts and benefits of UPFC to wind power integration in unit commitment," *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 570-583, 2018/02/01/ 2018.
- [16] C. Salvini and S. Monacchia, "A Memetic Computing Approach for Unit Commitment with Energy Storage Systems," *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 377-382, 2017/02/01/ 2017.
- [17] M. J. Abdollahi and M. Moazzami, "Day-Ahead Coordination of Vehicle-to-Grid Operation and Wind Power in Security Constraints Unit Commitment (SCUC)," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 6, pp. 49-56, 2015.
- [18] K. Poncelet, E. Delarue, and W. D'haeseleer, "Unit commitment constraints in long-term planning models: Relevance, pitfalls and the role of assumptions on flexibility," *Applied Energy*, vol. 258, p. 113843, 2020.
- [19] M. Nemat, M. Braun, and S. Tenbohlen, "Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming," *Applied energy*, vol. 210, pp. 944-963, 2018.
- [20] E. Zarei, M. H. Hemmatpour, and M. Mohammadian, "The effects of demand response on security-constrained unit commitment," *Scientia Iranica*, vol. 26, pp. 1627-1636, 2019.
- [21] M. H. Hemmatpour, E. Zarei, and M. Mohammadian, "Incorporating wind power generation and demand response into security-constrained unit commitment," *AUT Journal of Electrical Engineering*, vol. 50, pp. 141-148, 2018.
- [22] M. H. Hemmatpour, "Optimum interconnected islanded microgrids operation with high levels of renewable energy," *Smart Science*, vol. 7, pp. 47-58, 2019.
- [23] M. Tajdinian, M. Z. Jahromi, M. H. Hemmatpour, P. Dehghanian, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Enhancing Transient Stability of Distribution Networks With Massive Proliferation of Converter-Interfaced Distributed Generators," *IEEE Systems Journal*, pp. 1-12, 2020.
- [24] M. H. Hemmatpour and M. H. R. Koochi, "Efficient Wind Turbine Generation Planning for Decreasing Distribution System Company Payments in Real Applications," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020.

حد بالای ناحیه λ م منطقه ممنوعه λ م $P_{i,j}^{upper}$
 حد پایین ناحیه λ م منطقه ممنوعه λ م $P_{i,j}^{lower}$
 حداقل سرعت باد که در آن توربین بادی تولید توان دارد. V_{ci}
 حداکثر سرعت باد که در آن توربین بادی تولید توان دارد. V_{co}

۷- مراجع

- [1] A. J. Conejo and L. Baringo, "Unit Commitment and Economic Dispatch," in *Power System Operations*, ed: Springer, 2018, pp. 197-232.
- [2] S. Chondrogiannis, M. Poncela-Blanco, A. Marinopoulos, I. Marneris, A. Ntomaris, P. Biskas, et al., "Power system flexibility: A methodological analytical framework based on unit commitment and economic dispatch modelling," in *Mathematical Modelling of Contemporary Electricity Markets*, ed: Elsevier, 2021, pp. 127-156.
- [3] H. Abdi, "Profit-based unit commitment problem: A review of models, methods, challenges, and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 110504, 2020.
- [4] M. Häberg, "Fundamentals and recent developments in stochastic unit commitment," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 38-48, 2019.
- [5] F. Barani, M. Mirhosseini, H. Nezamabadi-pour, and M. M. Farsangi, "Unit commitment by an improved binary quantum GSA," *Applied Soft Computing*, vol. 60, pp. 180-189, 2017/11/01/ 2017.
- [6] S. Fattahi, M. Ashraphijuo, J. Lavaei, and A. Atamtürk, "Conic relaxations of the unit commitment problem," *Energy*, vol. 134, pp. 1079-1095, 2017/09/01/ 2017.
- [7] L. K. Panwar, S. Reddy K, A. Verma, B. K. Panigrahi, and R. Kumar, "Binary Grey Wolf Optimizer for large scale unit commitment problem," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 38, pp. 251-266, 2018/02/01/ 2018.
- [8] B. Fu, C. Ouyang, C. Li, J. Wang, and E. Gul, "An Improved Mixed Integer Linear Programming Approach Based on Symmetry Diminishing for Unit Commitment of Hybrid Power System," *Energies*, vol. 12, p. 833, 2019.
- [9] J. Zhao, S. Liu, M. Zhou, X. Guo, and L. Qi, "An improved binary cuckoo search algorithm for solving unit commitment problems: Methodological description," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43535-43545, 2018.
- [10] V. Kumar and D. Kumar, "Binary whale optimization algorithm and its application to unit commitment problem," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, pp. 2095-2123, 2020.
- [11] N. Kumar, B. K. Panigrahi, and B. Singh, "A solution to the ramp rate and prohibited operating zone constrained unit commitment by GHS-JGT evolutionary algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 193-203, 2016/10/01/ 2016.
- [12] S. Pan, J. Jian, and L. Yang, "Solution to dynamic economic dispatch with prohibited operating zones via MILP," *arXiv preprint arXiv:1704.01801*, 2017.



مقاله علمی-ترویجی

تعیین موقعیت و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن حالت‌های کاری منابع مبتنی بر الگوریتم حرکت جمعی ذرات بهبود یافته جهت کاهش تلفات توان و بهبود نمایه ولتاژ

■ ناصر طاهری^{*}، عضو هیات علمی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران-ایران

■ علی صفایی، دانشگاه علوم تحقیقات واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

■ صادق بهزادی، دانشگاه چمران اهواز، پردیس صنعتی شهدای هوپزه، اهواز، ایران

■ فرامرز ابراهیمی، گروه مهندسی برق، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

^{*} نویسنده مسئول

چکیده

با افزایش نفوذ منابع DG در سیستم‌های توزیع، عملکرد این سیستم‌ها از حالت غیرفعال به حالت فعال تغییر کرده و امکان تبادل دو طرفه توان بین شبکه اصلی و شبکه توزیع فراهم شده است. بهره‌برداری از منابع DG در سیستم توزیع در صورتی دارای مزایای اقتصادی-تکنیکی است که موقعیت نصب و ظرفیت تولیدی آنها که تحت تاثیر حالت کاری (قابلیت DG در تبادل هر دو مولفه توان فعال و واکنشی) و استراتژی کنترلی به کار گرفته شده در مبدل‌ها است، به صورت بهینه انتخاب شود. در این مقاله روشی برای حل مساله جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG (OPSDG) در شبکه‌های توزیع ارائه خواهد شد که در آن از مدل تزریق جریان بار برای مدل‌سازی DG‌ها استفاده شده و حالت کاری منابع نیز لحاظ می‌گردد. این مدل، تاثیر استراتژی کنترلی مبدل‌ها بر حل مساله را به کمترین مقدار ممکن می‌رساند. در روش مورد بحث این مقاله تابع هدف، ترکیبی وزن‌دار از شاخص‌های نمایه ولتاژ و کاهش تلفات توان است. برای بهینه‌سازی تابع هدف، الگوریتم ترکیبی حرکت ذرات تصحیح شده ارائه می‌شود. تصحیح الگوریتم از طریق بکارگیری عملگرهای ترکیب و جهش دینامیکی برای مجموعه ذرات انجام خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تحت استراتژی ارائه شده این مقاله، نمایه ولتاژ و تلفات توان اکتیو در حالت بهینه قرار خواهند داشت.

کلمات کلیدی: جایابی و تعیین ظرفیت بهینه، تولید پراکنده، الگوریتم حرکت جمعی ذرات تصحیح شده

DG Optimal Allocation and Sizing in Distribution Systems Considering the Working Modes of the Resources Based on the Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm to Reduce Power Losses and Improve the Voltage Profile

■ Naser Taheri^{*}, Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

■ Ali Safaee, Department of Electrical Engineering, Kermanshah Research University of Sciences, Kermanshah, Iran

■ Sadegh Behzadi, Department of Electrical Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Ahvaz, Iran.

■ Faramarz Ebrahimi, Department of Electrical Engineering, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan

^{*}Corresponding Author

Abstract

With the increasing penetration of DG resources in distribution systems, the performance of these systems has changed from passive to active mode and the possibility of two-way power exchange between the main network and the distribution network has been provided. The use of DG resources in the distribution system has economic-technical advantages if their installation location and production capacity, which are influenced by the working mode (the ability of DG to exchange both active and reactive power components) and the control strategy used in the converters, be optimally selected. In this article, a method will be presented to solve the placement problem and determine the optimal capacity of DG resources (OPSDG) in distribution networks, in which the load flow injection model is used to model DGs and the working state of the resources is also considered. This model minimizes the influence of the control strategy of converters on solving the problem. In the method discussed in this article, the objective function is a weighted combination of voltage profile indicators and power loss reduction. To optimize the objective function, the enhanced algorithm of particle swarm optimization algorithm is presented. The enhancement of the algorithm will be done through the use of crossover and dynamic mutation operators for the set of particles. The simulation results show that under the strategy presented in this article, the voltage profile and active power losses will be in the optimal state.

Keywords: DG optimal allocation and sizing, Distributed generation, Enhanced particle swarm optimizations

۱- مقدمه

رشد تصاعدی تقاضای انرژی در چند دهه اخیر باعث شده است تا تلفات توان الکتریکی و افت ولتاژ در سیستم‌های توزیع افزایش یابد. بیشتر شبکه‌های توزیع یا به صورت شعاعی بوده و یا شبکه‌ای ضعیف هستند [۱-۳]. در نتیجه، تلفات خط و افت ولتاژ مرتبط با انتهای فیدرها، به دلیل نسبت بالای R به X سیستم‌های توزیع، قابل توجه است. علاوه بر این، شبکه‌های توزیع متمرکز بوده و به صورت یک طرفه از طریق شبکه اصلی (که شامل نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی هستند) تغذیه می‌شوند. بنابراین شبکه‌های توزیع بر گسیل آلاینده‌های زیست محیطی نیز موثر هستند [۴-۶]. با ظهور فناوری شبکه هوشمند (Smart Grid) و منابع تولید پراکنده (Distributed Generation)، تغییرات گسترده‌ای در شبکه‌های توزیع به وجود آمده است. تولید پراکنده به معنای استفاده از نیروگاه‌هایی با واحدهای تولیدی مقیاس کوچک و انعطاف‌پذیر است که به طور معمول در ساختار خود از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان محرک اولیه ژنراتور استفاده می‌کنند.

ظرفیت پایین تولید در منابع DG و وابستگی آن به عدم قطعیت‌های متعدد باعث شده است تا بیشتر این نیروگاه‌ها در محل مصرف‌کننده (بار) نصب شوند [۷-۹]. از جمله مهم‌ترین مزایای منابع DG می‌توان به جبران‌سازی سریع توان از دست رفته در سیستم، عدم نیاز به ایجاد پست‌های جدید توان، کاهش تلفات توان، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در احداث خطوط انتقال جدید، بهبود بازار برق در محیط تجدید ساختار یافته، تغذیه بارهای محلی و دوردست و ... اشاره نمود [۱۰-۱۴].

استفاده از DG ها در شبکه توزیع باعث تغییر پیکربندی شعاعی سیستم خواهد شد. در صورت نفوذ منابع DG در شبکه توزیع، سیلان مولفه‌های توان (فعال و غیرفعال) دستخوش تغییر شده و نمایه ولتاژ نیز به همان نسبت تغییر خواهد کرد. همچنین شبکه از سیستم غیرفعال به سیستمی فعال تبدیل شده و این مهم بر جریان خطا، جریان بار و سیستم حفاظتی شبکه اثرگذار خواهد بود. لازم به ذکر است که عدم قطعیت موجود در محرک‌های اولیه منابع DG تشدید کننده موارد بیان شده هستند [۱۷-۱۵]. از این رو به منظور بهره بردن از بیشترین ویژگی‌های مثبت منابع

DG، جابجایی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG^3 در شبکه‌های توزیع غیر قابل اجتناب است، به طوری که تحقیقات نشان می‌دهند اگر این فرایند مهم در نصب منابع تولید پراکنده در نظر گرفته نشود، نه تنها اهداف و ویژگی‌های مثبت مد نظر از نصب منابع تولید پراکنده حاصل نمی‌گردند، بلکه ممکن است وضعیت عملکرد شبکه بدتر از حالت قبل از نصب (منابع) نیز شود [۲۰-۱۸].

در این مقاله روشی مبتنی بر به کارگیری الگوریتم حرکت جمعی ذرات به همراه راهکارهای افزایش قابلیت این الگوریتم در جهت حل مساله جابجایی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG ارائه می‌شود. همگرایی سریع به نقاط اکسترمم محلی و تاثیرپذیری از سرعت و موقعیت ذرات بهینه مطلق جهت حرکت جمعی ذرات از مهم‌ترین چالش‌های الگوریتم PSO محسوب می‌شوند. در این مقاله با استفاده از عملگرهای پیشنهادی ترکیب و جهش دینامیکی ذرات چالش‌های بیان شده تعدیل خواهند شد.

۲- مدل‌سازی سیستم قدرت

۲-۱- مدل‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر و بارها

به طور کلی می‌توان این منابع را به دو شکل زیر مدل‌سازی نمود:

۱- مدل PV که در این صورت ضروری است تا از طریق تصحیح توان راکتیو اندازه ولتاژ باسی که DG به آن متصل شده است، تنظیم شود.

۲- مدل PQ و به عنوان یک بار منفی که مورد نظر این مقاله است. ساختار شعاعی شبکه توزیع، بالا بودن مقدار مقاومت سیستم و همچنین نسبت پایین X به R باعث می‌شوند که روش‌های معمول پخش بار نظیر نیوتن-رافسون، گوس-سایدل و تکنیک‌های دکوپله‌سازی سریع^۴ برای شبکه‌های توزیع شامل منابع انرژی DG مناسب نباشند. از این رو پخش بار مبتنی بر تزریق جریان^۵ برای این سیستم‌ها پیشنهاد می‌شود. یکی از مزیت‌های CILF سازگار بودن آن با تجهیزات کنترلی در شبکه است. سه روش برای مدل‌سازی DG به صورت PQ در دسترس است:

۱- **بار PQ منفی:** در این حالت منبع DG به عنوان یک منبع توان اکتیو در نظر گرفته می‌شود. توان اکتیو خروجی PDG منبع به عنوان توان تزریقی لحاظ می‌گردد:

$$P_{load,i} = P_{load,i} - P_{DG,i} \quad (1)$$

۲- ضریب توان ثابت: این مدل معمولترین مدل سازی برای منابع DG در شبکه توزیع است. توان اکتیو منبع DG و تزریق جریان معادل از رابطه های (۲) و (۳) محاسبه می شوند:

$$Q_{iDG} = P_{iDG} \tan(\cos^{-1}(PF_{iDG})) \quad (2)$$

$$I_{iDG} = I_{iDG}^*(V_{iDG}) + jI_{iDG}^*(V_{iDG}) = (P_{iDG} + j \frac{Q_{iDG}}{V_{iDG}})^* \quad (3)$$

۳- توان راکتیو متغیر: ژنراتورهای القایی در منابع DG به عنوان ژنراتورهای توان راکتیو متغیر در نظر گرفته می شوند. به عنوان مثال برای توربین های بادی، توان اکتیو را می توان از روی منحنی مشخصه توربین استخراج نمود و بر اساس رابطه زیر مقدار توان راکتیو تقاضا شده را محاسبه کرد:

$$Q'_{iDG} = -Q_0 - Q_1 P_{iDG} - Q_2 P_{iDG}^2 \quad (4)$$

که در این رابطه Q'_{iDG} توان راکتیو مصرفی توسط توربین بادی و مقادیر Q_0, Q_1, Q_2 از طریق تقریب به دست می آیند. در این مقاله از روش های بالا برای مدل سازی منابع DG استفاده خواهد شد. برای مدل سازی بار نیز می توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$P_i = P_{0i} \times V_i^\alpha, Q_i = Q_{0i} \times V_i^\beta \quad (5)$$

که در این رابطه P_i و Q_i توان های اکتیو و راکتیو در باس i ام، P_{0i} و Q_{0i} توان اکتیو و راکتیو در باس i ولتاژ در باس i و α و β ضرایب ثابت هستند (برای حالت توان ثابت این دو مولفه صفر در نظر گرفته می شوند).

۲-۲- تعریف تابع هدف برای مساله

یکی از مهمترین اهداف از حل مساله جابجایی و تعیین سائز بهینه منابع DG در شبکه قدرت کاهش تلفات کل توان در سیستم می باشد. این مهم را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\text{Minimize } S_{loss} = \sqrt{P_{loss}^2 + Q_{loss}^2} \quad (6)$$

توجه شود که هدف این مقاله کاهش تلفات توان اکتیو و همچنین بهبود پروفیل ولتاژ در فیدرهای شبکه است. از آنجا که ولتاژ سیستم مرتبط با مقدار جاری شدن توان راکتیو است بنابراین کاهش تلفات توان راکتیو می تواند بر تثبیت پروفیل ولتاژ به طور کامل موثر باشد. کل تلفات توان اکتیو در سیستم توزیع با رابطه زیر داده می شود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i, Q_{loss} = \sum_{i=1}^n I_i^2 X_i \quad (7)$$

که در این رابطه n شماره خطوط در باس i و I_i جریان خط در باس i و R_i مقاومت خط و X_i راکتانس خط هستند. تلفات کل توان سیستم نیز بر اساس تلفات توان اکتیو و راکتیو فرمول بندی می شوند. می توان مقدار دقیق تلفات توان های فعال و واکنشی را با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) محاسبه نمود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [a_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + b_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (8)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [c_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + d_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (9)$$

که در رابطه بالا ضرایب به صورت زیر تعریف می شوند:

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j), b_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (10)$$

$$c_{ij} = \frac{X_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j), d_{ij} = \frac{X_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (11)$$

متغیر n شماره باس، $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ ضرایب تلفات بین باس i و j ، $P_{i(j)}$ سیلان توان حقیقی در باس i و $Q_{i(j)}$ سیلان توان واکنشی در باس i و R_{ij} مقاومت بین باس های i و j ، X_{ij} راکتانس بین باس های i و j ، $V_{i(j)}$ ولتاژ باس i و δ_{ij} زاویه ولتاژ باس i هستند. امپدانس بین باس i و j به صورت $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ نمایش داده می شود. مدل معمول برای تابع هدف به صورت زیر است:

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (12)$$

که در آن $f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)$ متغیرات در تابع هزینه هستند. این تابع هزینه باید در شرایط قیود تساوی و ناتساوی حل شود:

$$g(x) = g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x) = 0 \\ h(x) = h_1(x), h_2(x), \dots, h_k(x) \geq 0 \quad (13)$$

استراتژی معمول برای جابجایی و تعیین ظرفیت بهینه DG مبتنی بر به کمینه رساندن مقدار تلفات و بهبود نمایه ولتاژ است. فاکتور کاهش تلفات توان فعال در هر گره به صورت نسبت درصد کاهش تلفات توان فعال به توان پایه در زمانی است که DG در باس i نصب گردد. در این مقاله شاخص کاهش تلفات توان فعال (PLRI) به صورت زیر بیان می شود (که در آن $P_{L(base)}$ تلفات توان فعال قبل از نصب DG، $P_{L(dg)}$ تلفات توان فعال بعد از نصب DG می باشد):

$$f_1 = PLRI = \frac{P_{L(base)} - P_{L(dg)}}{P_{L(base)}} \quad (14)$$

در یک سیستم قدرت انتظار می رود تا ولتاژ در هر باس در محدوده مجاز قرار گیرد. شاخص بهبود نمایه ولتاژ (Profile Voltage) به تعیین سائز-موقعیت بهینه DG کمک می کند تا کمینه تغییرات ولتاژ از مقدار مرجع در باس های مختلف سیستم را شاهد باشیم. این شاخص در این مقاله به صورت زیر تعریف می شود (یک مقدار عددی ثابت است):

$$f_2 = VPII = \frac{1}{\lambda + \max_{i=1}^n (|1 - V_{DGi}|)} \quad (15)$$

می توان تابع هزینه چند هدفه برای تعیین موقعیت و ظرفیت بهینه DG را به صورت زیر تعریف نمود:

$$MOF = w_1 PLRI + w_2 VPII \quad (16)$$

که در این رابطه w_1 و w_2 وزن های متناظر با هر شاخص است. لازم است تا جمع ضرایب وزنی برابر با یک باشد. یعنی:

$$|w_1| + |w_2| = 1 \quad (17)$$

این وزن ها برای اهمیت دادن به هر یک از این شاخص ها در تابع هزینه برآیند بوده و بر اساس نظر طراح می تواند متغیر باشد. همچنین، هنگام حل مساله بهینه سازی باید شرایط تعادل توان نیز برقرار باشد:

$$P_i = P_{DGi} - P_{Di}, Q_i = Q_{DGi} - Q_{Di} \quad (18)$$

که در این رابطه P_i و Q_i توان فعال و واکنشی در باس i ، P_{DGi} و Q_{DGi} توان های فعال و واکنشی مبادله ای توسط DG در باس i ، P_{Di} و Q_{Di} تقاضای توان فعال و واکنشی در باس i می باشند. رابطه P_i را می توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$P_i = -\frac{1}{a_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [a_{ij} P_j - b_{ij} Q_j] \quad (19)$$

معادله بالا را می توان برای مساله تعیین سائز-موقعیت بهینه DG

به صورت زیر نوشت:

$$P_{DGi} = P_{Di} + \frac{1}{a_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [a_{ij}P_j - b_{ij}Q_j] \quad (20)$$

در نتیجه برای توان واکنشی:

$$Q_{DGi} = Q_{Di} + \frac{1}{c_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [c_{ij}Q_j - b_{ij}P_j] \quad (21)$$

در حین نصب واحدهای تولید پراکنده در باس‌های مختلف باید عدم تجاوز اندازه ولتاژ از حد مجاز به طور پیوسته بررسی گردد (قید ناتساوی). به عبارت دیگر برای هر باس باید داشته باشیم:

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (22)$$

که در این رابطه $V_{i \min}$ حد پایین ولتاژ و $V_{i \max}$ حد بالای ولتاژ می‌باشد. هر یک از منابع DG نیز محدودیتی برای تولید توان‌های فعال و واکنشی دارند و بنابراین:

$$P_{DG \min} \leq P_{DGi} \leq P_{DG \max} \\ Q_{DG \min} \leq Q_{DGi} \leq Q_{DG \max} \quad (23)$$

۳- الگوریتم تکاملی PSO تصحیح شده

در مورد بکارگیری الگوریتم‌های تکاملی دو نکته زیر حائز اهمیت خواهند بود:

– زمان جست‌وجوی راه‌حل قابل توجه خواهد بود.

– راه‌حل‌ها به الزام راه‌حل بهینه نیستند.

ضروری است تا مصالح‌های بین فضای جست‌وجوی گسترده و سرعت همگرایی به پاسخ‌های بهینه فراهم شود. روش بهینه‌سازی حرکت دسته جمعی ذرات دارای ویژگی‌هایی نظیر سادگی، سرعت بالا و کدینگ راحت است. علاوه بر این جهت اجرا نیاز به فضای ذخیره‌سازی ناچیزی دارد. مزیت دیگر این الگوریتم حفظ جمعیت اولیه است که باعث می‌شود تا نیاز به حافظه چندانی برای ذخیره‌سازی کلیه عناصر نباشد. در ضمن ذرات در این الگوریتم با یکدیگر برای رسیدن به جواب بهینه همکاری می‌کنند. این عمل در مقابل روش‌هایی چون ژنتیک الگوریتم می‌باشد که ذرات برای جواب نهایی با یکدیگر در حال رقابت هستند. PSO با یک جمعیت اولیه (ذرات) در فضای D بعدی شروع به فعالیت می‌کند. ذره iام با $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ نمایش داده می‌شود. هر ذره موقعیت بهترین حالت خود در فضای D بعدی را حفظ می‌کند. مقدار تابع هزینه برای هر ذره به صورت $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$ ذخیره می‌شود. در این الگوریتم بهترین جواب ممکن و موقعیت ذره مربوطه نیز ذخیره می‌گردد. PSO در هر گام بر اساس سرعت ذرات، موقعیت ذرات را به روز می‌کند. سرعت ذره iام به صورت $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$ نمایش داده می‌شود.

موقعیت ذره iام در تکرار kام با رابطه (۲۴) محاسبه خواهد شد.

$$V_{id}^{k+1} = w \times V_{id}^k + c_1 \times \text{rand} \times (P_{id} - X_{id}^k) + c_2 \times \text{rand} \times (P_{gd} - X_{id}^k) \quad (24)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^k \quad (25)$$

که در این رابطه P_{gd} و P_{id} به ترتیب موقعیت‌های بهینه مطلوب و نسبی هستند. در الگوریتم PSO، هر نوع تغییر در ذرات بر مبنای سرعت و جهت ذرات موفق انجام می‌شود که لزوماً این ذرات پاسخ‌های بهینه ممکن برای مساله محسوب نمی‌شوند. برای اجتناب از به دام افتادن الگوریتم در اکسترم‌های محلی مساله، پیشنهاد می‌شود تا بعد از تغییرات صورت گرفته روی ذرات

(به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات) از عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده شود تا شرایط برای گریز از اکسترم‌های محلی مهیا گردد. برای این منظور به صورت زیر عمل می‌شود:

۱- عملگر ترکیب (Crossover): بر این اساس از جمعیت ذرات، ذره‌ای به تصادف انتخاب می‌شود. این ذره با P_{gd} ترکیب خواهد شد. ترکیب بر اساس رابطه زیر انجام خواهد شد (X_{newk} اشاره به ذره جدید دارد که جایگزین ذره انتخابی X_{randk} در مرحله k ام می‌شود و θ عدد تصادفی بین صفر و یک است):

$$\theta \times P_{gd}^k + (1 - \theta)X_{rand}^k = X_{new}^k \quad (26)$$

۲- جهش دینامیکی (Mutation Dynamic): می‌تواند ضمن گسترش فضای جست و جو باعث جلوگیری از گیر افتادن جمعیت ذرات در اکسترم‌های محلی گردد. تعریف جهش دینامیکی بصورت زیر انجام می‌شود (X_{min} و X_{max} به بیشترین و کمترین مقدار ممکن اشاره دارند و μ پارامتری ثابت است):

$$X_{rand}^{k+1} = \begin{cases} X_{rand}^k + (X_{max} - X_{rand}^k) \times \text{rand} \times \exp\left(\frac{1}{1-\mu}\right) & \text{rand} > 0.5 \\ X_{rand}^k - (X_{rand}^k - X_{min}) \times \text{rand} \times \exp\left(\frac{1}{1-\mu}\right) & \text{rand} < 0.5 \end{cases} \quad (27)$$

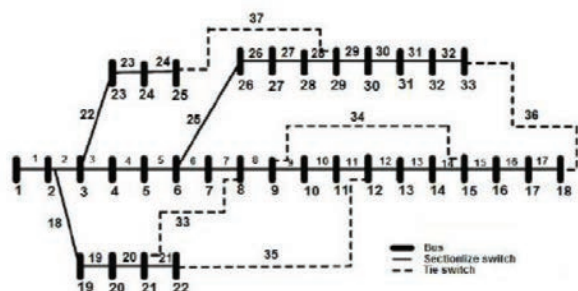
این رابطه نوسان ذرات حول مقادیر بهینه احتمالی را باعث خواهد شد.

به این ترتیب، مراحل بهینه‌سازی یک مساله بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم PSO تصحیح شده به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- مقدار دهی اولیه موقعیت و سرعت ذرات
- ۲- محاسبه تابع هزینه برای هر یک ذرات و تعیین P_{gd} و P_{id}
- ۳- به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات بر اساس رابطه (۲۵)
- ۴- اعمال عملگرهای جهش و ترکیب (رابطه (۲۵) و (۲۶))
- ۵- تکرار مراحل (۱) الی (۴) تا ارضای شرط توقف مورد نظر

۴- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار MATLAB و با استفاده از جعبه ابزار MATPOWER انجام خواهد شد. سیستم نمونه ۳۳ باسه استاندارد IEEE جهت اعمال روش مورد بحث این مقاله جهت حل مساله OPSDG لحاظ شده است. سیستم‌های تحت مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است.

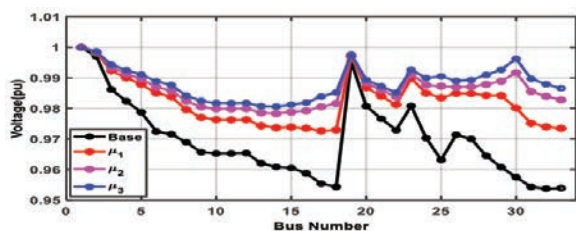


شکل ۱: سیستم قدرت مورد مطالعه

۴-۱- سناریوهای شبیه‌سازی

همچنان که اشاره شد، برای ارزیابی مدل ارائه شده در این مقاله برای حل مساله OPSDG سیستم استاندارد ۳۳ باسه و سناریوهای زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۱- سناریوی ۱: فقط شاخص تلفات توان فعال در تابع بهینه‌سازی لحاظ می‌شود.



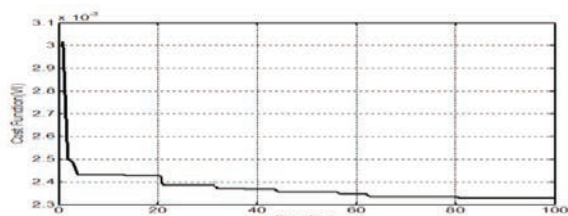
شکل ۳: نمایه ولتاژ در سناریوی $\lambda 1$ برای سیستم ۳۳ باس

۴-۲-۲- شبیه‌سازی سناریوی دوم ($\lambda 2$)

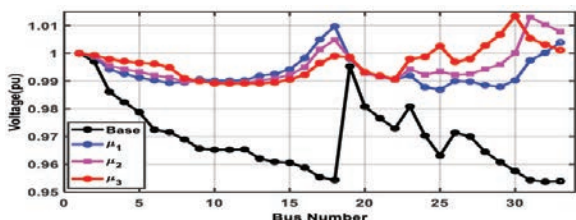
در این سناریو تابع هدف بر مبنای شاخص ولتاژ تعریف خواهد شد. در شکل (۴) تغییرات تابع هزینه نمایش داده شده است. شکل (۵) مقدار ولتاژ برای حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای این سناریو را نمایش می‌دهد. به علت در نظر گرفتن شاخص ولتاژ و همچنین فرض تبادل توان راکتیو DG با شبکه، ملاحظه می‌شود که کمینه ولتاژ در کلیه باس‌های سیستم قدرت بهبود پیدا کرده است (جدول (۲)). محدوده نوسان ولتاژ در باس‌ها در حدود است که مقداری قابل قبول است. در مقایسه با سناریوی $\lambda 2$ مشخص است که تلفات توان اکتیو افزایش یافته است و منابع DG توان بیشتری به شبکه تزریق می‌کنند.

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باس برای سناریوی $\lambda 2$

	μ_1		μ_2		μ_3	
موقعیت نصب	۱۸		۳۱		۳۰، ۱۲	
ظرفیت (فعال-واکنشی)	۲/۹۷۹		۲/۵۶		۳/۰۵، ۱/۴۸	
تلفات (قبل نصب)	۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱	
تلفات (بعد نصب)	۰/۱۰۳		۰/۰۶۴		۰/۰۴۲۲	
کاهش تلفات	۱۷/۴		۴۸/۶		۶۶/۳	
حداقل ولتاژ (قبل نصب)	۰/۹۵۳۷		۰/۹۵۳۷		۰/۹۵۳۷	
حداقل ولتاژ (بعد نصب)	۰/۹۸۷		۰/۹۹		۰/۹۸۹۲	



شکل ۴: تابع هزینه برای سناریوی $\lambda 2$ برای سیستم ۳۳ باس



شکل ۵: نمایه ولتاژ در سناریوی $\lambda 2$ برای سیستم ۳۳ باس

۴-۲-۳- شبیه‌سازی سناریوی سوم ($\lambda 3$)

تابع هزینه برای حل مساله شامل شاخص ولتاژ و تلفات توان فعال است. با این حال وزن لحاظ شده برای هر یک از شاخص‌ها در

۲- سناریوی $\lambda 2$: فقط شاخص ولتاژ در تابع بهینه‌سازی لحاظ می‌گردد.

۳- سناریوی $\lambda 3$: هر دو شاخص ولتاژ و توان در تابع بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود و مساله OPDGD به صورت چند مساله بهینه‌سازی چند هدفه تعریف می‌شود.

۴- سناریوی $\lambda 4$: سناریوی $\lambda 3$ با حضور چهار منبع DG تکرار می‌شود (جهت اهداف مقایسه‌ای در سیستم ۳۳ باس). در سناریوهای بالا منابع DG با قابلیت تبادل مولفه‌های توان فعال و واکنشی و تحت شرایط مختلف به شرح زیر در مساله OPDGD وارد می‌شوند:

۱- حالت $\mu 1$: منبع DG با ضریب توان واحد

۲- حالت $\mu 2$: منبع DG با ضریب توان ۰.۸۵ که امکان تبادل توان فعال و واکنشی با شبکه را دارد.

۳- حالت $\mu 3$: دو منبع DG با ضرایب توان ۰.۸۵ که امکان تبادل توان واکنشی با شبکه را دارد و همچنین ۱ منبع که فقط توان فعال به شبکه تزریق می‌کند.

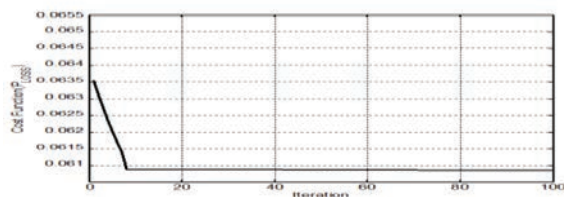
۴-۲-۲- شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باس استاندارد IEEE

۴-۲-۱- شبیه‌سازی سناریوی نخست ($\lambda 1$)

مساله OPDGD بر اساس تابع هزینه مبتنی بر تلفات و با به کارگیری الگوریتم تصحیح شده PSO حل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده است. تغییرات تابع هزینه در شکل (۲) نمایش داده شده است. در شکل (۳) تغییرات ولتاژ در سناریو $\lambda 1$ نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات جدول (۱) مقدار تلفات برای حالت $\mu 3$ حدود ۷۴/۳ درصد کاهش داشته است. همچنین در صورت استفاده از دو منبع DG نمایه ولتاژ (شکل (۲)) به طور قابل توجهی بهبود یافته است. در چنین شرایطی کمترین اندازه ولتاژ در باس شماره ۱۴ بوده و مقدار آن ۰/۹۸۱ پریونیت است.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باس برای سناریوی $\lambda 1$

	$\mu 1$		$\mu 2$		$\mu 3$	
موقعیت نصب	۳۰		۳۰		۳۰، ۱۲	
ظرفیت (فعال-واکنشی)	۱/۹۸		۱/۸، ۰/۹۱		۲، ۱/۱۰۳	
تلفات (قبل نصب)	۰/۱۲۴۷		۰/۱۲۴۷		۰/۱۲۴۷	
تلفات (بعد نصب)	۰/۰۶		۰/۰۳۵		۰/۰۳۲	
کاهش تلفات	۵۱/۸		۷۱/۹		۷۴/۳	
حداقل ولتاژ (قبل نصب)	۰/۹۵۳۷		۰/۹۵۳۷		۰/۹۵۳۷	
حداقل ولتاژ (بعد نصب)	۰/۹۷۳		۰/۹۷۹		۰/۹۸۱	

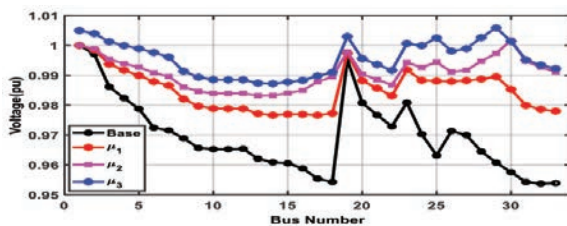


شکل ۶: تابع هزینه در سناریوی $\lambda 1$ سیستم ۳۳ باس

سیستم ۳۳ باسه به همراه چهار منبع DG استفاده می‌شود. نتایج این شبیه‌سازی در جدول (۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در روش مورد بحث این مقاله حداقل ولتاژ مطلوب‌تر و تلفات کمتری حاصل شده است.

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه برای سناریوی ۱.۳

	μ_1		μ_2		μ_3	
موقعیت نصب	۲۹		۳۰		۲۹	۱۰
ظرفیت (فعال-واکنشی)	۲/۴۵	۰	۲/۰۹	۱/۵۸	۲/۵۳ ۰/۲۵۱	۱/۲۷
تلفات (قبل نصب)	۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱	
تلفات (بعد نصب)	۰/۰۵۹		۰/۰۲۹		۰/۰۲۸۱	
کاهش تلفات	۵۲/۱		۷۶/۷		۷۷/۵	
حداقل ولتاژ (قبل نصب)	۰/۶۵۳۷۶	۳۲	۰/۹۵۳۷۶	۳۲	۰/۹۵۳۷۶	۳۲
حداقل ولتاژ (بعد نصب)	۹۸/۰	۱۴	۹۸۴/۰	۱۳	۹۸۸/۰	۱۴

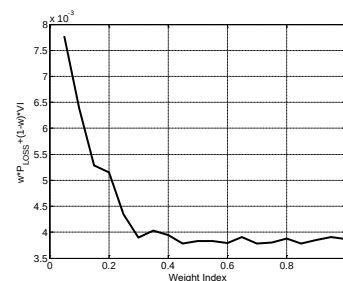


شکل ۸: نمایه ولتاژ در سناریوی ۱.۳ برای سیستم ۳۳ باسه

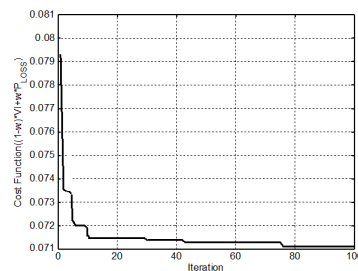
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله حل مساله OPSPDG از طریق الگوریتم تکاملی بهبود یافته PSO و بر اساس تابع هزینه مبتنی بر شاخص‌های تلفات توان اکتیو و نمایه ولتاژ انجام شد. از آنجا که مساله تحت مطالعه غیرخطی و چند متغیره است، برای حل آن الگوریتم تکاملی PSO تصحیح شده به کار گرفته شد. الگوریتم تصحیح شده مجهز به دو عملگر ترکیب و جهش دینامیکی است که ضمن افزایش سرعت و دقت دستیابی به پاسخ‌های بهینه، از به دام افتادن ذرات در اکسترمم‌های محلی نیز جلوگیری می‌کند. نتایج شبیه‌سازی

تابع هزینه مشخص نیست. جهت تعیین ضریب وزنی بهینه (w) در رابطه (۱۸)، ابتدا تابع هزینه بر اساس مقادیر متفاوت w ترسیم می‌شود و سپس از نمودار حاصل مقدار تقریبی برای w استخراج می‌شود. شکل (۶) تغییرات تابع هزینه به ازای w را نشان می‌دهد. بازه مناسب برای انتخاب w بازه $[۰/۳۵-۱]$ می‌باشد. در این مقاله برای ادامه شبیه‌سازی‌ها w برابر با $۰/۷$ در نظر گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این سناریو در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین تغییرات ولتاژ در باس‌های مختلف سیستم قدرت نیز در شکل (۸) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی سوم کمترین تلفات (حدود ۷۶ درصد) ممکن برای سیستم حاصل می‌شود. علاوه بر این نمایه ولتاژ نیز به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.



شکل ۶: تابع هزینه بر اساس شاخص وزن انتخاب شده



شکل ۷: تابع هزینه برای سناریوی ۱.۳ برای سیستم ۳۳ باسه

۴-۳- سناریوی چهارم: به کارگیری چهار منبع DG

برای نمایش موثر بودن استراتژی مقاله نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی در مقالات به‌ویژه مقاله پایه این مقاله از شبیه‌سازی

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه برای سناریوی ۱.۴

روش	موقعیت و ظرفیت DG.1	موقعیت و ظرفیت DG.1	موقعیت و ظرفیت DG.1	موقعیت و ظرفیت DG.1	کمترین تلفات	کمترین ولتاژ
GA[40]	۲۴	۶	۱۳	۳۰	۰/۹۷۷۴	۰/۰۷۰۱
	۰/۸۵۷۱	۰/۶۴۲۹	۰/۸۵۷۱	۰/۷۳۸۲		
PSO[40]	۲۵	۶	۱۵	۳۱	۰/۹۶۹۶	۰/۰۷۱۳
	۰/۵۴۱۳	۰/۸۳۰۱	۰/۸۳۳۰	۰/۶۴۷۸		
GA/PSO [40]	۲۴	۲۶	۱۴	۳۲	۰/۹۷۰۳	۰/۰۶۸۲
	۱/۰۲۳۲	۰/۸۶۷۱	۰/۶۶۲۸	۰/۶۶۳۹		
IMOHS [41]	۶	۱۴	۲۴	۳۱	۰/۹۷۲۳	۰/۰۶۷۸
	۰/۹۳۶۹	۰/۶۶۷۲	۱/۰۱۱۷	۰/۷۳۱۲		
MOSH [42]	۱۴	۷	۲۴	۳۲	۰/۹۸۴۴	۰/۰۶۳۶
	۰/۷۳۶	۱/۱۶۰۶	۱/۰۷۰۷	۰/۸۵۹۶		
مقاله حاضر	۶	۱۳	۲۶	۱۴	۰/۹۹۱	۰/۰۶۰۱

همکاری علمی استادان گرامی و فرهیختگان ارجمند در داوری مقاله‌های نشریه علمی ترویجی عصر برق در سال ۱۴۰۱ که ثمره آن در غنای علمی و فنی مطالب منتشر شده بسیار موثر بوده است باعث خوشحالی و شایسته تقدیر است. امید است افتخار همراهی صاحب‌نظران و اندیشمندان گرامی باعث تداوم موفقیت‌ها در ادامه راه باشد.

با احترام و امتنان
شورای سردبیری

۱. دکتر حسین ابوترابی زارچی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. دکتر ایمان احدی اخلاقی، دانشگاه سجاد
۳. دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴. دکتر حمیدرضا بخشی، دانشگاه شاهد
۵. دکتر بهشید بهکمال، دانشگاه فردوسی مشهد
۶. دکتر محسن پارسا مقدم، دانشگاه تربیت مدرس تهران
۷. دکتر ناصر پریز، دانشگاه فردوسی مشهد
۸. دکتر مهدی توکلی افشار، دانشگاه آبرتا
۹. دکتر محمود جورابیان، دانشگاه شهید چمران اهواز
۱۰. دکتر سمیه حسن پور دربان، دانشگاه سجاد
۱۱. دکتر سید ابراهیم حسینی، دانشگاه فردوسی مشهد
۱۲. مهندس سعید خادمی، شرکت سامان انرژی
۱۳. دکتر محمدعلی خلیل زاده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد
۱۴. دکتر حبیب رجبی مشهدی، دانشگاه فردوسی مشهد
۱۵. دکتر مصطفی رجبی مشهدی، شرکت مدیریت شبکه برق ایران
۱۶. دکتر احسان رحیمی نژاد، دانشگاه صنعتی قوچان
۱۷. مهندس زهره رضایی، دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد
۱۸. دکتر حمید رضا رضایی دهرسرخ، دانشگاه سجاد
۱۹. دکتر سید مجتبی روحانی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۰. دکتر مریم زارع، دانشگاه صنعتی قوچان
۲۱. دکتر جواد ساده، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۲. مهندس تکتم شریفیان عطار، شرکت برق منطقه ای خراسان
۲۳. دکتر سید حمید ظهیری مقانی، دانشگاه بیرجند
۲۴. دکتر غلامرضا عرب مار کده، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۵. دکتر مجید علومی بایگی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۶. دکتر مصطفی عیدپانی، موسسه غیرانتفاعی خراسان
۲۷. دکتر محسن قاینی، دانشگاه سجاد
۲۸. دکتر عباس قائمی بافقی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۹. دکتر علی کار ساز، موسسه غیرانتفاعی خراسان
۳۰. دکتر سید محمد سعید ماجدی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳۱. دکتر خلیل مافی نژاد، دانشگاه سجاد
۳۲. دکتر هاشم مرتضوی، شرکت تولید نیروی برق خراسان
۳۳. دکتر حامد ملا احمدیان، موسسه غیرانتفاعی خراسان
۳۴. دکتر محمد منفرد، دانشگاه فردوسی مشهد
۳۵. دکتر منیره هوشمند، دانشگاه بین المللی امام رضا (ع)
۳۶. دکتر حمید یعقوبی، دانشگاه سمنان

نشان داد که جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG با توجه به ضریب توان آنها و در نظر گرفتن هر دو شاخص ولتاژ و تلفات در تابع هزینه می‌تواند تلفات سیستم را بطور قابل توجهی کاهش داده و علاوه بر این نمایه ولتاژ را بهبود دهد.

۶-مراجع

- [1] Subbaramaiah, K., and P. Sujatha. "Optimal DG unit placement in distribution networks by multi-objective whale optimization algorithm & its techno-economic analysis." *Electric Power Systems Research* 214 (2023): 108869.
- [2] Gümüş, Talha Enes, Selcuk Emiroglu, and Mehmet Ali Yalcin. "Optimal DG allocation and sizing in distribution systems with Thevenin based impedance stability index." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 144 (2023): 108555.
- [3] Rekha, Rekha, and Shankaralingappa Channappa Byalihal. "Optimal allocation of solar and wind distributed generation using particle swarm optimization technique." *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 13, no. 1 (2023): 229.
- [4] Swaminathan, Dhivya, and Arul Rajagopalan. "Multi-Objective Golden Flower Optimization Algorithm for Sustainable Reconfiguration of Power Distribution Network with Decentralized Generation." *Axioms* 12, no. 1 (2023): 70.
- [5] Hamidan, Mohammad-Ali, and Farzaneh Borousan. "Optimal planning of distributed generation and battery energy storage systems simultaneously in distribution networks for loss reduction and reliability improvement." *Journal of Energy Storage* 46 (2022): 103844.
- [6] García Vera, Yimy E., Rodolfo Dufo-López, and José L. Bernal-Agustín. "Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review." *Applied Sciences* 9, no. 18 (2019): 3854.
- [7] Suresh, M. C. V., and J. Belwin Edward. "A hybrid algorithm based optimal placement of DG units for loss reduction in the distribution system." *Applied Soft Computing* 91 (2020): 106191.
- [8] Dawoud, Samir M., Xiangning Lin, and Merfat I. Okba. "Optimal placement of different types of RDGs based on maximization of microgrid loadability." *Journal of Cleaner Production* (2017).
- [9] Ghadi, M. Jabbari, Sahand Ghavidel, Amin Rajabi, Ali Azizivahed, Li Li, and Jiangfeng Zhang. "A review on economic and technical operation of active distribution systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104 (2019): 38-53.
- [10] Tanwar, Surender Singh, and D. K. Khatod. "Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system." *Energy* 127 (2017): 52-67.
- [11] Wong, JunYing, ChiaKwang Tan, N. A. Rahim, and Rodney HG Tan. "A Communication-less adaptive protection scheme for Self-Healing distribution systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 148 (2023): 108992.
- [12] Nageswari, D., N. Kalaarasi, and G. Geethamahalakshmi. "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Using Metaheuristic Algorithm." *Comput. Syst. Sci. Eng.* 41, no. 2 (2022): 493-509.
- [13] Swaminathan, Dhivya, and Arul Rajagopalan. "Multi-Objective Golden Flower Optimization Algorithm for Sustainable Reconfiguration of Power Distribution Network with Decentralized Generation." *Axioms* 12, no. 1 (2023): 70.
- [14] Imran, A. Mohamed, M. Kowsalya, and D. P. Kothari. "A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 63 (2014): 461-472.
- [15] Qi, Qi, and Jianzhong Wu. "Increasing Distributed Generation Penetration Using Network Reconfiguration and Soft Open Points." *Energy Procedia* 105 (2017): 2169-2174.
- [16] Muthukumar, K., and S. Jayalalitha. "Integrated approach of network reconfiguration with distributed generation and shunt capacitors placement for power loss minimization in radial distribution networks." *Applied Soft Computing* 52 (2017): 1262-1284.
- [17] Gallego Pareja, Luis A., Jesús M. López-Lezama, and Oscar Gómez Carmona. "Optimal Feeder Reconfiguration and Placement of Voltage Regulators in Electrical Distribution Networks Using a Linear Mathematical Model." *Sustainability* 15, no. 1 (2023): 854.
- [18] Fathi, Rahim, Behrouz Tousi, and Sadjad Galvani. "Allocation of renewable resources with radial distribution network reconfiguration using improved salp swarm algorithm." *Applied Soft Computing* 132 (2023): 109828.
- [19] Reddy, VC Veera, and T. Gowri Manohar. "Ant Lion optimization algorithm for optimal sizing of renewable energy resources for loss reduction in distribution systems." *Journal of Electrical Systems and Information Technology* (2017).
- [20] ChithraDevi, S. A., L. Lakshminarasimman, and R. Balamurugan. "Stud Krill herd Algorithm for multiple DG placement and sizing in a radial distribution system." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20.2 (2017): 748-759.

◀ تحلیل ناحیه نرخ و ظرفیت و امنیت لایه فیزیکی برای کانال پخش (با دو و سه گیرنده) با اطلاعات جانبی و بدون آن

◀ کنترل توان منابع تولید تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی در ریزشبکه ترکیبی AC/DC

سعید پاک روان
استاد راهنما: دکتر قوشه عابد هدتنی
دانشگاه فردوسی مشهد

محمد عیدی
استاد راهنما: دکتر رضا قاضی
دانشگاه فردوسی مشهد

کاربرد گسترده مخابرات بی‌سیم در زندگی بشر امروزی اهمیت تحلیل کانال‌های مختلف چندکاربره به‌عنوان قالب‌های ساختاری سیستم‌های مختلف بی‌سیم را روزبه‌روز بیشتر کرده است. از جمله این کانال‌ها می‌توان به کانال پخش اشاره کرد که بیشتر تحقیقات روی این کانال با دو گیرنده صورت گرفته است. برخلاف کانال دسترسی چندگانه که نتایج به‌دست آمده برای دو فرستنده به نحوی قابل تعمیم به بیش از دو فرستنده است، در کانال پخش بسط نتایج روی کانال با دو گیرنده به کانال با بیش از دو گیرنده با مشکل مواجه شده است. به همین دلیل تحقیقات زیادی برای رسیدن به ناحیه ظرفیت و یا کران‌های داخلی و خارجی آن برای کانال پخش با بیش از دو گیرنده، به‌عنوان مثال سه گیرنده انجام شده است.

در بخش نخست این پژوهش برای دو حالت خاص از کانال‌های پخش الفبا گسسته و بدون حافظه با سه گیرنده یعنی کانال پخش چند سطحی و کانال پخش کم‌نویز تر در حضور اطلاعات جانبی غیر علمی ناحیه ظرفیت را به دست آوردیم و نتایج الفبا گسسته را به حالت الفبا پیوسته از جمله کانال پخش گوسی با ضرایب از رمق افتادگی مختلف بسط دادیم و تأثیر وابستگی بین متغیرهای کانال همچون نویز کانال و اطلاعات جانبی در کانال پخش کم‌نویز تر را بررسی کردیم و نشان دادیم که نتایج برخی از کارهای قبلی حالت‌های خاصی از نتایج به‌دست آمده هستند.

در بخش دوم این پژوهش با توجه به اهمیت امنیت لایه فیزیکی پس از بررسی مفهوم نرخ امن و آخرین تحقیقات روی نواحی نرخ امن بر روی انواع کانال‌های پخش الفبا گسسته و بدون حافظه، تأثیر اطلاعات جانبی روی ناحیه‌های نرخ امن در کانال‌های بی‌سیم مرتبط و مفاهیم مخابرات بی‌سیم همچون احتمال وقفه و ناحیه پوشش مطالعه شده و نتایج به‌دست آمده با کارهای پیشین مقایسه گردیده است. در آخرین بخش از این رساله، معیارهای عملکرد مخابراتی نظیر ظرفیت امن متوسط و احتمال قطع امن در کانال شنود را تحت وابستگی ضرایب از رمق افتادگی رایلی با استفاده از نظریه توابع مفصل ضمن ارائه شبیه‌سازی‌ها تحلیل شده است.

کلمات کلیدی:

کانال‌های پخش کم‌نویز تر و چند سطحی، کانال‌های از رمق افتاده وابسته، اطلاعات جانبی و امنیت لایه‌ی فیزیکی، نظریه مفصل

ریزشبکه‌ی جزیره‌ای به مجموعه‌ای از بارها، منابع تولیدی و سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی گفته می‌شود که به‌صورت جدا از شبکه عمل می‌کنند. با توجه به نوع توان تبدیلی بین واحدها، ریزشبکه‌ها به سه دسته AC، DC و ترکیبی (AC/DC) تقسیم می‌شوند. با توجه به بهره‌مندی ریزشبکه ترکیبی از مزایای هر دو نوع AC و DC، این نوع سیستم‌ها توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. در یک ریزشبکه جزیره‌ای، واحدهای ذخیره‌ی انرژی موظف‌اند از ناپایداری شبکه جلوگیری کنند. علاوه بر این عملکرد اقتصادی ریزشبکه و همچنین کیفیت توان آن را نیز بهبود دهند. برای دستیابی به این اهداف توان واحدهای ذخیره‌ی انرژی باید به گونه‌ای کنترل گردد که (۱) تقسیم توان متناسب با ظرفیت واحدها انجام شود. (۲) SOC واحدهای ذخیره‌ی انرژی (واحدها) تنظیم شود. (۳) انحرافات ولتاژ و فرکانس کاهش یابند. با توجه به متغیر بودن ولتاژ باس DC در نقاط مختلف شبکه، دستیابی به این اهداف در زیربخش DC به مراتب سخت‌تر از بخش AC است. در این رساله سه روش برای تعیین توان واحدهای ذخیره انرژی زیربخش DC و یک روش برای کنترل توان واحدهای ذخیره انرژی کل ریزشبکه ارائه گردیده است. نتایج این روش‌ها به صورت شبیه‌سازی و همچنین آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

در روش نخست با تعریف یک امیدانس مجازی براساس مقاومت خط، تقسیم متناسب جریان حاصل می‌شود. سپس امیدانس مجازی دیگری بر اساس SOC واحدها به گونه‌ای تعریف می‌گردد که نه تنها SOC واحدها تنظیم شود بلکه انحراف ولتاژ کاهش یابد.

در روش دوم، یکی از واحدهای ذخیره انرژی ولتاژ باس DC را تخمین می‌زند و متناسب با آن سیگنالی به باس DC تزریق می‌کند. در ادامه جریان سایر واحدها توسط یک انتگرال گیر براساس SOC شان و همچنین فرکانس سیگنال تزریقی تغییر می‌کند. این تغییرات به‌نحوی است که نه تنها بازایی ولتاژ به‌طور کامل انجام شود، بلکه تقسیم متناسب توان و همچنین تنظیم SOC نیز به‌دست آید.

در روش سوم واحدی به‌عنوان واحد مبنا انتخاب می‌شود. این واحد ولتاژ باس DC را بر روی مقدار نامی تنظیم می‌کند. در ادامه براساس جریان و SOC خود سیگنالی به باس DC تزریق می‌کند. سایر واحدها با توجه به SOC خود و همچنین فرکانس سیگنال تزریقی جریانی به باس DC تزریق یا از آن جذب می‌کنند. نتیجه‌ی امر تنظیم SOC، تقسیم متناسب توان و بازایی ولتاژ است.

در ادامه روشی ماژولار برای ریزشبکه ترکیبی ارائه گردیده است. در این روش در زیربخش AC ضریب دروپ براساس SOC به گونه‌ای تعریف می‌شود که تنظیم SOC، کاهش انحراف فرکانس و تقسیم متناسب توان حاصل شود. در زیربخش DC با استفاده از روش جابجایی منحنی دروپ و امیدانس مجازی، تنظیم SOC و همچنین تقسیم متناسب توان به‌دست می‌آید. و در گام آخر ضریب دروپ مبدل IC به گونه‌ای تعریف می‌شود که SOC زیربخش‌ها همگرا شود و همچنین توان نسبی واحدها با هم برابر گردد.

کلمات کلیدی:

ریزشبکه ترکیبی AC/DC، تنظیم SOC واحدهای ذخیره‌ی انرژی، بازایی ولتاژ و فرکانس، تقسیم متناسب توان، امیدانس مجازی

طراحی و ساخت مجتمع یک سیستم فاصله سنج فرایه‌ن باند با استفاده از بازتابنده فعال

شعیب رحمت اللهی
استاد راهنما: دکتر محمد طاهرزاده ثانی
دانشگاه فردوسی مشهد

کنترل زمان محدود سیستم‌های غیرخطی تصادفی با قید حالت و نویز اندازه‌گیری

پریسا سیفی
استاد راهنما: دکتر سید کمال حسینی ثانی
دانشگاه فردوسی مشهد

در این رساله به یک سیستم فاصله‌سنجی فرایه‌ن باند دومسیره برای محیط‌های داخلی و شلوغ پرداخته شده است. در سیستم طراحی شده یک پیام شامل تعدادی پالس بسیار نازک با توانی مشخص، از سمت تراشه مرجع ارسال می‌شود و در سمت هدف آشکار می‌شود. تراشه هدف بی‌درنگ یک پیام مشابه پیام دریافتی را برمی‌گرداند. پیام بازتاب شده در سمت مرجع با مکانیزمی مشابه تراشه هدف آشکار می‌شود. فاصله زمانی بین پیام ارسالی و دریافتی در سمت مرجع محاسبه و توسط مبدل زمان به دیجیتالی به ولتاژی دیجیتالی تبدیل می‌شود. این مقدار ولتاژ، معیاری از فاصله بین تراشه هدف و تراشه مرجع است. برخلاف فاصله‌سنجی دومسیره متداول، در این روش در سمت هدف از یک بازتابنده بدون کلاک استفاده شده است که باعث شده است زمان تشخیص و بازتاب پالس دریافتی به‌صورت قابل توجهی کاهش یابد و در نتیجه دقت فاصله‌سنجی افزایش یابد. این افزایش دقت به‌دلیل حذف مشکل اختلاف کلاک در دو سمت هدف و مرجع و همچنین حذف تأخیر طولانی ناشی از آشکارسازی و پردازش است. این ساختار برای کاهش اثر تداخلی باند باریک و باند پهن، از مدولاسیون‌های «کلیدزنی خاموش-روشن» و «تغییر محل پالس» به‌صورت هم‌زمان بهره می‌برد. آشکارساز طراحی شده، الگوی پالس‌های متوالی در گیرنده را چک می‌کند. جهت اثبات این ادعا، از یک پیام دارای ۴ پالس استفاده شده، هرچند این تکنیک می‌تواند برای تعداد بیت بالاتر نیز استفاده گردد. همچنین از خط تأخیر در آشکارساز استفاده شده است تا بتوان پالس‌های دریافتی را با قابلیت تنظیم و با دقت بالا آشکار نمود. آشکارساز، به همراه فرستنده‌ی پیشنهادی در فناوری 65 nm CMOS ساخته شده است. نتایج اندازه‌گیری، دقتی در حدود 1,2 cm، RMS برای فاصله‌سنجی دو مسیره به کمک آنتن‌های تمام جهته در یک فضای تمام فلزی و نیمه‌بسته و دقتی در حدود 2 nm CMOS برای فاصله‌ی ۶ متری در یک فضای بسته، نشان می‌دهد. همچنین نتایج اندازه‌گیری، مقاومت سیستم پیشنهادی را در مقابل تداخل‌های باند باریک و باند پهن، نشان می‌دهد.

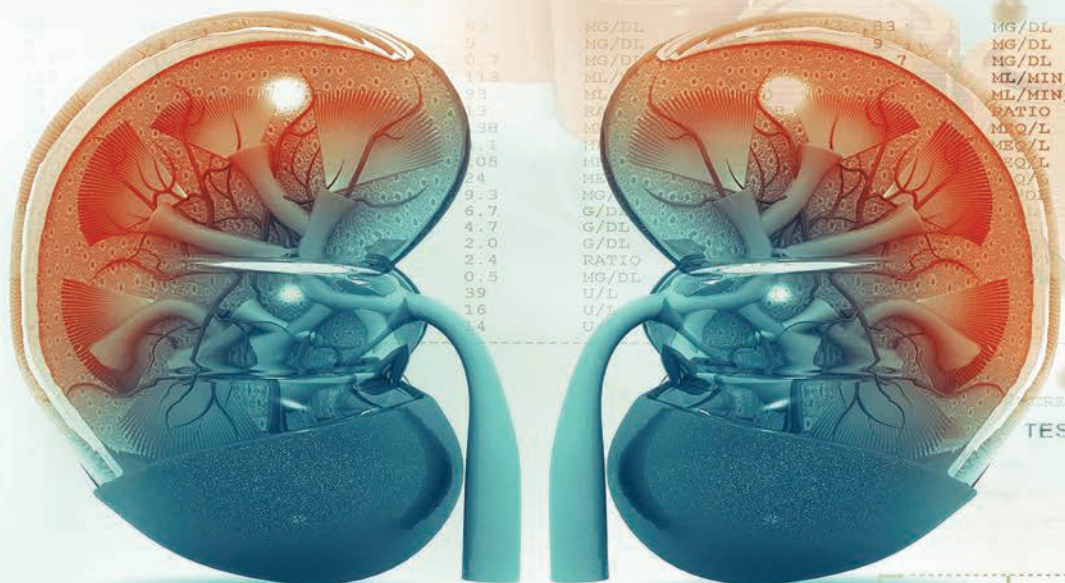
کلمات کلیدی:

فرایه‌ن باند، فاصله سنجی، بازتابنده‌ی فعال، تداخلگر فرایه‌ن باند.

در این رساله، دو چالش کنترل زمان محدود و کنترل با وجود قیود محدودیت بر روی تمامی حالت‌ها در سیستم‌های غیرخطی تصادفی به شکل بازخورد غیراکتید مورد بررسی قرار گرفته است. در مساله نخست، طراحی کنترل‌کننده ردیاب تطبیقی عصبی زمان محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. که در آن با استفاده از سیگنال‌های جبران‌ساز خطا و شبکه‌های عصبی، کنترل‌کننده‌ای بر مبنای فیلترهای فرمان زمان محدود ارائه شده و تضمین می‌کند که همه‌ی سیگنال‌های سیستم حلقه بسته، پایدار زمان محدود نیمه-سراسری در قالب احتمالات بوده و سیگنال خروجی، سیگنال مرجع را به‌خوبی ردیابی می‌کند. در مساله دوم، طراحی کنترل‌کننده ردیاب تطبیقی عصبی برای این کلاس از سیستم‌ها با وجود قیود محدودیت بر روی تمامی حالت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مساله، با استفاده از توابع لیاپانوف حامل و قضیه پایداری لیاپانوف، یک کنترل‌کننده تطبیقی عصبی طراحی شده که ضمانت می‌کند همه‌ی سیگنال‌های سیستم حلقه بسته، کران‌دار یکنواخت نیمه-سراسری در قالب احتمالات بوده و خطای ردیابی به همسایگی در اطراف صفر همگرا شده و همچنین قیود محدودیت حالت سیستم نقض نمی‌شوند. در هر دو این مسائل، رویکرد فیلترهای فرمان و شیوه جبران خطا به‌منظور حل مشکل انفجار پیچیدگی ناشی از روش متداول پسگام و حذف خطای فیلترها استفاده شده است. علاوه بر این، به‌منظور اجتناب از محاسبات بیش از حد و سنگین و اطمینان از اینکه روش پسگام بر مبنای فیلترهای فرمان برای سیستم‌های تصادفی به شکل بازخورد غیراکتید نیز کارآمد است، از شبکه‌های عصبی برای تقریب توابع غیرخطی نامعلوم، که شامل تمامی متغیرهای حالت سیستم هستند، استفاده شده است. در نهایت، اثربخشی و نحوه عملکرد هر کدام از دو مساله کنترلی این رساله در قالب شبیه‌سازی رایانه‌ای برای سیستم‌های دینامیکی مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی:

کنترل تطبیقی، سیستم‌های غیرخطی تصادفی، سیستم‌های بازخورد غیراکتید، فیلترهای فرمان، کنترل زمان محدود، توابع لیاپانوف حامل، محدودیت حالات.



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر روش‌های تشخیص و پیش‌بینی بیماری‌های مزمن کلیوی با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی

■ وهاب امینی‌آذر^{*}، استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد- ایران
Aminiazar@iau-mahabad.ac.ir

■ رسول فرحی، مربی، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد- ایران
Stu.rasoul-farahi@iaut.ac.ir
^{*}نویسنده مسئول

چکیده

رشد چشم‌گیر بیماری کلیوی، اثرات و عوارض آنها و هزینه‌هایی که بر جامعه وارد می‌شود، باعث شده است که جامعه پزشکی به دنبال برنامه‌هایی برای پیش‌بینی و تشخیص زودهنگام این بیماری باشند. در سال‌های اخیر استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی در حوزه پزشکی از اهمیت بالایی برخوردار شده است. هدف از این مقاله مروری بر روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های داده‌کاوی به منظور پیش‌بینی بیماری‌های مزمن کلیوی می‌باشد. در این مقاله قصد بر آن بوده تا جامعی از بیمارهای مزمن کلیوی، روش‌های تشخیص در حوزه پزشکی را گردآوری و بررسی نمود. بدین جهت در ابتدا بیمارهای مزمن کلیوی بررسی شده و پیرو این بررسی به بحث و تحلیل حوزه تشخیص زودهنگام این بیماری‌ها خواهیم پرداخت. در ادامه انواع الگوریتم‌های داده‌کاوی در تشخیص بیماری‌های مزمن کلیوی را معرفی خواهیم کرد. پس از آن به بحث در ارتباط با روش‌های تشخیص و پیش‌بینی بیمارهای مزمن کلیوی خواهیم پرداخت و این روش‌ها را از نظر اهداف، محدودیت‌ها و قابلیت‌ها نقد و بررسی خواهیم کرد. در این مقاله برای پیش‌بینی بیماری نارسایی کلیه دیدگاه‌های مختلف که عبارتند از: انتخاب ویژگی، روش طبقه‌بندی، ابزارهای استفاده شده، مورد بررسی قرار می‌گیرند، که با تحلیل الگوریتم‌های طبقه‌بندی نشان می‌دهیم استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، الگوریتم k- نزدیک‌ترین همسایه و الگوریتم بردار پشتیبان به همراه روش‌های انتخاب ویژگی می‌توانند نقش مؤثری در پیش‌بینی بیماری نارسایی کلیه داشته باشند. همچنین نتایج گویای این است که پایگاه داده UCI و ابزار MATLAB بیشترین کاربرد را در تشخیص و پیش‌بینی بیماری‌های مزمن کلیوی دارند.

کلمات کلیدی: نارسایی‌های مزمن کلیوی، تشخیص و پیش‌بینی بیماری، داده‌کاوی.

Survey on Diagnosis and Prediction Methods of Chronic Kidney Diseases Using Data Mining Techniques

■ Wahab Aminiazar^{*}, Department of Computer Engineering and Information Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University Mahabad Branch, Mahabad, Iran.

■ Rasoul Farahi, Department of Computer Engineering and Information Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University Mahabad Branch, Mahabad, Iran.

^{*}Corresponding Author

Abstract

The significant growth of kidney disease, its effects and complications, and the costs that are imposed on the

society, have caused the medical community to look for programs to predict and diagnose this disease early. In recent years, the use of data mining techniques in the field of medicine has gained great importance. The purpose of this article is to review methods based on data mining techniques in order to predict chronic kidney diseases. In this article, it is intended to collect and review a comprehensive review of chronic kidney disease, diagnosis methods in the field of medicine. In this paper, chronic kidney diseases were examined first, and following this examination, we will discuss and analyze the field of early diagnosis of these diseases. In the following, we will introduce various data-mining algorithms in the diagnosis of chronic kidney diseases. After that, we will discuss the methods of diagnosing and predicting chronic kidney diseases, and we will review these methods in terms of their goals, limitations, and capabilities. In this article, in order to predict the failure disease, all the different points of view, which are: feature selection, classification method, used tools, are examined, which we show by analyzing the classification algorithms. The use of random forest algorithm, k-nearest neighbor algorithm and support vector algorithm along with feature selection methods can play an effective role in predicting kidney failure disease. Also, the results show that the UCI database and MATLAB tool are the most useful in diagnosing and predicting chronic kidney diseases.

keyword: Chronic kidney failure, disease diagnosis and prediction, data mining

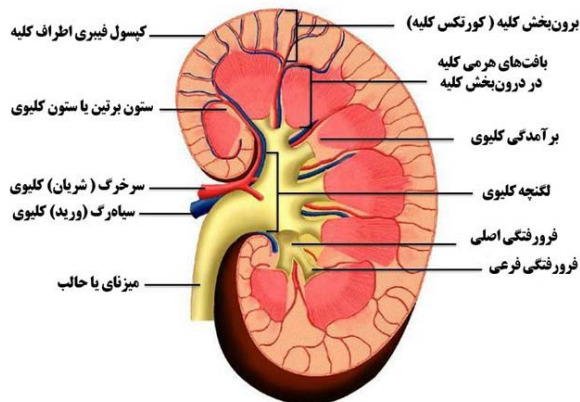
۱- مقدمه

تنها یک درصد از کل وزن بدن می‌باشد. که در هر دقیقه می‌تواند ۵۰-۵۵ درصد از خونی که توسط قلب پمپ می‌شود را دریافت و تصفیه نموده و سپس دوباره به بدن باز گرداند [۱۵]. کلیه به‌عنوان یک عضو حیاتی چندین نقش کلیدی از جمله حذف مواد زائد حاصل از فرایند متابولیک بدن، تنظیم تعادل اسید و باز خون، تولید هورمون‌هایی که در تنظیم ویتامین D نقش دارند، تولید گلبول قرمز خون و همچنین کنترل فشار خون موثر هستند، را بر عهده دارد. دو نوع مهم از بیماری‌های مرتبط با کلیه عبارتند از: نارسایی حاد کلیه و نارسایی مزمن کلیه. نارسایی حاد کلیه، به سرعت پیشرفت می‌کند که به‌طور معمول در کمتر از چند روز این اتفاق می‌افتد. نارسایی حاد کلیه در بیماران بستری به‌ویژه افراد به شدت بیمار که نیازمند مراقبت ویژه هستند، شایع است. این نوع نارسایی می‌تواند کشنده باشد و نیازمند درمان جدی است. با این وجود، نارسایی حاد کلیوی می‌تواند برگشت‌پذیر باشد. بیماری مزمن کلیه از دست دادن تدریجی عملکرد کلیه است که می‌تواند به هر علتی از دیابت و فشار خون بالا گرفته، تا عفونت‌های مکرر و انسداد مجاری ادراری رخ دهد. بیماری مزمن کلیه توانایی واحدهای عملکردی کلیه- نفرون‌ها را در تصفیه ضایعات و تنظیم آب و اسید خون مختل می‌کند.

اگر چه ممکن است در مراحل اولیه هیچ نشانه‌ای از بیماری وجود نداشته باشد، اما علائم با گذشت زمان پیشرفت می‌کنند. بیماری مزمن کلیه را می‌توان به کمک آزمایش‌های خون و ادرار تشخیص داد و در درمان، تمرکز بر روی درمان علت اصلی اختلال کلیه است. برخلاف نارسایی حاد کلیه، که به سرعت پیشرفت می‌کند و به‌طور بالقوه برگشت‌پذیر است، بیماری مزمن کلیه یک بیماری طولانی مدت است که در آن آسیب به کلیه‌ها دائمی و پیش‌رونده است [۱۶]. سیستم اطلاعات پزشکی نیز همواره حاوی اطلاعات بسیار مفیدی مانند سوابق بیماری تشخیص پزشک، نتایج درمان در قالب آزمایش و تصاویر می‌باشد. از این‌رو پژوهشگران پزشکی جهت شناسایی و کشف ارتباط بین عوامل خطر ساز یک بیماری و بروز بیماری پیش‌آگاهی از وقوع یک بیماری، کاهش خطاهای پزشکی و هزینه‌ها و در نهایت رسیدن به طب پیشگیری استفاده می‌کنند [۱۶]. بیماری‌های کلیوی مزمن یکی از شایع‌ترین و رو به رشدترین نوع بیماری‌ها است که تشخیص به موقع آن، شانس زنده ماندن و بهبود بهتر را افزایش می‌دهد. امروزه با توجه به

در دو دهه گذشته رشد سریع داده‌ها در پزشکی از چالش‌های اساسی بوده است با توجه به پیشرفت سریع روش‌های بیوتکنولوژی و روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های زیستی، روش‌های داده‌کاوی در حال رشد می‌باشد. امروزه برای تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی داده‌های بزرگ پزشکی از الگوریتم‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین استفاده می‌شود. هدف اصلی از تجزیه و تحلیل این داده‌ها توسعه مدل‌های مختلف پیش‌بینی در حوزه پزشکی است. تشخیص بیماری یک موضوع داغ در پژوهش‌های فعلی است ویژگی اصلی مدل تشخیص بیماری تصمیم‌گیری سریع پزشکان و کاهش اشتباه‌ها در تشخیص است و داده‌های پزشکی را خیلی سریع بررسی می‌کند. همچنین از آنجایی که داده‌های پزشکی شامل تعداد زیادی ویژگی است و محققان تنها زیرمجموعه‌هایی از این ویژگی‌ها را در نظر می‌گیرند و این ویژگی‌ها برای تشخیص بیماری حیاتی است. بنابراین بررسی این ویژگی‌های مهم باید بسیار دقیق باشد و باید در نظر داشت که هر کدام از این ویژگی‌ها هزینه‌هایی برای بیمار در بر خواهد داشت [۱]. دوران محاسبات مدرن دستیابی به روش‌های هوشمند در بیوانفورماتیک را گسترش داده است با توجه به عدم اطمینان در داده‌های پزشکی دریافت اطلاعات قابل درک تبدیل به چالشی بزرگ برای پزشکان شده است این چالش می‌تواند به تشخیص اشتباه یک بیماری منجر شود که بیشتر باعث درمان نامناسب بیماری می‌شود از این‌رو اگر متخصصان بتوانند با استفاده از تکنیک‌های هوشمند که قادر به تصمیم‌گیری هستند با بررسی دقیق داده‌های پیچیده و مبهم ارزیابی خود را انجام دهند برای بیماران مفید خواهد بود. سیستم‌های هوشمند احتمال وقوع خطاهای پزشکی، هزینه و زمان را کاهش می‌دهد [۲۰]. به‌کارگیری دانش داده‌کاوی در حوزه تشخیص بیماری‌های کلیوی از جمله شیوه‌های هوشمندی است که می‌تواند با تحلیل عوامل مؤثر مشکلات کلیوی را زودتر و دقیق‌تر تشخیص داده و به توسعه پژوهش‌های پزشکی و تصمیم‌گیری‌های علمی در زمینه تشخیص و درمان منجر شود. کاربرد داده‌کاوی در محیط‌های درمانی بسیار متفاوت با سایر کاربردهای داده‌کاوی است، به این دلیل که در بسیاری از مواقع کیفیت داده‌های پزشکی نامرغوب‌تر از کیفیت داده‌های سایر حوزه‌ها است [۴].

کلیه؛ یکی از ارگان‌های اساسی در بدن هر انسان می‌باشد که در دو طرف بدن و زیر دنده‌ها قرار دارد. وزن این اندام لوبیایی شکل



شکل ۱: کلیه و قسمت‌های مختلف آن

کند، مایع اضافی و مواد زائد در بدن جمع می‌شود و علائم و ورم شدید اورمی (نارسایی کلیوی) بروز می‌کند. بیماری کلیه انواع و علل متفاوتی دارد در این بخش به معرفی مهمترین آنها می‌پردازیم.

۳-۱- سنگ کلیه

به ذرات کوچک و سختی گفته می‌شود که در یک یا هر دو کلیه تشکیل می‌شود و گاهی به داخل حالب‌ها انتقال می‌یابد. سنگ کلیه از نظر اندازه از یک دانه شن تا حدود یک توپ گلف متغیر و ممکن است منفرد یا متعدد باشد. سنگ کلیه به‌طور معمول بزرگسالان بالای ۳۰ سال را از هر دو جنس مرد و زن مبتلا می‌سازد و البته بروز آن در مردان شایع‌تر است. سنگ‌های مجاری ادراری دارای انواع مختلفی هستند. چهار نوع از آنها که شیوع بیشتری دارند و بیشتر مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته‌اند، به ترتیب شیوع عبارتند از: سنگ‌های کلسیمی، اسید اوریکی، استروئیدی و سیستئینی.

سنگ‌های کلسیمی شایع‌ترین سنگ‌ها هستند و تشخیص آنها با عکسبرداری ساده توسط اشعه ایکس است، چون به‌طور کامل جلوی عبور اشعه را می‌گیرند و یک سایه واضح روی عکس ایجاد می‌کنند. سنگ‌های کلسیمی حل نمی‌شوند و برای درمانشان روش‌های طبی کمتر جواب می‌دهد. سنگ‌های اسیداوریکی در مبتلایان به نقرس یا سایر افرادی که اسید اوریک زیادی در ادرارشان دفع می‌کنند شایع‌تر است. این سنگ‌ها، اشعه ایکس را از خود عبور می‌دهند و در نتیجه، روی کلیشه‌های رادیوگرافی، سایه‌ای به جا نمی‌گذارند. بنابراین به این وسیله نمی‌توان آنها را تشخیص داد. برای مشاهده آنها، از عکسبرداری با مواد حاجب یا سونوگرافی استفاده می‌شود. سنگ‌های استروئیدی (سنگ‌های منیزیم آمونیوم فسفات) همیشه در ارتباط با عفونت مزمن ادراری با برخی باکتری‌های خاص هستند. هرچند تشخیص آنها از طریق عکسبرداری با اشعه ایکس یا سونوگرافی ساده است، ولی از آنجا که به‌طور معمول محدود به کلیه و بدون علامت هستند، در مراحل اولیه تشخیص داده نمی‌شوند و در موارد زیادی، با رشد آرام خود، به تخریب و نارسایی کلیه در اثر انسداد طولانی مدت منجر می‌شوند. سنگ‌های استروئیدی و نوع مشابه آنها، یعنی سنگ‌های کراتینی، شایع نیستند و دارای علل ارثی یا در ارتباط با یکسری بیماری‌های خاص هستند [۹].

۳-۲- سرطان کلیه

سرطان کلیه حدود ۳ درصد از بدخیمی‌های بزرگسالان را تشکیل می‌دهد و این بیماری بیشتر در فاصله سنی ۴۰ تا ۶۰ سالگی

بانک‌های اطلاعاتی می‌توان از داده‌های گسترده‌ای برای تشخیص استفاده کرد. با گسترش فناوری حجم زیادی از داده‌های مرتبط با نارسایی‌های کلیوی و با ابعاد بالا تولید شده‌اند که استفاده از همه‌ی آنها علاوه بر مقرون به‌صرفه نبودن، حتی باعث کاهش دقت مدل تشخیصی نیز می‌گردد ارائه روش‌های هوشمند پیش‌گویانه در خصوص تشخیص زود هنگام بیماری مزمن کلیه، نیز سال‌ها است که مورد توجه افرادی که در این زمینه مطالعه می‌کنند، قرار گرفته است. این روش‌ها شامل روش‌های گوناگون طبقه‌بندی در علم داده‌کاوی می‌باشد.

۲- کلیه

این اندام مهم در انسان به شکل لوبیا و تا حدودی به اندازه مشت بسته و به رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای در طرفین ستون مهره‌ها و زیر دنده‌های تحتانی واقع شده است و بیشتر اعضای بدن برای عملکرد مطلوب، به آن وابسته‌اند. هر کلیه بیش از یک میلیون واحد تصفیه‌کننده در خود دارد و قادر است روزانه ۱۸۰ لیتر مایع را تصفیه کند و بیش از ۵۰ عنصر شیمیایی محلول در این مایع را استخراج می‌کند. ترکیبات مایع ورودی به کلیه‌ها که در واقع همان پلاسمای خون است با مایعی که در کلیه‌ها وجود دارد فیلتر می‌شود و سموم بدن به صورت ادرار که اندازه آن حدود ۱ تا ۲ لیتر در شبانه‌روز است دفع می‌شود. همان‌طور که گفته شد بیش از ۵۰ عنصر شیمیایی محلول در خون، در کلیه استخراج می‌شود بنابراین کلیه در مرحله نخست یک عضو انتخاب‌کننده است که عناصر بیهوده و مضر را تصفیه می‌کند و تا زمانی که عناصر مفیدی مانند گلوکز، آلبومین، املاح محلول و ... به اندازه مناسب در خون وجود داشته باشند به حال خود رها می‌کند از نظر گردش خون، کلیه‌ها ۲۲ درصد خروجی قلب را به خود اختصاص می‌دهند [۱۷].

واحد اصلی عملکرد کلیه، لوله بسیار ریز و باریکی به نام نفرون^۱ است. داخل هر کلیه بیش از یک میلیون نفرون وجود دارد. به‌طور معمول از ۴۰ سالگی به بعد، تعداد نفرون‌های فعال کلیه، هر ۱۰ سال حدود ۱۰ درصد کم می‌شود. بر همین اساس نفرون‌های فعال در بسیاری از افراد ۸۰ ساله به‌طور حدودی ۴۰ درصد کمتر از تعداد آنها در زمان ۴۰ سالگی است. البته کاهش تعداد آنها حیات فرد را تهدید نمی‌کند، زیرا نفرون‌های باقیمانده دستخوش تغییرات سازشی خاصی می‌شوند که به آنها امکان دفع مقادیر مناسب آب و الکترولیت‌ها و محصولات زائد را می‌دهند.

کلیه‌ها در دیواره پشتی شکم در حدود دنده ۱۲ و نخستین تا دومین مهره کمر قرار می‌گیرند. کلیه راست به واسطه فشار کبد، کمی پایین‌تر از کلیه چپ قرار دارد. کلیه، عضوی است لوبیایی شکل، دارای یک انتهای فوقانی و یک انتهای تحتانی که «قطبین کلیه» نامیده می‌شوند. در کناره داخلی، یک بریدگی است به اسم «ناف کلیه» که از آنجا حالب، اعصاب، سرخرگ، سیاهرگ و لنف به کلیه وارد و از آن خارج می‌شوند. در داخل کلیه، تاق به فضای مرکزی بزرگتری وصل می‌شود به نام سینوس کلیه که در آن کالیس‌های بزرگ و کوچک، لگنچه، اعصاب و عروق خونی قرار دارند [۱۸]. در شکل (۱) قسمت‌های مختلف کلیه نشان داده شده است.

۳- بیماری‌های کلیوی

ناراحتی کلیه به‌طور معمول هر دو کلیه را درگیر می‌کند. اگر بیماری، توانایی کلیه را در دفع و تنظیم آب و مواد شیمیایی مختل

دیده می‌شود. سرطان کلیه در بیش از ۵۰ درصد موارد علامتی ندارد و به‌صورت تصادفی تشخیص داده می‌شود. به‌عنوان مثال، بیمار به دلیل درد معده یا درد پهلو به پزشک مراجعه می‌کند و در سونوگرافی، وجود توده در کلیه گزارش می‌شود. مهمترین عامل مستعدکننده به این سرطان، سیگار است. در کسانی که به مدت طولانی سیگار می‌کشند شانس ابتلا به سرطان کلیه بالا است. چاقی نیز از دیگر ریسک فاکتورهای سرطان کلیه محسوب می‌شود. همچنین برخی از بیماری‌های ژنتیکی می‌تواند شخص را مستعد سرطان کلیه کند. هرچند سرطان کلیه ممکن است علامتی نداشته باشد، با وجود این در صورتی که بیمار علائم زیر را مشاهده کرد باید به سرعت به پزشک مراجعه کند. وجود خون در ادرار از شایع‌ترین علامت سرطان کلیه است. بنابراین هر فردی که به‌طور واضح ادرار خود را خونی دید یا تغییر رنگ در ادرار مشاهده کرد باید به سرعت به پزشک مراجعه کند چرا که ممکن است یکی از علل آن سرطان کلیه باشد. علامت بعدی، درد پهلو است که با سنگینی یکی از پهلوها همراه است. علامت شایع بعدی، وجود یک توده قابل لمس است برای تشخیص این بیماری باید آزمایش کامل ادرار صورت گیرد تا وجود خون در ادرار معلوم شود. قدم بعدی، سونوگرافی از کلیه‌ها و مثانه است که توده توپر را در کلیه نشان می‌دهد. در حال حاضر بهترین وسیله برای تشخیص تومورهای کلیه، سیتی اسکن شکم است. سرطان کلیه به دلیل ترشح موادی در بدن ممکن است باعث بروز علائم ناآشنایی نظیر: کم خونی، اختلال در عملکرد کبد و افزایش کلسیم خون شود. بعد از انجام سیتی اسکن و تشخیص تومور کلیه بیمار از لحاظ بررسی انتشار تومور به نواحی دیگر نیز باید مورد بررسی قرار بگیرد. در حال حاضر بهترین درمان سرطان کلیه جراحی آن به‌صورت برداشتن کلیه غده فوق کلیه، چربی اطراف کلیه، شریان وریدی، حالب و غدد لنفاوی موضعی است. متأسفانه این سرطان به شیمی درمانی و رادیوتراپی پاسخ خوبی نمی‌دهد و بعد از جراحی نیز احتمال بقای ۵ ساله بیماری بالای ۹۰ درصد است. شیوع سرطان کلیه در مردان ۲ برابر زنان است [۱۰].

۳-۳- نارسایی مزمن کلیوی

یک فرایند پاتوفیزیولوژیک با علل متعدد است که نتیجه آن کاهش توقف‌ناپذیر تعداد و کارکرد نفرون‌ها است و در بسیاری از موارد منجر به بیماری کلیوی مرحله انتهایی می‌شود [۱۰]. نارسایی مزمن پیشرفته کلیه، تخریب پیش‌رونده و برگشت‌ناپذیر عملکرد کلیوی است. در این مرحله توانایی بدن در حفظ سوخت‌وساز و تعادل آب و الکترولیت‌ها از بین رفته و در نتیجه اورمی ایجاد می‌شود، درمان اصلی، پیوند کلیه است، اما با توجه به اینکه دستیابی به کلیه پیوندی در بیشتر نقاط جهان آسان نیست، تا زمان پیوند کلیه، بیمار باید تحت درمان با دیالیز قرار گیرد. این شرایط نه تنها بر سلامت جسم و روان فرد تاثیر گذاشته و زندگی وی را تهدید می‌کند، بلکه هزینه‌های خدمات سلامتی را نیز بالا می‌برد [۱۰ و ۱۱].

۳-۴- مرحله انتهایی نارسایی کلیه

پیوند کلیه یک اقدام جراحی است که در آن یک کلیه اهدایی، به فرد پیوند زده می‌شود. یک پیوند کلیه موفق به فرد اجازه زندگی معمولی و سالم را می‌دهد و او را از درمان دیالیز رها می‌کند. پیوند، درمانی برای گروهی از مبتلایان به نارسایی پیشرفته کلیه است که برای پیوند، مناسب تشخیص داده شده‌اند. دو نوع پیوند کلیه وجود دارد: اهدا از فرد زنده و اهدا از جسد. در پیوند کلیه

از اهداکنندگان زنده، باید گروه خونی و بافت اهداکننده و گیرنده با هم منطبق باشد. آزمایش‌ها و بررسی‌های کاملی برای سلامت اهدا کننده و کلیه اهدایی صورت می‌گیرد. افرادی که کلیه اهدا می‌کنند در ادامه عمرشان می‌توانند از زندگی طبیعی بهره‌مند شوند [۱۲].

۳-۵- دیالیز

کلیه‌ها مسئول فیلتر کردن و در واقع تصفیه کردن مواد زائد از خون هستند. دیالیز عملیاتی است که جایگزینی برای بسیاری از وظایف و مسئولیت‌های طبیعی کلیه‌ها می‌باشد. دیالیز به افراد این امکان را می‌دهد، با اینکه دیگر کلیه‌هایشان به خوبی کار نمی‌کند، بتوانند زندگی خوب و مفیدی را بگذرانند. یکی از وظایف اصلی کلیه‌ها خارج کردن مواد زائد از بدن است. بیماران زمانی که مواد زائد بدنشان آنقدر زیاد می‌شود که به‌خاطر آن ناراحتی در بدن‌شان ایجاد می‌گردد، نیاز به انجام دیالیز پیدا می‌کنند. سطح مواد زائد به‌طور معمول کم کم در بدن افزایش می‌یابد، پزشکان مواد شیمیایی مختلفی را در خون اندازه‌گیری می‌کنند تا ببینند چه زمان دیالیز برای بیمار لازم می‌شود. مهمترین مواد شیمیایی موجود در خون که برای این مورد اندازه‌گیری می‌شوند، کراتینین و اوره خون است. وقتی مقدار این دو ماده در خون بالا می‌رود، نشان دهنده این است که توانایی کلیه‌ها برای تصفیه بدن از مواد زائد پایین آمده است [۱۳].

۴- داده‌کاوی و الگوریتم‌های داده‌کاوی

امروزه در دانش پزشکی جمع‌آوری داده‌های فراوان در مورد بیماری‌های مختلف از اهمیت فراوانی برخوردار است. مراکز پزشکی با مقاصد گوناگونی به جمع‌آوری این داده‌ها می‌پردازند. تحقیق روی این داده‌ها و به‌دست آوردن نتایج و الگوهای مفید در رابطه با بیماری‌ها، یکی از اهداف استفاده از این داده‌ها است. حجم زیاد این داده‌ها و سردرگمی حاصل از آن مشکلی است که مانع رسیدن به نتایج قابل توجه می‌شود.

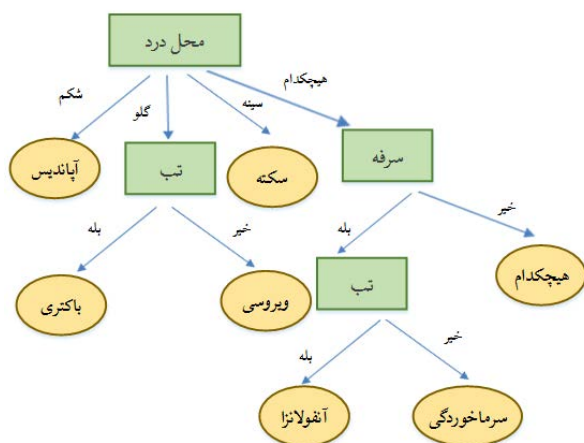
بنابراین از داده‌کاوی برای غلبه بر این مشکل و به‌دست آوردن روابط مفید بین عوامل خطرزا در بیماری‌ها استفاده می‌شود. داده‌کاوی به‌عنوان فرآیندی برای یافتن الگوها و ارتباطات در پایگاه داده به همراه استفاده از اطلاعات برای ساختن مدل‌های پیش‌بینی تعریف شده است [۱۴] و همچنین از آن به‌عنوان فرآیندی برای انتخاب، اکتشاف و ساختن مدل‌ها با استفاده از انبوه داده‌های ذخیره شده برای کشف الگوهای از پیش موجود نیز یاد می‌شود [۱۵]. از داده‌کاوی برای شناسایی روابط و الگوهای نو، صحیح، قابل فهم و به‌صورت بالقوه مفید در درون داده‌ها با استفاده از ترکیب مجموعه داده‌ها و استخراج الگوهای پیچیده برای انسان استفاده می‌شود [۱۶]. داده‌کاوی، گامی مهم در کشف و استخراج دانش می‌باشد؛ این اصطلاح به معنای کاوش مجموعه داده‌های بزرگ برای استخراج الگوهای ناشناخته بین داده‌ها است [۱۷] از آنجایی که کشف روابط بین داده‌ها در روش‌های سنتی آماری بسیار مشکل است [۱۸] از این‌رو کاربرد داده‌کاوی به سرعت در بخش‌های وسیعی از قبیل سازمان‌های ارائه خدمات بهداشتی، پیش‌بینی مالی و پیش‌بینی هوا گسترش یافته است [۱۹].

داده‌کاوی در مراقبت سلامت، شاخه بسیار مهمی در تشخیص و فهم عمیق‌تر داده‌های پزشکی می‌باشد. داده‌کاوی بهداشتی درمانی، درصدد حل مسائل دنیای واقعی در تشخیص و درمان بیماری‌ها است [۲۰]. همچنین در مراقبت بهداشتی درمانی، زمینه

بالایی برخوردار است و طراحی سیستم‌های کمک تصمیم جهت یاری رساندن به پزشکان در زمینه تشخیص نوع بیماری و یا انتخاب نوع درمان مناسب، با کمک داده‌کاوی می‌تواند کمک شایانی در زمینه نجات جان انسان‌ها انجام دهد [۴۴]. در ادامه انواع الگوریتم‌های داده‌کاوی که در حوزه تشخیص و پیش‌بینی بیمارهای نارسایی کلیوی کاربرد دارند مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۱- الگوریتم درخت تصمیم^۵

درخت تصمیم، یکی از ابزارهای قوی و متداول برای رده‌بندی و پیش‌بینی می‌باشد. در ساختار درخت تصمیم، پیش‌بینی به‌دست آمده از درخت در قالب یک سری قواعد توضیح داده می‌شود. ساختار درخت تصمیم، یک ساختار درختی، شبیه فلوچارت است. بالاترین گره در درخت، گره ریشه است و گره‌های برگ، رده‌ها را مشخص می‌کنند [۲۶].



شکل ۲: نمونه‌ای از یک درخت تصمیم

پیدایش درخت تصمیم، شامل دو مرحله است: مرحله رشد و ایجاد درخت و مرحله هرس درخت با هدف کمینه کردن خطای پیش‌بینی [۲۶ و ۲۵]. تمام الگوریتم‌های ایجاد درخت، با نگرش بالا به پایین ایجاد می‌شوند. روش‌های متفاوتی برای ایجاد درخت وجود دارد. یکی از روش‌های معمول برای ایجاد درخت، انتخاب معیاری برای انشعاب گره‌های بالایی به تعدادی زیرگره می‌باشد. انتخاب نقطه شکست و ایجاد انشعاب در درخت از اهمیت خاصی برخوردار است. مهمترین معیارها برای انتخاب نقطه شکست، دو معیار جینی^۶ و آنتروپی^۷ هستند [۲۶]. این معیارها، مبتنی بر ناخالصی می‌باشند. همواره متغیری برای انشعاب، انتخاب می‌شود که باعث کاهش ناخالصی شود. در انتخاب نقطه شکست، متغیری که زیرگروهش به یکی از رده‌ها (برگ) تبدیل شود، اولویت دارد.

۴-۲- شبکه عصبی چند لایه^۸

شبکه عصبی مصنوعی، یک مدل محاسباتی الهام گرفته شده از ساختار و رفتار شبکه عصبی بیولوژیکی است. شبکه عصبی از یک گروه به هم پیوسته از نورون‌ها مصنوعی تشکیل شده که پردازش اطلاعات در آن با استفاده از ارتباط بین نورون‌ها انجام می‌شود. شبکه عصبی دارای معماری‌های پیاده‌سازی مختلفی است. برای پیش‌بینی و کلاسه‌بندی داده‌ها، به‌طور معمول از شبکه عصبی پیش‌خور چند لایه استفاده می‌شود. این نوع شبکه عصبی، از یک لایه ورودی و یک لایه خروجی و چندین لایه پنهان ایجاد می‌شود. اطلاعات اولیه شبکه در لایه ورودی دریافت شده و پس از

تحقیقاتی مهمی برای پیش‌بینی بیماری‌ها و درکی عمیق‌تر از داده‌های بهداشتی درمانی محسوب می‌شود. داده‌کاوی بهداشتی درمانی قصد دارد تا مسائل دنیای واقعی را در تشخیص و درمان بیماری‌ها حل کند [۴۲]. پژوهشگران از این روش برای تشخیص بیماری‌های مختلف استفاده می‌کنند و برای این کار از روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی بهره می‌برند که میزان درستی و دقت آنها با یکدیگر متفاوت است [۲۱]. کاربردهای داده‌کاوی می‌تواند در تمام بخش‌های صنعت مراقبت بهداشتی درمانی به‌صورت جدی مفید باشند. برای مثال سازمان‌های ارائه‌دهنده خدمات بیمه بهداشتی درمانی می‌توانند کلاهبرداری و سوء استفاده‌ها را شناسایی نمایند؛ سازمان‌های بهداشتی درمانی تصمیمات مربوط به مدیریت ارتباط با مراجعه‌کنندگان را اتخاذ نمایند، پزشکان، درمان‌های موثر و بهترین شیوه‌های درمانی را شناسایی نمایند و بیماران، خدمات مراقبتی بهتر و رضایت بخش‌تر را دریافت نمایند [۲۳ و ۲۲]. شناخت روش‌های پیشگیرانه و درمانی در بیماری‌های مزمن از قبیل آسم از طریق داده‌کاوی میسر می‌شود و این روش نقش بارزی در شناخت الگوها دارد [۲۴]. ابزارها و روش‌های بسیاری برای داده‌کاوی و تحلیل آنها وجود دارد که الگوریتم‌های مشابهی را پیاده‌سازی کرده‌اند. این پژوهش با استفاده از روش‌های تحلیل و داده‌کاوی قصد دارد تا با تحلیل داده‌های گردآوری شده برای بیماری پارکینسون، بخشی از دانش پنهان در آن را کشف نموده و گزارش کند. فرایند کشف دانش دارای چندین مرحله می‌باشد که دقت در انجام هر کدام از این مراحل، روی کیفیت کل فرایند تاثیر گذار است. این مراحل عبارتند از:

۱- **فهم و تعریف مساله:** مرحله نخست فهم حوزه کاری و مساله‌ای است که سعی در پیدا کردن راه حل برای آن داریم. درک کامل مساله پیش‌نیاز ضروری برای انتخاب روش مناسب داده‌کاوی و کشف دانش مفید از میان داده‌ها می‌باشد [۲۵].

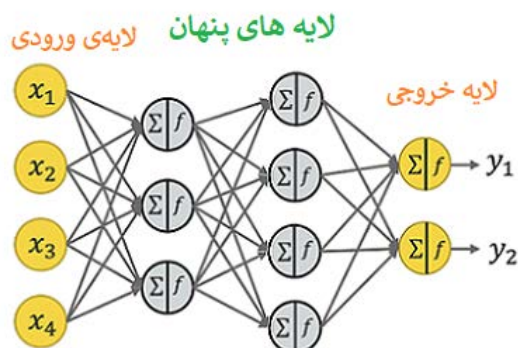
۲- **جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها:** پیش‌پردازش داده‌ها خود شامل مراحل است. این مراحل عبارتند از: یکپارچه‌سازی، حذف نویزها، مقابله با مقادیر مفقوده و تغییر شکل داده‌ها، کاهش تعداد داده‌ها و یا تعداد ویژگی‌ها و غیره [۲۵].

۳- **داده‌کاوی:** مرحله سوم همان مرحله داده‌کاوی است که با انجام آن الگوها و مدل‌های پنهان در میان داده‌ها استخراج می‌شود. در این مرحله ما باید نخست وظیفه داده‌کاوی^۹ و سپس روش داده‌کاوی را انتخاب نماییم [۲۵].

۴- **تفسیر و ارزیابی نتایج:** مرحله چهارم شامل تفسیر نتایج به‌دست آمده از مرحله سوم می‌باشد. به‌الزام نتایج به‌دست آمده از مرحله سوم قابل اطمینان نیستند و ممکن است بیانگر دانش مفید و قابل استفاده نباشند. به همین خاطر باید این نتایج را به گونه‌ای ارزیابی نمود. برای ارزیابی مدل به‌دست آمده می‌توان در ابتدای امر، داده‌ها را به دو دسته آموزش^{۱۰} و آزمایش^{۱۱} تقسیم نمود، مدل را روی داده‌های آموزش ساخت و سپس نتایج به‌دست آمده را روی داده‌های تست آزمایش کرد و دقت مدل را محاسبه نمود [۲۵].

۵- **استفاده از دانش کشف شده:** مرحله آخر استفاده از دانش استخراج شده از داده‌ها به‌صورت عملی می‌باشد. در حقیقت هدف از انجام مراحل مختلف کشف دانش، دستیابی به نتایجی است که بتوان از آنها در دنیای واقعی و برای بهبود کارایی سازمان‌ها استفاده کرد. این دانش استخراج شده می‌تواند به‌عنوان یک سیستم کمک تصمیم در دنیای واقعی مورد استفاده قرار گیرد. داده‌کاوی روی داده‌های پزشکی از اهمیت

محاسبات و وزن دهی در لایه پنهان به لایه خروجی ارسال می شود. الگوریتم های مختلفی برای وزن دهی ارتباطات بین لایه ها براساس مقادیر لایه ورودی تعریف شده است. الگوریتم انتشار، یک الگوریتم یادگیری با ناظر بوده که دارای دو مرحله انتشار و تغییر وزن ها است. این دو مرحله، آنقدر تکرار شده تا کارایی شبکه به اندازه کافی برسد. الگوریتم های لونیگ-مارکوارت، گرادینت مزدوج پل-ریبیر، سایر الگوریتم های یادگیری هستند. مقداردهی اولیه وزن ها به صورت تصادفی است. زمان آموزش در شبکه عصبی طولانی است و بیشتر در مواردی استفاده می شود که زمان یادگیری، در آنها مهم نباشد. در شکل (۳) یک شبکه عصبی با سه لایه نمایش داده شده است [۲۷].



شکل ۳: ساختار شبکه عصبی چند لایه

۳-۴- الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۹

ماشین بردار پشتیبان نوع خاصی از شبکه های عصبی هستند که بر خلاف سایر انواع شبکه عصبی مانند شبکه عصبی چند لایه^{۱۰}، شبکه عصبی پایه شعاعی^{۱۱} به جای کمینه کردن خطا، اقدام به کمینه کردن ریسک عملیاتی کلاسه بندی یا مدل سازی می کند. این ابزار، بسیار قدرتمند است و در زمینه های مختلفی چون کلاسه بندی، خوشه بندی و مدل سازی (رگرسیون) می تواند مورد استفاده قرار بگیرد. یکی از الگوریتم های مهم از میان ماشین های بردار پشتیبان، رگرسیون بردار پشتیبان^{۱۲} می باشد. در آمار کلاسیک روش های کلاسه بندی و رگرسیون بر پایه فرضیات محدود کننده ای بنا شده که در آن مدل های توزیع احتمال و یا توابع چگالی احتمال، معلوم هستند. متأسفانه بسیاری اوقات، در عمل اطلاعات کافی درباره توزیع احتمال متغیرهای مورد مطالعه در دسترس نیست. در چنین مواقعی به روش هایی نیاز داریم که بدون دانستن توزیع احتمال، به خوبی عمل کنند. همچنین در بیشتر مطالعات با اطلاعاتی در فضاهایی با ابعاد بالا مواجه هستیم [۲۷]. برای استفاده از روش های کلاسیک آماری در چنین شرایطی، نیازمند نمونه هایی با حجم بالا می باشیم که ممکن است در عمل فراهم کردن آن میسر نباشد. یکی از روش هایی که برای حل چنین مشکلاتی مورد استفاده قرار می گیرد، استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین است. ماشین بردار پشتیبان یک تکنیک جدید از روش های یادگیری ماشین است و می توان محبوبیت کنونی آن را با محبوبیت شبکه های عصبی در دهه های گذشته مقایسه کرد. ماشین بردار پشتیبان در پیش بینی ها نسبت به شبکه های عصبی از دقت بالاتری برخوردار است. از طرفی تعیین وضعیت شبکه و قابلیت تعمیم شبکه عصبی برای وظایف مدل سازی/یادگیری هنوز به خوبی حل نشده است، در حالی که مدل ماشین بردار پشتیبان

به خوبی تعمیم پذیر است. ویژگی مهم ماشین بردار پشتیبان این است که بر خلاف الگوریتم های کلاسیک و رگرسیون های خطی که به وسیله کمینه کردن قدر مطلق خطا یا توان دوم خطا عمل می کنند، آنها ریسک عملیاتی را کمینه می کنند. ماشین بردار پشتیبان برخلاف شبکه های عصبی با مشکل گیر افتادن در کمینه های محلی تابع خطا مواجه نمی باشد. همچنین با استفاده از هسته های غیر خطی قادر به تصمیم گیری غیر خطی نیز می باشد. انتخاب هسته های مناسب برای ماشین بردار پشتیبان، منجر به برتری آن نسبت به سایر رویکردهای مبتنی بر تصمیم گیری خطی شده است. مدل های ماشین های بردار پشتیبان به دو گروه عمده مدل کلاسه بندی ماشین های بردار پشتیبان و مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان تقسیم بندی می شوند. از مدل کلاسه بندی ماشین بردار پشتیبان جهت حل مسائل کلاسه بندی داده هایی که در کلاس های مختلف قرار می گیرند استفاده می شود و مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان در حل مسائل پیش بینی کاربرد دارد [۲۶ و ۲۷ و ۲۸].

۴-۴- الگوریتم جنگل تصادفی^{۱۳}

روش جنگل تصادفی یک روش غیر پارامتری و متعلق به خانواده روش های دسته جمعی که در اواخر قرن نوزدهم از روش های ماشین یادگیری به دست آمد. این الگوریتم را که شامل مجموعه ای از درخت های دسته بندی و رگرسیونی است نخستین بار بریمن توسعه داد [۲۸]. روش جنگلی تصادفی از مجموعه ای از درخت ها که با بازسازی داده های آموزشی به کار گرفته شده است ساخته می شود در حالت عادی مجموعه ای از نمونه ها هستند که به شکل تصادفی با جایگزین داده های آموزشی اصلی شکل می گیرند. ترکیب سه پارامتر در الگوریتم جنگل تصادفی ضروری است نخست این که چه تعداد درخت باید ساخته شود. دیگر اینکه چه تعداد از متغیرها در ایجاد یک گره برای شبکه شرکت می کنند و پارامتر سوم به اندازه گره بر می گردد که عمق درخت ساخته شده را نشان می دهد. در زمان ساخته شدن یک درخت مجموعه آموزشی جدید با جایگزینی مجموعه داده های آموزشی اصلی ساخته می شود.

۴-۵- الگوریتم رگرسیون^{۱۴}

پیش گویی مقادیر پیوسته می تواند توسط تکنیک های آماری که رگرسیون نامیده می شود مدل سازی شوند. هدف تحلیل رگرسیون تعیین بهترین مدلی است که بتواند متغیر خروجی با متغیرهای ورودی متعدد را تعیین کند. بیشتر حالات تحلیل رگرسیون حالتی است که تعیین کننده چگونگی ارتباط متغیر Y با یک یا چند متغیر $X_1, X_2, \dots, X_n$ باشد. Y به طور معمول خروجی پاسخ یا متغیر وابسته نامیده می شود و $X_1, X_2, \dots, X_n$ ورودی ها، برگشت کننده ها، متغیرهای توضیحی یا متغیرهای مستقل نامیده می شوند. [۲۸].

۴-۶- الگوریتم منطق فازی^{۱۵}

منطق فازی شکلی از منطق های چند ارزشی بوده که در آن ارزش منطقی متغیرها می تواند هر عدد حقیقی بین ۰ و ۱ و خود آن ها باشد. این منطق به منظور به کارگیری مفهوم درست و جزئی به کارگیری می شود، به طوری که میزان درستی می تواند هر مقداری بین به طور کامل درست و به طور کامل غلط باشد. این الگوریتم دارای تابع عضویت فازی است که مشخص کننده عضویت یک متغیر در منطق فازی می باشد. این تابع باید به گونه ای تعریف شود که قادر به انعکاس رفتار مناسبی از هدف باشد تا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از این تابع در موارد مختلفی

مانند پردازش تصاویر AND-Like و OR-Like عملگرهای متعددی از جمله دیجیتال، تشخیص الگو و سیستم‌های کنترلی استفاده می‌شود و به‌منظور اجرای خوشه‌بندی ابتکاری و بهینه‌سازی مسیریابی در مسائل چند هدفی نیز مناسب می‌باشد. با این وجود این الگوریتم یک جواب بهینه تولید نخواهد کرد [۲۸].

۴-۷- الگوریتم ژنتیک^{۱۶}

محدوده کاری الگوریتم ژنتیک بسیار وسیع بوده و هر روز با پیشرفت روز افزون علوم و فناوری استفاده از این روش در بهینه‌سازی و حل مسائل بسیار گسترش یافته است. الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های محاسبات تکامل یافته می‌باشد که رابطه مستقیمی با مبحث هوش مصنوعی دارد و آن را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی تقلید می‌کند [۲۹].

در الگوریتم ژنتیک یک کروموزوم نشان دهنده جوابی کامل برای مساله می‌باشد و برای اندازه‌گیری میزان برآورده شدن هدف از تابع برازندگی استفاده می‌شود. در ابتدا یک جمعیت تصادفی از کروموزوم‌ها تولید می‌شود و سپس برازندگی هر کروموزوم با استفاده از تابع برازندگی محاسبه می‌شود. در ادامه عملگرهای ژنتیک شامل انتخاب، تولید مثل و جهش در کروموزوم‌ها اعمال می‌شوند و این مراحل برای تعداد معینی تکرار می‌گردد. این الگوریتم برای کنترل، طبقه‌بندی و خوشه‌بندی استفاده می‌شود. از معایب آن می‌توان به زمان محاسبات زیاد اشاره نمود. همچنین تعریف یک تابع برای زندگی مناسب در آن نیز مساله مهمی به شمار می‌آید [۲۹ و ۳۰].

۴-۸- کلاسه‌بندی کننده بیزین ساده^{۱۷}

کلاسه‌بندی کننده بیزین ساده براساس قانون احتمال بیز، با فرض استقلال مقادیر ویژگی‌ها بر اساس ویژگی برچسب، طراحی شده است. لغت ساده در عنوان این کلاسه‌بندی کننده به همین موضوع اشاره می‌کند. با توجه به الگوریتم ساده این کلاسه‌بندی کننده، سرعت محاسبه آن بالا است. این سادگی باعث مدیریت ساده یک پایگاه داده با تعداد زیادی ویژگی می‌شود. این کلاسه‌بندی کننده برای پیش‌بینی بر چسب یک رکورد در مقایسه با سایر کلاسه‌بندی کننده‌ها به داده‌های آموزشی کمتری نیاز دارد [۳۰].

۴-۹- الگوریتم‌های بوستینگ^{۱۸}

بوستینگ یک فرا الگوریتم ترکیبی در حوزه یادگیری ماشین است که برای کاهش عدم توازن و همچنین واریانس به کار می‌رود. این روش در یادگیری با نظارت مورد استفاده قرار گرفته و از خانواده الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌شمار می‌رود. این تکنیک، روشی برای تبدیل سیستم‌های یادگیری ضعیف به قوی بر اساس ترکیب نتایج طبقه‌بندی‌های مختلف است. هرچند که بوستینگ در قالب الگوریتمیک قرار ندارد ولی بیشتر الگوریتم‌هایی که بر پایه بوستینگ طراحی شده‌اند، یادگیرنده‌ای ضعیف را به‌صورت تکرار شونده آموزش داده و به مجموعه قبلی اضافه می‌نماید تا در نهایت به یک طبقه‌بندی قوی دست یابد. یادگیرنده‌های ضعیف در حین اضافه شدن به مجموعه، وزن‌دهی می‌شوند که این وزن‌دهی به‌طور معمول بر اساس میزان دقت در طبقه‌بندی نمونه‌ها است. پس از اضافه شدن هر طبقه بند، نمونه‌های موجود (داده‌ها) نیز وزن‌دهی می‌گردند (وزن‌شان اصلاح می‌گردد). وزن‌دهی نمونه‌ها به‌صورتی است که در هر مرحله، وزن نمونه‌هایی که به‌صورت صحیح طبقه‌بندی می‌شوند کاهش یافته و وزن نمونه‌هایی که

به‌درستی طبقه‌بندی نشده‌اند، بیشتر می‌شود تا در مراحل بعدی (توسط یادگیرنده‌های جدید) بیشتر مورد توجه بوده و با دقت بیشتری طبقه‌بندی گردند؛ بنابراین تمرکز یادگیرنده‌های ضعیف جدید، بیشتر بر روی داده‌هایی خواهد بود که سیستم در مراحل قبلی قادر به طبقه‌بندی صحیح آنها نبوده است. این روش می‌تواند نتایج بسیار قوی از خود به جا بگذارد به گونه‌ای که در مسائلی چون جستجوی تصویر حتی از روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبانی نیز بهتر عمل کند [۳۰ و ۳۱].

۴-۱۰- الگوریتم آدابوست^{۱۹}

هدف این الگوریتم، ایجاد یک کلاسه‌بندی کننده قوی براساس ترکیب چند کلاسه‌بندی کننده ضعیف است. اساس کار این الگوریتم بر مبنای وزن‌دهی به رکوردها است. الگوریتم در هر واحد زمانی تکرار $T=1$ یک کلاسه‌بندی کننده ضعیف یا پایه را فراخونی و وزن‌های تخصیصی به رکوردها را تغییر می‌دهد. وزن رکوردهایی که اشتباه کلاسه‌بندی شده‌اند را افزایش و رکوردهایی که به درستی کلاسه‌بندی شده‌اند، کاهش می‌یابد. کلاسه‌بندی کننده جدید با ورود به سیستم، تمرکز خود را بر روی رکوردهایی که به درستی کلاسه‌بندی نشده و وزن بیشتری دارند، می‌گذارد [۳۲].

۴-۱۱- یادگیری عمیق^{۲۰}

از آن بیشتر یادگیرنده‌های عمیق در زمینه شبکه‌های عصبی مصنوعی در بین مردم از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار شدن در یادگیری، ویژگی‌های غیر خطی چندین لایه استخراج می‌شود و به یک دسته‌بندی کننده اعمال شده و آن هم این ویژگی‌ها را با هم ترکیب می‌کند تا بتواند یک پیش‌بینی انجام دهد. یکی از مواردی که ما را به استفاده از تعداد لایه‌های بیشتر در یادگیری عمیق ترغیب می‌کند استفاده از تعداد لایه‌های بیشتر به‌منظور استخراج ویژگی‌های بیشتر می‌باشد. روش کار در یادگیری عمیق در عمل از مغز انسان و نحوه کار قسمت پردازشگر بینایی مغز است که نورون‌های مربوط به سلسله مراتب اولیه که اطلاعات دریافت می‌کنند حساس می‌باشد و در ادامه خروجی‌ها در یک سلسله مراتب دیگر به ساختارهای پیچیده‌تری حساس می‌باشند. به‌طور کلی یادگیری عمیق در این نوع شبکه‌ها وابستگی زمانی را هم با خود دربر دارد، همان‌طور که در شبکه‌های عصبی، ورودی قبلی تأثیر می‌پذیرد و به‌طور تقریبی یک حافظه در یک شبکه عصبی ایجاد می‌شود. بنابراین یادگیری عمیق در یادگیری ویژگی‌های سلسله مراتبی غیر خطی عمیق خلاصه نمی‌شود بلکه می‌توان از آن در یادگیری وابستگی‌های زمانی غیر خطی طولانی در داده‌های ترتیبی هم استفاده کرد [۳۱ و ۳۲].

۵- کارهای مرتبط

در مقاله [۳۳] لاکشمی و همکاران در پژوهشی با استفاده از سه الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون لجستیک و درخت تصمیم به پیش‌بینی بقای بیماران دیالیزی پرداختند. آنها برای فرایند دسته‌بندی از ابزاری به نام Tanagra بهره برده و در آن سه الگوریتم مذکور را ده بار آزمایش نمودند. نتایج نشان داد که دقت الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی با مقدار ۹۳/۸۵٪ عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم رگرسیون لجستیک با دقت ۷۴/۴٪ و درخت تصمیم با دقت ۷۸/۴۴٪ دارد.

در مقاله [۳۴] ویچایا رانی و دایاناند به پیش‌بینی بیماران کلیوی

با به کارگیری از دو الگوریتم تأیو پیزا و ماشین بردار پشتیبان پرداختند. در این پژوهش آنها با جمع آوری اطلاعات پانصد بیمار و آنالیز شش ویژگی شامل: سن، جنسیت، اوره، کراتین و فیلتراسیون گلوبرولی اقدام به بررسی این بیماران نمودند. در نهایت به این نتیجه دست یافتند که زمان اجرای الگوریتم نایو نیز نسبت به الگوریتم ماشین بردار پشتیبان کمتر بوده اما دقت پیش بینی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بیشتر از الگوریتم نایو است.

در مقاله [۳۵] شارما و همکاران نیز با به کارگیری الگوریتم های طبقه بندی کننده مختلف از جمله الگوریتم نزدیک ترین همسایه و درخت تصمیم در نرم افزار متلب اقدام به تشخیص این بیماری نمودند. دقت هر یک از الگوریتم ها به ترتیب $88/8\%$ و $57/4\%$ محاسبه گردیدند. در نهایت آنها به این نتیجه دست یافتند که الگوریتم درخت تصمیم بیشترین دقت را در تشخیص بیماری نارسایی کلیوی دارا می باشد.

در [۳۶] رامیا و رادها، با استفاده از الگوریتم هایی تابع پایه شعاعی پس انتشار عصبی^{۲۱} و جنگل تصادفی به تشخیص بیمارانی که مشکوک به بیماری نارسایی کلیوی بودند، پرداختند. آنها به منظور به انجام رساندن پژوهش خود، از نرم افزاری به نام R استفاده نمودند. با اعمال الگوریتم های بیان شده بر روی داده های بیماران، آنان به این نتیجه رسیدند که الگوریتم تابع پایه شعاعی با دقت $85/3\%$ در مقایسه با الگوریتم های تابع پایه شعاعی^{۲۱} پس انتشار عصبی و جنگل تصادفی به ترتیب با دقت های $80/4\%$ و $78/6\%$ عملکرد بهتری جهت تشخیص بیماران مشکوک به بیماری نارسایی کلیوی دارد.

در مقاله [۳۷] تازین و همکاران با استفاده از الگوریتم های داده کاوی ماشین بردار پشتیبان درخت تصمیم، k - نزدیک ترین همسایه و به کارگیری از الگوریتم رتبه بندی جهت انتخاب ویژگی های مؤثر، اقدام به تشخیص نارسایی کلیوی نمودند. آنها در نهایت به این نتیجه رسیدند که الگوریتم درخت تصمیم به همراه الگوریتم رتبه بندی^{۲۲} بیشترین دقت را با مقدار 99 نسبت به بقیه الگوریتم ها کسب نموده است و بعد از آن الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به همراه الگوریتم رتبه بندی دقت $59/7\%$ را حاصل کرده است.

در مقاله [۳۸] نویسنده و همکارانش جهت بررسی و تشخیص بیماری مزمن کلیه از تصاویر سونوگرافی کلیه با استفاده از یک سیستم فازی عصبی هیبریدی و همچنین با استفاده از الگوریتم شبکه چند لایه پرسپترون استفاده کرده اند. در این مقاله با استفاده از 39 ویژگی که از تصاویر سونوگرافی کلیه استخراج شده است، بر روی آنها یک پیش پردازش جهت تشخیص سائز کلیه ها صورت گرفته است. خروجی این پژوهش به دسته بندی شامل: بیمار سالم، بیماری کلیوی، کیست کورتیکال منجر شده است. ترکیب شبکه های عصبی با سیستم فازی سبب می شود که یادگیری به سیستم اضافه شود و همچنین تصمیم گیری در دنیای عدم قطعیت را ممکن سازد. در واقع 3 ورودی جهت تشخیص خروجی این پژوهش، وارد سیستم فازی می شود و قانون های منطق فازی که شامل 41 قانون می باشد، روی ورودی ها اعمال می شود. سپس بر روی خروجی این سیستم شبکه عصبی اعمال می شود و در نهایت مقدار الگوریتم محاسبه می شود، صحت عملکرد این مقاله در پیاده سازی روش شبکه عصبی فازی بیش از $82/99$ درصد بود. همچنین الگوریتم شبکه عصبی پرسپترون برابر با 79 درصد می باشد.

در مقاله [۳۹] نویسنده و همکارانش به بررسی تشخیص بیماری های مزمن کلیوی با استفاده از موجک، تصاویر کلیه پرداخته اند. در این مقاله با استفاده از تصاویر عنیبه 172 نفر دارای بیماری نارسایی مزمن کلیوی و 198 فرد سالم اقدام به طبقه بندی بیماری مزمن کلیه شده است. در این پیاده سازی در ابتدا تصاویر عنیبه چشم را نرمال کرده و سپس با استفاده از الگوریتم فازی شبکه عصبی اقدام به آموزش و تست داده ها شده است. در این مقاله به درصد صحت 72 درصد در طبقه بندی اشاره شده است. در این تحقیق همچنین بررسی و تشخیص بیماری مزمن کلیوی با استفاده منطق فازی بر روی 90 نمونه داده می باشد. در این مقاله با در دست داشتن پارامترهایی از جمله فشار خون و ضربان قلب عملکرد کلیه ها و خروجی آن فرد سالم و فرد دارای بیماری مزمن کلیه اقدام به طبقه بندی بیماری شده است تعداد قانون های فازی استفاده شده در این پیاده سازی شامل 36 قانون فازی بوده، لازم به ذکر است که به درستی عملکرد در این مقاله اشاره ای نشده است. مقاله [۳۸] به طبقه بندی بیماری مزمن کلیوی با استفاده از اندازه گیری فشار خون افراد با استفاده از منطق فازی پرداخته است. در این روش با استفاده از فشار خون اندازه گیری شده 120 فرد که دارای بیماری مزمن کلیه بوده و 100 نفر فرد سالم طبقه بندی جهت تشخیص بیماری صورت گرفته است. تعداد قانون های فازی برابر با 10 قانون بوده و درستی عملکرد آن برابر با $73/19$ درصد می باشد.

در مقاله [۴۰] که توسط دانشجویان دانشگاه فرودسی مشهد مقاله ای در خصوص تشخیص بیماران مزمن کلیه که منجر به پیوند کلیه می شوند، ارائه شده است. در این مقاله از پارامترهایی مانند سابقه بیماری، فشار خون بالا و سن بیمار مستعد پیوند به عنوان ورودی منطق فازی استفاده شده و در خروجی آن مشخص شدن فرد مستعد پیوند مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین در این روش به تعداد قانون های فازی هم اشاره نشده است و صحت عملکرد این روش 40 درصد می باشد.

مقاله [۴۱] به بررسی بیماران مزمن کلیوی پرداخته است و اقدام به طبقه بندی افراد مستعد دیالیز از بین بیماران مزمن کلیه کرده است. این پیاده سازی با استفاده منطق فازی صورت گرفته و در این مقاله ورودی ها شامل قند خون، انسولین، چاقی، فشار خون و پروتئین، نسبت پروتئین ادرار به کراتینین می باشد. فرد مستعد پیوند کلیه خروجی سیستم پیاده سازی شده می باشد. داده های این پژوهش شامل 110 داده و تعداد قانون های فازی آن $83/19$ درصد و همچنین درصد درستی عملکرد این مقاله برابر $76/9$ درصد می باشد.

مقاله [۴۲] به بررسی فشار خون بالا و تاثیر آن برای داشتن بیماری کلیوی پرداخته است این پژوهش طبقه بندی را با استفاده از سیستم های فازی پیاده سازی کرده است. پارامترهای ورودی برای این سیستم عبارتند از سن، شاخص توده بدن، فشار خون، ضربان قلب، دیابت، فعالیت بدنی، ژنتیک و پارامتر خروجی خطر ابتلا شدن فرد به بیماری مزمن کلیه. تعداد داده های این مقاله که بر روی آن ها عملیات طبقه بندی صورت گرفته است برابر با 190 مجموعه داده می باشد که 50 نفر از این افراد سالم و 100 نفر از آنها بیمار مزمن کلیه بودند. تعداد قانون های فازی این پژوهش برابر با 45 قانون بوده و به درصد درستی عملکرد برابر با $65/2$ درصد اشاره شده است.

در مقاله [۴۳]، به بررسی فشار خون و تاثیر آن بر روی بیماری های

کلیه پرداخته است. این پیش‌بینی توسط سیستم‌های فازی صورت گرفته است. در این مقاله تشخیص خطر سلامتی کلیه‌ها با توجه به اطلاعات فشار خون افراد است که به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است و خروجی آن تشخیص فرد سالم و فرد مستعد بیمار کلیه می‌باشد. تعداد داده‌های ورودی این مقاله برابر با ۱۳۰ نمونه داده می‌باشد که ۹۰ نفر سالم بوده و ۴۵ نفر بیمار مزمن کلیه در نظر گرفته شده‌اند. تعداد قانون‌های فازی این پژوهش برابر با ۵۴ قانون بود و مدل سیستم فازی که در این پژوهش استفاده شده است مدل سوگنو می‌باشد مقاله دیگری، به بررسی و تشخیص بیماری‌های کلیدی با استفاده از سیستم فازی پرداخته است.

[۴۴] در این مقاله تشخیص خطرات سلامتی کلیه‌ها با توجه به اطلاعاتی نظیر: درد پهلوی، تب و لرز، تهوع، بوی بد چرک ادرار به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است و خروجی آن تشخیص فرد سالم و فرد مستعد بیمار کلیه می‌باشد. به تعداد داده‌های ورودی این مقاله اشاره‌ای نشده است. تعداد قانون‌های فازی این پژوهش برابر با ۱۰۹ قانون بود در مقاله دیگر، در سال ۲۰۱۳ به بررسی و طبقه‌بندی کلیه‌های پلیکیستیک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخته است. بسیاری از بیماری‌های ارثی و اختلالات غیر ارثی در توسعه بیماری کیستیک کلیوی تأثیرگذار هستند. یک اختلال توسعه‌یافته در داخل کلیه‌ها که گروهی از کیت پر از آب مانند مایع می‌شوند. در صورتی که بیماری‌های کلیوی پلیکیستیک درمان نشود آخرین راه تحت درمان با دیالیز یا پیوند می‌باشد در این مقاله ۲۰ ورودی به شبکه عصبی از قبیل: سن، جنسیت، تهوع، فشار خون، اوره، کاهش اشتها، درد شدید پهلوی، شکم درد، سر درد، گلبول‌های قرمز خون، عفونت، چرک در ادرار، اختلال حواس، دیابت، گلبول‌های سفید خون، آنمی، تشخیص دید نادرست، البومین، نفرون وارد می‌شود و خروجی آن دسته‌بندی بیمار به سالم و مزمن کلیوی است، در این پژوهش مدل شبکه عصبی، شبکه عصبی چندلایه پسرورنده است و درصد درستی این طبقه‌بندی برابر با ۹۰ می‌باشد. داده‌های این پژوهش برابر با ۵۰ داده که ۴۰ داده برای آموزش و ۳۰ داده برای تست انتخاب شده است [۴۵].

در مقاله [۴۶] پژوهشگران اقدام به تشخیص بیماری مزمن کلیوی با استفاده از شبکه‌های عصبی کرده‌اند. در این طبقه‌بندی از ۷ ورودی به شبکه عصبی که شامل التفویت‌ها، موتویت‌ها، ائوزینوفیل‌ها، نوتروفیل‌ها و کراتینین، قند خون و اسید اوریک است، استفاده شده است. تعداد داده‌های این پژوهش ۱۰۰۰ داده می‌باشد و همچنین الگوریتم‌های به کار رفته در این پژوهش شامل: شبکه عصبی پرسپترون، تابع پایه شعاعی و آموزش تدریج بردار است. درصد درستی الگوریتم به ترتیب شامل ۹۲ درصد و ۸۷ درصد می‌باشد.

در مقاله [۴۷] مقاله‌ای برای تشخیص بیماری سنگ کلیه با استفاده از سیستم فازی ارائه شده است. در این مقاله نویسندگان با استفاده از ۴ تابع عضویت تشخیص سنگ کلیه را مورد بررسی قرار داده‌اند همچنین داده‌های مقاله شامل ۲۶۰ داده و درصد درستی آن برابر با ۱۸ درصد می‌باشد.

در مقاله [۴۸] با عنوان پیش‌بینی بیماری مزمن کلیه با استفاده از یادگیری ماشین ارائه شد. در این مقاله از ۷ ورودی با عنوان‌های سن، فشارخون، قند خون، گلبول‌های قرمز و سفید خون استفاده شده است. در این مقاله بر روی ۴۰۰ داده الگوریتم‌های یادگیری

ماشین شامل شش الگوریتم به شرح طبقه‌بندی تصادفی جنگل و بهینه‌سازی کمینه متوالی بیزین تابع پایه شعاعی و شبکه عصبی چندلایه پیشرو اعمال شده و دقت آنها به ترتیب برابر با: ۸۷ درصد، ۸۵ درصد و ۸۵ درصد می‌باشد.

در مقاله [۴۹] با استفاده از منطق فازی اقدام به پیش‌بینی بیماری مزمن کلیه شده است. در این روش پیشنهادی که با استفاده از تصاویر کلیه می‌باشد که سه ویژگی از تصاویر کلیه استخراج شده و به‌عنوان ورودی فازی در نظر گرفته می‌شود و داده‌ها جهت بررسی در این مقاله ۴۰۰ داده می‌باشد.

در مقاله [۵۰] بیماران همودیالیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مبنای متوسط برای این بیماران تنها ۳ سال است و هزینه‌های ارائه مراقبت برای آنها بسیار بالا می‌باشد. پیدا کردن راه‌هایی برای بهبود نتایج بیمار و کاهش هزینه‌های دیالیز یک کار چالش‌انگیز در بیماری مزمن کلیه است مراقبت‌های دیالیز، عوامل پیچیده و متعدد دیگری ممکن است زنده ماندن بیماران را تحت تأثیر قرار دهند. در این تحقیق، سه تکنیک داده‌کاوی شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، درخت تصمیم‌گیری C4.5 و رگرسیون منطقی جهت اینکه بین متغیرهای دموگرافیک و بالینی، داروها، و مداخلات پزشکی طبقه‌بندی صورت بگیرد و به زنده ماندن بیمار کمک شود استفاده شده است. ورودی‌های این پژوهش شامل سن (سن)، جنس (مرد یا زن)، فشار خون بالا (اختلالات مربوط به هموگلوبین)، سیگار کشیدن (آری یا نه) و محل زندگی است. داده‌های این پژوهش شامل ۱۳۷ داده از بین بیماران زن و مرد می‌باشد، در این پژوهش از اعتبارسنجی ده بخشی برای هر سه الگوریتم استفاده شده است. میزان درستی این الگوریتم در شبکه عصبی برابر با ۹۰ درصد درخت تصمیم C5 برابر با ۸۰ درصد و در رگرسیون برابر با ۷۰ درصد می‌باشد.

در مقاله [۵۱] پیش‌بینی بیماری مزمن کلیوی با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی مانند نانوبیز و شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از ابزار انجام شده راییدمانیر^{۲۳} است. برخی از عوامل در نظر گرفته در این مقاله برای تشخیص بیماری یا نارسایی کلیه شامل سن، دیابت، فشارخون، شمارش گلبول قرمز و غیره می‌باشد که این کار می‌تواند با در نظر گرفتن پارامترهای دیگر مانند نوع غذا، محیط کار، شرایط، در دسترس بودن آب سالم، عوامل محیطی و غیره زندگی باشد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم نانوبیز دقت بیشتری برای پیش‌بینی این بیماری ارائه داده است.

کالدهار و همکارانش پژوهش خود را این‌طور توصیف کرده‌اند؛ که برای پیش‌بینی سنگ کلیه نیاز به درک روش‌های یادگیری ماشین می‌باشد و نتایج به‌دست آمده این‌طور بیان شده است که دقت پیش‌بینی آنها خوب بوده است و این کار از طریق C4.5 صورت گرفته است. درخت طیف مینی و درخت تصادفی برابر با ۹۳/۷ درصد که به دنبال آن ماشین بردار پشتیبان ۲/۵ برابر یا ۹۱/۹۸ درصد بوده است. همچنین منطقی و شبکه عصبی نتایج خوب با صفر مطلق خطا نسبی نشان داده شده است که نتایج طبقه‌بندی شده ۱۰۰ درصد درست بوده است ROC و منحنی درجه‌بندی از بیز ساده استفاده شده است، که منجر به دقت پیش‌بینی داده‌های ساخته شده است که در نتیجه روش یادگیری ماشین ارائه نتایج بهتر در درمان سنگ کلیه را به همراه داشته است [۵۲].

وان ایک و همکارانش در پژوهش خود با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی برای پیش‌بینی آسیب‌های حاد بعد از عمل جراحی قلب

از جمله فرایند گاوسی و ماشین بردار پشتیبان صورت گرفته است [۵۳].

لاکشمی و همکارانش در پژوهش خود از مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، درخت تصمیم و رگرسیون منطقی برای بقای دیالیز کلیوی استفاده کرده‌اند. همچنین ارزیابی آنها توسط تکنیک‌های داده‌کاوی برای اندازه‌گیری دقت مانند دقت طبقه‌بندی و حساسیت و ویژگی صورت گرفته است. آنها با استفاده از نتایج به‌دست آمده ۱۰ برابر اعتبارسنجی ضرب‌دری و ماتریس درهم ریخته برای هر یک از تکنیک‌ها را به‌دست آوردند. آنها دریافتند که شبکه عصبی مصنوعی نتایج بهتری را نشان می‌دهد. پس برای بیمارانی که مبتلا به دیالیز کلیه بودند شبکه عصبی مصنوعی بهتر بوده است و نتایج بهتری را به همراه خواهد داشت [۵۴].

مرتضی خاویز زاده و همکارانش در پژوهش خود با استفاده از تکنیک‌های نظارتی برای پیش‌بینی خطر در اوایل شکست AVF را در بیماران توصیف کردند. آنها از روش‌های طبقه‌بندی برای پیش‌بینی احتمال عارضه در بیماران همودیالیز که توسط تنفولویست به عمل جراحی AVF منجر شده است اشاره کرده‌اند [۵۵].

هایر و همکارانش در پژوهش خود از شبکه عصبی و درخت تصمیم و نیز ساده برای پیش‌بینی بیماری مزمن کلیه استفاده کرده است. بدین صورت که الگوریتم شبکه عصبی نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر داده‌کاوی داشته است که در نتیجه پتانسیل بالاتری و درصد موفقیت بیشتری را دارا بوده است [۵۶].

خودانگ سانگ و همکارانش در پژوهش خود به معرفی روش طبقه‌بندی درخت تصمیم داده‌کاوی که بر اساس متغیرهای جدید ناهنجار در درخت تصمیم تنظیم شده که بر اساس تعداد محدود وزن منطق‌های صورت گرفته است پرداخته‌اند [۵۷].

ود و همکاران از روش‌های داده‌کاوی ارائه شده برای ارزیابی پارامترهای بهبود بیماری دیالیزی استفاده کرده‌اند که نتیجه تجربی این‌طور بوده است: دقت طبقه‌بندی با استفاده از کاوش قواعد وابستگی بین ۵۰ تا ۹۷/۷ درصد براساس ترکیب پارامتر دیالیز بوده است. چنین رویکردی مبتنی بر تصمیم کمک می‌کند تا پزشکان برای تعیین میزان سطح دیالیز مورد نظر برای بیماری را تشخیص دهند [۵۸].

در مقاله [۵۹] نویسندگان پژوهش خود بر اساس یک تشخیص کارآمد از تصاویر کلیه که براساس قوانین انجمن می‌باشد را مورد بررسی قرار داده‌اند که این رویکرد شامل چهار قسمت: پیش پردازش، انتخاب و استخراج ویژگی‌های نسل قوانین انجمن و نسل پیشنهادات تشخیص از طبقه‌بندی می‌باشد.

دیوای و همکارانش در پژوهش خود که در رابطه با دیابت در کلیه با استفاده از الگوریتم C4.5 با ابزار Tanagra بوده است، میزان خطا را مورد بررسی قرار داده‌اند [۶۰].

در مقاله [۶۱] به ایجاد یک مدل طبقه‌بندی برای پیش‌بینی فاصله گذرا از مراحل ۳ تا ۵ بیماری کلیه می‌پردازد (تشخیص، بستری و درمان مناسب در مرحله ۵ دیالیز یا پیوند که پرهزینه است). پرونده پزشکی موجود بیمار همودیالیز از بیمارستان فان چیانگ رای تایلند، به‌عنوان مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. درخت تصمیم k - نزدیک‌ترین همسایه، نانو بیز و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای کشف دانش و ایجاد مدل طبقه‌بندی با مجموعه‌ای از ویژگی‌ها مورد استفاده قرار گرفت

که شامل دو روش جنگل تصادفی و درخت تصمیم J48 در این تحقیق است. ابزار مورد استفاده در این مقاله WEKA می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که روش جنگل تصادفی بالاترین دقت را به‌دست آورده است، همچنین این الگوریتم عملکرد J48 را بهبود بخشیده است.

در مقاله [۶۲] پیشگیری از بیماری‌های کلیوی در چهار نوع بیمار کلیوی (سندرم حاد کلیه، بیماری مزمن کلیوی، نارسایی حاد کلیه و گلوبولونفریت مزمن) متمرکز شده است و با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی انجام می‌شود که هدف مقایسه عملکرد این دو الگوریتم بر اساس دقت و زمان اجرای الگوریتم است. مجموعه داده‌ها از چندین آزمایشگاه پزشکی، مراکز و بیمارستان‌ها جمع‌آوری شده است. از این مجموعه داده‌ها برای تجزیه و تحلیل بیماری کلیوی استفاده شده است. این مجموعه داده که شامل پانصد و هشتاد و چهار نمونه و شش ویژگی است در این تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای استفاده می‌شود. صفات در این مجموعه داده KFT عبارتند از سن، جنس، اوره، کراتینین و سرعت فیلتر گلومرولی. این مجموعه داده شامل اطلاعات بیماری کلیوی می‌شود. این کار در محیط متلب انجام شده است که نتایج نشان می‌دهد الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی دارای بالاترین دقت طبقه‌بندی است و برای عامل زمان اجرا، الگوریتم بردار پشتیبان نیاز به کمترین زمان اجرا را دارد.

کریشنمورتی اس و همکاران [۶۳] مدل‌های هوش مصنوعی مختلفی را برای پیش‌بینی بیماری مزمن کلیوی توسعه دادند. در روش پیشنهادی نویسندگان از شبکه‌های عصبی کانولوشن برای پیش‌بینی نارسایی‌های مزمن کلیوی استفاده کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده این است که شبکه‌های عصبی کانولوشن با دقت ۹۵/۴٪ عملکرد بهتری را در مقایسه با سایر روش‌های پیشین به‌دست آوردند.

ماکینو و همکاران [۶۴] از داده‌های متنی برای استخراج اطلاعات تشخیصی و درمانی بیماران به‌منظور پیش‌بینی بیماری کلیوی دیابتی استفاده کردند.

واسکر مورالس و همکاران [۶۵] از داده‌های بیماران مزمن کلیوی برای تولید یک طبقه‌بندی شبکه عصبی استفاده کردند و مدل پیشنهادی دارای دقت ۹۵٪ می‌باشد.

نویسندگان [۶۶] یک مدل تشخیص سرطان کلیه در این مطالعه ارائه کردند. ویژگی‌های انتخاب‌شده با انتخاب متوالی رو به جلو و روش‌های انتخاب به عقب به شبکه‌های عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی سرطان کلیه منتقل می‌شوند. نتایج تجربی نشان‌دهنده این است که SBSP + NN دقت ۹۸/۷۵٪ را به‌دست آورده است. پانگ و همکاران [۶۷] یک سیستم تشخیص به‌طور کامل خودکار را به کمک رایانه برای طبقه‌بندی توده‌های بدخیم و خوش خیم با استفاده از تصویربرداری تشدید مغناطیسی کلیه پیشنهاد کردند. ویژگی‌های بافت با ادغام الگوریتم بردار پشتیبان با روش انتخاب ویژگی ReliefF انتخاب شدند. این سیستم به دقت ۹۲/۳ درصد دست یافت.

در تحقیق [۶۸] از داده‌های بیماران مزمن کلیوی UCI استفاده شد. نویسندگان در روش پیشنهادی از مدل‌سازی مستقل k - نزدیک‌ترین همسایه^{۲۴} و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی گویا این امر است که مدل ماشین بردار پشتیبان نیز را در مجموعه داده بهتر پردازش می‌کند و دارای دقت ۹۹٪ می‌باشد.

نویسندگان در [۶۹] مطالعه‌ای را بر روی مجموعه داده‌های نارسایی‌های مزمن کلیوی UCI منتشر کردند که از الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم، نانبیز^{۲۵} و k- نزدیک‌ترین همسایه برای تشخیص نارسایی‌های مزمن کلیوی استفاده کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در محیط متلب نشان دهنده این است که الگوریتم درخت تصمیم با دقت ۹۹/۷۵٪ نسبت سه روش دیگر دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

نویسندگان [۷۰] یک تکنیک طبقه‌بندی چند طبقه سلسله مراتبی برای تشخیص بیماری مزمن کلیوی در یک مجموعه داده نامتعادل ارائه کردند.

سیستم تشخیص بیماری مزمن کلیوی در [۷۱] برای تشخیص بیماری‌های مزمن کلیوی در مراحل اولیه پیشنهاد شد. برای تهیه داده‌ها، نویسندگان از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه استفاده کردند. همچنین در روش پیشنهادی بر روی داده‌های پردازش شده، از الگوریتم‌های طبقه‌بندی k- نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و نانبیز استفاده شده است. الگوریتم‌های طبقه‌بندی مذکور بیشترین دقت ۹۷/۸٪ را ایجاد کردند.

الماسعود و همکاران [۷۲] مطالعه‌ای را در مورد بیماری‌های مزمن کلیوی گزارش کردند که از رگرسیون لجستیک، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و تکنیک‌های تقویت گرادیان استفاده می‌کرد. چهار تکنیک طبقه‌بندی برای ویژگی‌های انتخاب شده اعمال شد. افزایش گرادیان بالاترین دقت ۹۹٪ را دارد.

ای ام سنان و همکاران [۷۳] مطالعه‌ای را در زمینه تشخیص بیمارهای مزمن کلیوی در مراحل اولیه پیشنهاد کردند. روش RFE برای انتخاب ویژگی‌ها از مجموعه داده‌های بیمارهای مزمن کلیوی استفاده شد.

جیکین و همکاران [۷۴] یک روش یادگیری ماشینی برای تشخیص زودهنگام بیماری مزمن کلیوی ارائه دادند. آنها از رگرسیون لجستیک، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، طبقه‌بندی کننده ساده بیز، الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه و شبکه عصبی پیشخور برای توسعه مدل‌های خود استفاده کردند. دقیق‌ترین مدل طبقه‌بندی جنگل تصادفی که دارای دقت ۹۹/۷ درصد بود.

زیسگال و همکاران [۷۵] یک تکنیک یادگیری ماشینی مبتنی بر درخت گروه برای تشخیص زودهنگام بیماری مزمن کلیوی ارائه دادند. مدل ارائه شده با جنگل تصادفی، کتوست، رگرسیون مقایسه شد. مدل پیشنهادی دارای دقت ۹۳٪، حساسیت ۷۱/۵٪ و مشخصه ۹۵/۸٪ می‌باشد که نسبت به روش‌های پیشین عملکرد بهتری را نشان داد.

پولات، اچ و همکاران. [۷۶] مطالعه‌ای در مورد نقش روش‌های انتخاب ویژگی موثر در پیش‌بینی دقیق بیمارهای مزمن کلیوی ارائه کردند. در این مقاله، از رویکردهای انتخاب ویژگی بسته‌بندی و فیلتر برای انتخاب ابعاد مجموعه داده بیماری مزمن کلیه استفاده شد. سپس ویژگی‌های انتخاب شده به الگوریتم بردار پشتیبان منتقل می‌شود تا بیماری مزمن کلیه را برای اهداف تشخیص طبقه‌بندی کند. نتایج تجربی نشان داد که ماشین بردار پشتیبان نتایج بهتری را روی ویژگی‌های انتخاب شده با روش جستجوی بهینه با ارزیاب زیر مجموعه فیلتر شده ایجاد می‌کند. الگوریتم بردار پشتیبان در مقایسه با ویژگی‌های انتخاب شده توسط سایر روش‌های بسته‌بندی و فیلتر، به میزان دقت ۹۸/۵٪ دست یافت. در مقاله [۷۷] نویسندگان الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین را به یک مشکل در زمینه تشخیص پزشکی تقسیم‌بندی کرده و

کارایی آنها را در پیش‌بینی نتایج مورد بررسی قرار دادند. مشکل انتخاب شده برای این مطالعه، تشخیص بیماری مزمن کلیوی است. مجموعه داده مورد استفاده برای مطالعه از مخزن UCI شامل ۴۱۱ نمونه و ۲۵ ویژگی است. ابزار مورد استفاده در این تحقیق متلب می‌باشد. در این تحقیق روش طبقه‌بندی با استفاده از داده‌های آن به بیماری‌های مزمن کلیوی ارزیابی شده است. معیارهای مختلفی که برای ارزیابی عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرند دقت پیش‌بینی، حساسیت و خاصیت هستند. نتایج نشان می‌دهد که درخت تصمیم‌گیری با نزدیک به دقت ۹۸/۶٪، حساسیت ۹۷/۲٪ و کیفیت ۱ بهترین عملکرد را دارد.

در مقاله [۷۸] کاربرد داده‌کاوی را برای بهبود دقت پیش‌بینی وضعیت بیماری را با انتخاب مناسب‌ترین ویژگی‌های مرتبط با آن ارائه می‌دهد. این آزمایش‌ها بر روی داده‌های بیماری نارسایی کلیه انجام می‌شود. هدف اصلی این مقاله انتخاب ویژگی مناسب برای پیش‌بینی بیماری نارسایی کلیه است. چندین روش داده‌کاوی مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه داده‌های استفاده شده از مخزن UCI با ۴۱۱ نمونه و ۲۵ ویژگی است. نتیجه نشان می‌دهد که الگوریتم جنگل تصادفی بالاترین دقت را در مقایسه با بقیه الگوریتم‌ها داشته است. همچنین استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک در انتخاب مجموعه‌ای بهینه از ویژگی موفق تر بوده است.

در مقاله [۷۹] شش الگوریتم از روش‌های مختلف طبقه‌بندی برای تحلیل و مقایسه برای پیش‌بینی نارسایی مزمن کلیه انتخاب شده است. مجموعه داده‌های استفاده شده از مخزن UCI با ۴۱۱ نمونه و ۲۵ ویژگی است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی زیربنایی تصادفی دقت بیشتری در پیش‌بینی نارسایی کلیه داشته است. همچنین این طبقه‌بندی با الگوریتم k- نزدیک‌ترین همسایه به‌عنوان طبقه‌بندی پایه از روش‌های طبقه‌بندی دیگر در مجموعه داده‌های خاص کلیه بیشتر است. در مقاله [۸۰] به بررسی نحوه تشخیص بیماری نارسایی کلیه با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین می‌پردازد. تعدادی از طبقه‌بندی‌های مختلف یادگیری ماشین به‌طور تجربی به یک مجموعه داده واقعی که از ماشین UCI گرفته شده با یافته‌های گرفته شده از ادبیات اخیر مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم جنگل تصادفی عملکرد مطلوبی را در شناسایی افراد مبتلا به بیماری نارسایی کلیه به‌دست آورده است.

در مقاله [۸۱] هدف پیش‌بینی تشخیص زودهنگام بیماری نارسایی کلیه در افراد مبتلا به دیابت با روش یادگیری ماشین است. مجموعه داده‌ها توسط یک مرکز تحقیقاتی با ۱۱۱ پرونده جمع‌آوری شده است. مجموعه داده‌ها به وسیله الگوریتم نانبیز و الگوریتم درخت تصمیم در محیط WEKA آزمایش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم درخت تصمیم‌گیری دقت بهتری را ارائه داده است.

۶- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

محیط مراکز بهداشتی و درمانی نیاز به تعداد زیاد داده در رابطه با بیماران کلیوی دارند اما کمبود ابزار تحلیل موثر برای کشف رابطه‌های مخفی بین داده‌های بیماران کلیوی وجود دارد. داده‌کاوی می‌تواند به‌عنوان ابزار موثری در پیدا کردن رابطه مخفی بین داده بیماران باشد. بدون شک یکی از مهمترین مشکلات در تشخیص بیماری‌های پنهان همچون بیماری مزمن کلیوی این است که این بیماری در بسیاری

جدول ۱: مقایسه‌های تکنیک‌های داده‌کاوی در تشخیص بیماری نارسایی مزمن کلیوی از نظر معیار دقت

مرجع	سال انتشار	نوع بیماری	ابزار	تکنیک مورد استفاده	دقت
[52]	۲۰۱۲	سنگ کلیه	WEKA	NaviBayes	۹۹ درصد
				Logistic	۱۰۰ درصد
				Random Forest	۹۷ درصد
[33]	۲۰۱۴	دیالیز کلیه	ORANGE	NaviBayes	۹۸ درصد
				K-NN	۷۹ درصد
				Classification Tree	۷۳,۳۳ درصد
				C 4.5	۹۳,۵۲ درصد
				SVM	۹۳,۵۲ درصد
				Random Forest	۹۱,۹۸ درصد
[53]	۲۰۱۲	نارسایی مزمن کلیوی	TANAGRA	ANN	۹۳,۵۲ درصد
				Decision Tree (C5)	۷۸,۴۴ درصد
				Logical Regression	۷۴,۴۷ درصد
[55]	۲۰۱۲	نارسایی مزمن کلیوی	WEKA	Gaussian process (ROC)	۷۵,۸ درصد
[56]	۲۰۱۲	نارسایی کلیوی همودیالیز	WEKA	W-Simple cart	۸۵,۱۱ درصد
[60]	۲۰۱۴	سنگ کلیه	TANAGRA	Decision Tree	-
[61]	۲۰۱۶	نفرتیک سندرم	-	Decision Tree	۸۰ درصد
				Association Rule	۹۷,۷ درصد
[62]	۲۰۱۵	سنگ کلیه	TANAGRA	C 4.5	۱۱ درصد نرخ خطا
[59]	۲۰۱۲	دیالیز کلیوی	MATLAB	Association Rule	۹۱,۹۸ درصد
				NaviBayes	
				LVQ	۸۴,۵۹ درصد
				RBF	۸۷,۳۲ درصد
[63]	۲۰۲۱	نارسایی مزمن کلیوی	Phayton	Convolutional Neural Networks	۹۵,۴ درصد
[64]	۲۰۱۹	بیماری کلیه دیابتی	Phayton	Convolutional Model	۷۱ درصد
[65]	۲۰۱۹	نارسایی مزمن کلیوی	Phayton	Neural Network Classifier	۹۵ درصد
[66]	۲۰۱۳	سرطان کلیه	MATLAB	SBSP + NN	۹۸,۵۷ درصد
[67]	۲۰۱۵	سرطان کلیه	MATLAB	SVM + ReliefF	۹۲,۳ درصد
[68]	۲۰۱۶	نارسایی مزمن کلیوی	MATLAB	KNN, SVM	۹۹ درصد
[69]	۲۰۱۶	نارسایی مزمن کلیوی	MATLAB	SVM, KNN, and Naïve Bayes Decision tree	۹۹,۷ درصد
[71]	۲۰۱۸	نارسایی مزمن کلیوی	MATLAB	KNN, SVM, and Naïve Bayes	۹۷,۸ درصد
[72]	۲۰۱۹	نارسایی مزمن کلیوی	MATLAB	SVM, Random Forest, and Gradient Boosting	۹۹ درصد
[74]	۲۰۱۹	نارسایی مزمن کلیوی	MATLAB	Logistic regression, KNN, SVM, Random Forest Naive Bayes and ANN	۹۹,۷ درصد
[75]	۲۰۲۰	نارسایی مزمن کلیوی	MATLAB	XGBoost	۹۵,۸ درصد
[76]	۲۰۱۷	نارسایی مزمن کلیوی	MATLAB	SVM	

- 2018.
- [4] aniel Ashlock, *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization*, vol. 91. 2017.
- [5] Islam et al., "Prediction of Fatty Liver Disease using Machine Learning Algorithms," *Comput. Methods Programs Biomed.*, 2018.
- [6] Dhaenens and L. Jourdan, "Metaheuristics for data mining: Survey and opportunities for big data," *4or*, vol. 17, no. 2, pp. 115–139, 2019.
- [7] Kasper DL, B.E., Fauci AS, Hauser SL, Longo DL, Jameson JL, *Harrison's Principles of Internal Medicine*, ed. 17. Vol. 1. 2008: McGraw-Hill: p. 82.
- [8] HD, H., *Kelley's Textbook of Internal Medicine*. 4 ed. 2000: Philadelphia: Williams & Wilkins: p. 23.
- [9] Wikipedia. kidney. 2018 [cited 2018 4 Feb]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kidney>.
- [10] Arnadóttir M, Hultberg B, Wahlberg J, Fellström B, Dimény E. Serum total homocysteine concentration before and after renal transplantation. *Kidney international*. 1998 Oct 1;54(4):1380-4.
- [12] Bostom AG, Shemin D, Lapane KL, Hume AL, Yoburn D, Nadeau MR, Bendich A, Selhub J, Rosenberg IH. High dose B-vitamin treatment of hyperhomocysteinemia in dialysis patients. *Kidney international*. 1996 Jan 1;49(1):147-52.
- [13] Cordaro M, Siracusa R, Fusco R, Cuzzocrea S, Di Paola R, Impellizzeri D. Involvements of hyperhomocysteinemia in neurological disorders. *Metabolites*. 2021 Jan 6;11(1):37.
- [14] arkinson's disease: Feasibility study of an at-home testing device". *I Movement Disorders*, Vol. 24 (4), pp. 551-556.
- [15] Ene, M. (2008). "Neural Network-Based Approach to Discriminate Healthy People from Those with Parkinson's Disease". *Mathematics and Computer Science Series*, 35, 112-116.
- [16] Little, M. A., McSharry, P. E., Hunter, E. J., Spielman, J. and Ramig, L. O. (2008). "Suitability of Dysphonia Measurements for Telemonitoring of Parkinson's Disease". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 56, 1015-1022.
- [17] Caglar, M. F., Cetisli, B. and Toprak, I. B. (2010). "Automatic Recognition of Parkinson's Disease from Sustained Phonation Tests Using ANN and Adaptive Neuro-Fuzzy Classifier". *Journal of Engineering Science Design*, 1, 59-64.
- [18] Gil, D. and Johnson, M. (2009). "Diagnosing Parkinson by Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines". *Global Journal of Compute Science and Technology*, 9, 63-71.
- [19] Kincade K. "Data mining: Digging for healthcare gold. *Insurance & echnology*", 1998.
- [20] [51]- Fayyad U, Piatetsky-Shapiro G & Smyth P., "Knowledge discovery and data ining towards a unifying framework. Available" , 1996.
- [21] Koh HC & Tan G, "Data mining applications in healthcare. *Journal of Healthcare InformationManagement*", 2۰۰۵.
- [22] Han J, Kamber M & Pei J, "Data mining: Concepts and techniques. USA: Morgan Kaufmann PublishersInc; 2۰۰۵
- [23] Lee IN, Liao SC & Embrechts M, "Data mining techniques applied to medical information", *MedicalInformatics and the Internet in Medicine*, 2۰۰۰.
- [24] Obenshain MK, "Application of data mining techniques to healthcare data", *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2۰۰4.
- [25] Samad Soltani Heris T, Lagarizadeh M, Mahmoodvand Z & Zolnoori M, "Intelligent diagnosis of asthma using machine learning algorithms. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*", 2013
- [26] Liao SC & Lee IN, "Appropriate medical data categorization for data mining classification techniques", *Medical Informatics and the Internet in Medicine*, 2002.
- [27] Stephenson N, Shane E, Chase J, Rowland J, Ries D, Justice N, Zhang J, Chan L, Cao R. Survey of machine learning techniques in drug discovery. *Current drug metabolism*. 2019 Mar 1;20(3):185-93.
- [28] Qayyum A, Qadir J, Bilal M, Al-Fuqaha A. Secure and robust machine learning for healthcare: A survey. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2020 Jul 31;14:156-80.

از موارد بدون علائم خاصی در بدن فرد وجود دارد و فرد زمانی از بیماری خود آگاه می‌شود که این بیماری پیشرفت بسیار زیادی کرده باشد. در این مقاله انواع الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌کاوی و تأثیر آنها برای پیش‌بینی بیماری نارسایی کلیه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین چندین روش انتخاب ویژگی برای تشخیص این بیماری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم جنگل تصادفی، الگوریتم k- نزدیک‌ترین همسایه و الگوریتم بردار پشتیبان بیشترین کاربرد را در پیش‌بینی بیماری نارسایی کلیه را داشته‌اند. پراکاربردترین داده‌های مورد استفاده در زمینه تحقیقاتی مجموعه داده‌های UCI [۸۲] می‌باشد که به دلیل دسترسی آسان‌تر و داشتن نویز کمتر، بیشترین استفاده را در پیش‌بینی این بیماری داشته است. ابزار مورد استفاده در این مقاله متلب [۸۳] می‌باشد که به دلیل سادگی و قابل فهم بودن بیشترین کاربرد را داشته است. با توجه به مطالعات انجام شده و رشد سریع روش‌های دسته‌بندی در کارهای آتی می‌توان با استفاده از روش‌های ترکیبی دقت پیش‌بینی را نسبت به روش‌های موجود افزایش داد.

۷- پی‌نوشت‌ها

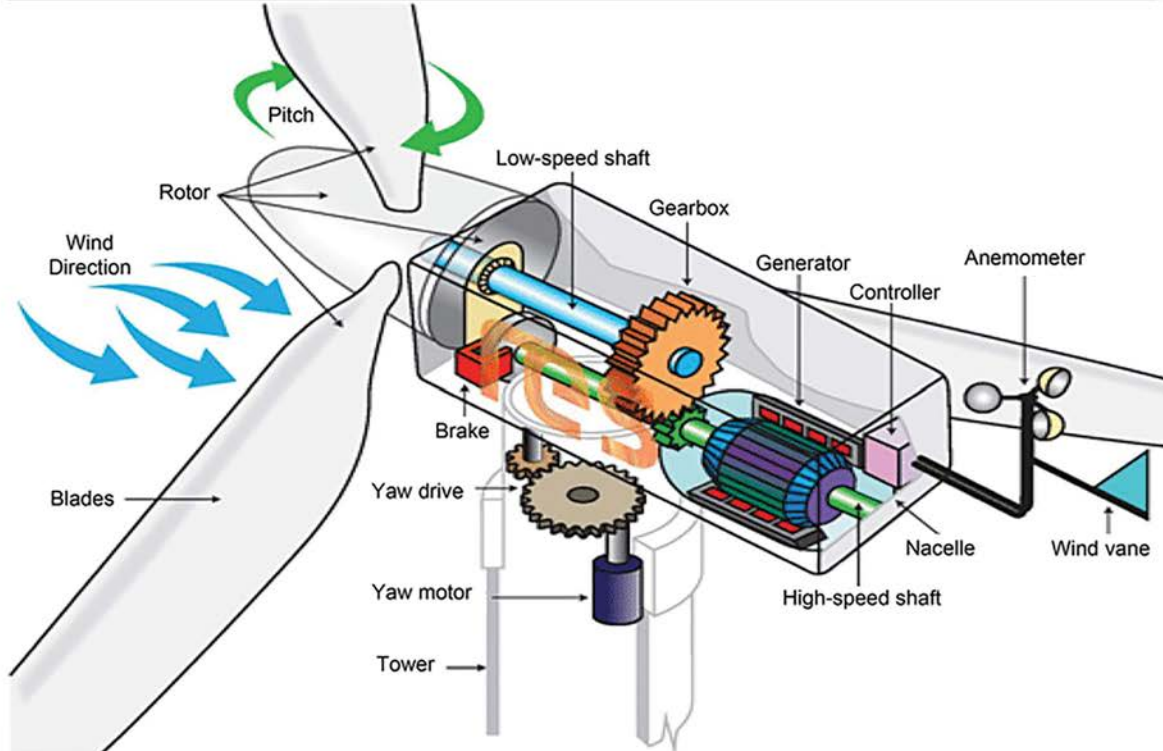
1. nephrons
2. Data Mining Task
3. Train
4. Test
5. Desiccation Tree
6. Gini
7. Entropy
8. Multi Layer Perceptron
9. Support Vector Machine
10. Multi Layer Perceptrons
11. Radial basis Function
12. Support Vector Regression
13. Random Forest Algorithm
14. Regression Algorithm
15. Fuzzy Logic Algorithm
16. Genetic Algorithm
17. Simple Bayesian Classifier
18. BOOSTING
19. ADABOOST
20. Deep Learning
21. Radial basis Function Backpropagation Neural
22. Ranking
23. Rapid Miner
- 24.- k nearest neighbor
25. Naïve Bayes

۸- مراجع

- [1] Q. Al-Tashi, H. Rais, and S. J. Abdulkadir, "Hybrid Swarm Intelligence Algorithms with Ensemble Machine learning for Medical Diagnosis," 2018 4th Int. Conf. Comput. Inf. Sci. Revolutionising Digit. Landsc. Sustain. Smart Soc. ICCOINS 2018 - Proc., pp. 1–6, 2018.
- [2] Singh and B. Pandey, "Intelligent techniques and applications in liver disorders: a survey," *Int. J. Biomed. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 1, p. 27, 2014.
- [3] L. Anand and S. P. S. Ibrahim, "HANN : A Hybrid Model for Liver Syndrome Classification by Feature Assortment Optimization,"

- Using Association Rules. Computer Technology and Electronics Engineering Pp: 50-60.
- [50] Sunil D, Sowmya BP. Chronic kidney disease analysis using data mining. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering, and Information Technology (IJSRCSEIT). 2017;2(4).
- [51] (DSVGK Kaladhar, Krishna Apparao Rayavarapu* and Varahalarao Vadlapudi, "Statistical and Data Mining Aspects on Kidney Stones: A Systematic Review and Meta-analysis", Open Access Scientific Reports, Volume Issue 12. 2012.
- [52] J. Van Eyck, J. Ramon, F. Guiza, G. Meyfroidt, M. Bruynooghe, G. Van den Bergh, K. U. Leuven, "Data Mining techniques for predicting acute kidney injury after elective cardiac surgery", Springer, 2012.
- [53] K. R. Lakshmi, Y. Nagesh and M. Veera Krishna, "Performance comparison of three data mining techniques for Predicting kidney disease survivability", International Journal of Advances in Engineering & Technology, Mar. 2014.
- [54] Morteza Khavanin Zadeh, Mohammad Rezapour, and Mohammad Mehdi Sepehri, "Data Mining Performance in Identifying the Risk Factors of Early Arteriovenous Fistula Failure in Hemodialysis Patients", International journal of hospital research, Volume 2, Issue 1, 3201, pp 54-49.
- [56] Abeer Y. Al-Hyari, "CHRONIC KIDNEY DISEASE PREDICTION SYSTEM USING CLASSIFYING DATA MINING TECHNIQUES", library of university of Jordan, 2012.
- [57] Xudong Song, Zhanzhi Qiu, Jianwei Mu, "Study on Data Mining Technology and its Application for Renal Failure Hemodialysis Medical Field", International Journal of Advances in Computing Technology (IJACT), Volume 4, Number 3, February 2012.
- [58] N. SRIRAAM, V. NATASHA and H. KAUR, "DATA MINING APPROACHES FOR KIDNEY DIALYSIS TREATMENT", Journal of Mechanics in Medicine and Biology, Volume 06, Issue 02, June 2006.
- [59] Jicksy Susan Jose, R. Sivakami, N. Uma Maheswari, R. Venkatesh, "An Efficient Diagnosis of Kidney Images using Association Rules", International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE), Volume 2, Issue 2, April 2012.
- [60] Divya Jain, Sumanlata Gautam, "Predicting the Effect of Diabetes on Kidney using Classification in Tanagra", International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Volume 3, Issue 4, April 2014.
- [61] Panwong P, Iam-On N. Predicting transitional interval of kidney disease stages 3 to 5 using data mining method. In 2016 second Asian conference on defence technology (ACDT) 2016 Jan 21 (pp. 145-150). IEEE.
- [62] Vijayarani S, Dhayanand S, Phil M. Kidney disease prediction using SVM and ANN algorithms. International Journal of Computing and Business Research (IJCBR). 2015 Mar;6(2):1-2.
- [63] Krishnamurthy S, Ks K, Dovgan E, Luštrek M, Gradišek Piletič B, Srinivasan K, Li YC, Gradišek A, Syed-Abdul S. Machine learning prediction models for chronic kidney disease using national health insurance claim data in Taiwan. In Healthcare 2021 May 7 (Vol. 9, No. 5, p. 546). MDPI.
- [64] Makino M, Yoshimoto R, Ono M, Itoko T, Katsuki T, Koseki A, Kudo M, Haida K, Kuroda J, Yanagiya R, Saitoh E. Artificial intelligence predicts the progression of diabetic kidney disease using big data machine learning. Scientific reports. 2019 Aug 14;9(1):11862.
- [65] Vásquez-Morales GR, Martínez-Monterrubio SM, Moreno-Ger P, Recio-García JA. Explainable prediction of chronic renal disease in the Colombian population using neural networks and case-based reasoning. Ieee Access. 2019 Oct 21;7:152900-10.
- [66] Polat H, Danaei Mehr H, Cetin A. Diagnosis of chronic kidney disease based on support vector machine by feature selection methods. Journal of medical systems. 2017 Apr;41:1-1.
- [29] Burkart N, Huber MF. A survey on the explainability of supervised machine learning. Journal of Artificial Intelligence Research. 2021 Jan 19;70:245-317.
- [30] Garg A, Mago V. Role of machine learning in medical research: A survey. Computer Science Review. 2021 May 1;40:100370.
- [31] Zhang L, Wen J, Li Y, Chen J, Ye Y, Fu Y, Livingood W. A review of machine learning in building load prediction. Applied Energy. 2021 Mar 1;285:116452.
- [32] Zhou J, Gandomi AH, Chen F, Holzinger A. Evaluating the quality of machine learning explanations: A survey on methods and metrics. Electronics. 2021 Jan;10(5):593.
- [33] Vijayarani, S., and S. Dhayanand. "Data mining classification algorithms for kidney disease prediction." Int J Cybernetics Inform 4, no. 4 (2015): 13-25.
- [34] Sharma, Sahil, Vinod Sharma, and Atul Sharma. "Performance based evaluation of various machine learning classification techniques for chronic kidney disease diagnosis." arXiv preprint arXiv:1606.09581 (2016).
- [35] Ramya, Shankaran and Radha, Nemath. (2016). "Diagnosis of Chronic Kidney Disease Using Machine Learning Algorithms", International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, Vol 4, issue 1.
- [36] Tazin, Nusrat, Shahed Anzar Sabab, and Muhammed Tawfiq Chowdhury. "Diagnosis of Chronic Kidney Disease using effective classification and feature selection technique." In 2016 International Conference on Medical Engineering, Health Informatics and Technology (MediTec), pp. 1-6. IEEE, 2016.
- [37] Bommana K, Raja, Madheswaran M. Thyagarajah K 2008. A Hybrid Fuzzy-Neural System for Computer Aided Diagnosis of Ultrasound Kidney Images Using Prominent Feature Pp: 65-83.
- [38] Sherif E. Husseina, Osama A, Hassan T, Malcolm H, Granatc. 2013. Assessment of the potential indology for diagnosing kidney disease using wavelet analysis and sentral networks Auckland University of Technology. Pp: 534-541.
- [39] Mayilva ganani M. Rajeswari K, 2014, Health Care Analysis Based On Fuzzy Logic Control Pp: 138-149.
- [40] Venkatesan Suresh V. 2014. Human blood pressure classification analysis using fuzzy logic control system in data mining, Sensors Applications Symposium Proceedings. Pp 200-204
- [41] Lagzian M, Shirazian M, Vahidian Kamyad A. Layeghian M, Hekmat R. 2013. A New Fuzzy Control Model for Kidney Patients. pp: 1097-1101.
- [42] Nagaveni R, Devi R. 2010. "Design Methodology of a Fuzzy Knowledgebase System to predict the risk of Diabetic Nephropathy. International Journal of Computer Science pp 239-247.
- [43] Kaur R Kaur A. 2014. Hypertension Diagnosis Using Fuzzy Expert System National Conference on Advances in Engineering and Technology. PP: 14-18.
- [44] Mayilvaganan M, Rajeswari K. 2014. Risk Factor Analysis to Patient Based on Fuzzy Logic Control System. Engineering Research and General Science PP: 185-190.
- [45] Jahantigh F. 2015. Kidney Diseases Diagnosis by Using Fuzzy Logic. International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. PP. 2369-2375.
- [45] Anjan Babu G, Suman G, Rajasekhar M. 2013. Computer Aided Diagnosis of Polycystic Kidney Disease Using ANN. Medical, Health Biomedical, Bioengineering and Pharmaceutical Engineering Pp: 933-937.
- [46] Abhishek Kumar K. 2013. Artificial Neural Networks for Diagnosis of Kidney Stones Disease. Information Technology and Computer Science Pp: 20-25.
- [47] Malik R. Jadhav B. 2015. Fuzzy System for Treatment of Kidney Stone. Emerging Technologies and Innovative Research Pp. 1591-1595.
- [48] Carretero OA, Opanl S. Jamary 2000. Essential hypertension Part I definition and etiology". Circulation. pp: 329-35.
- [49] Bala S, Kumar K. 2014. An Efficient Diagnosis of Kidney Images

« ادامه در صفحه ۶۱



مقاله علمی-ترویجی

پیاده‌سازی روش کنترل مستقیم توان فازی در سیستم کنترل توربین بادی DFIG تحت سخت‌افزار FPGA

■ امین رحمانی^{*}، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، Aminrahmani8294@yahoo.com

■ محمد حسین حسینی، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، smhh110@yahoo.com

^{*}نویسنده مسئول

چکیده

یکی از روش‌های پرکاربرد جهت بهره‌برداری از انرژی باد استفاده از توربین‌های بادی می‌باشد، این توربین‌ها برای تولید برق از ماشین‌های الکتریکی مختلفی استفاده می‌کنند که در میان این ماشین‌ها، ژنراتور القایی دو سو تغذیه به دلیل مزایایی که دارد سهم بیشتری را به خود اختصاص داده است. در این مقاله یک روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی برای توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور DFIG ارائه شده است. در این روش ولتاژهای مورد نیاز مبدل سمت روتور به‌طور مستقیم براساس کنترل کننده فازی، ولتاژ استاتور، سرعت روتور و برخی پارامترهای ماشین محاسبه می‌شود. از طرفی مدولاتور PWM جایگزین مقایسه کننده‌های هیستریزس شده است. در این روش ارائه شده فرکانس سوئیچینگ ثابت است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای روش ارائه شده در شرایط ثابت و گذار انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: انرژی باد، توربین بادی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، کنترل مستقیم گشتاور، کنترل مستقیم توان.

Implementation of Direct Phase Power Control Method in DFIG Wind Turbine Control System Under FPGA Hardware

■ Amin Rahmani^{*}, Islamic Azad University South Tehran branch Faculty of Engineering, Aminrahmani8294@yahoo.com

■ Mohammad hossein Hosseini, Islamic Azad University South Tehran branch Faculty of Engineering, smhh110@yahoo.com

^{*}Corresponding Author

Abstract

One of the most used methods for exploiting wind energy is the use of wind turbines, these turbines are used to generate electricity. They use different electric machines, and among these machines, the two-way induction generator has a greater share due to its advantages. In this article, a direct power control method based on fuzzy controller for wind turbines equipped with DFIG generators is presented. In this method, the required voltages of the converter on the rotor side are calculated directly based on the phase controller, stator voltage, rotor speed and some machine parameters.

On the other hand, PWM modulator has replaced hysteresis comparators. In this presented method, the switching frequency is fixed. The simulations for the presented method have been done in steady and transient conditions

Keywords: Wind energy, wind turbine, Bi-fed induction generator, direct torque control, Direct power control

۱- مقدمه

ساختار، پویایی سریع، مقاومت در برابر پارامترها و نوسانات ولتاژ شبکه اشاره کرد [۱۸، ۱۹، ۲۰]. حالت‌های کلیدزنی مبدل در روش کنترل DPC، براساس خطای بین توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع و مقادیر اندازه‌گیری شده و موقعیت زاویه ولتاژ انتخاب می‌شوند. در سال‌های اخیر روش کنترل DPC برای کنترل موتورهای AC و ژنراتورهای DFIG پیشنهاد شده است. اگرچه این روش در عین حال ساده و در برابر تغییرات پارامترها مقاوم است [۲۱]، اما فرکانس کلیدزنی مبدل‌ها به دلیل تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو و پهنای باند هیستریزس متفاوت است [۲۲، ۲۳]. برای حل این موضوع راه‌های مختلفی پیشنهاد شده است. با توجه به مطالب گفته شده روش‌های کنترلی براساس جهت‌گیری شار استاتور بوده و الگوریتم‌های پیچیده‌ای دارند که آنها را برای اجرای عملی ناکارآمد می‌کند [۲۴]. طبق [۲۵] برای کم کردن رپل توان روش Fuzzy و DSVM با هم ترکیب شده‌اند، که این عمل براساس جهت‌گیری شار استاتور بوده و دارای قواعد زیادی است. همچنین در این روش از یک فرکانس سوئیچینگ بالا برای کاهش موثر رپل توان استفاده شده است.

در این مقاله ابتدا یک مدل مجزا برای ژنراتور DFIG در دستگاه مرجع با سرعت سنکرون ارائه شده است. بعد از آن روش‌های کنترل مستقیم توان مبتنی بر فازی و تمام فازی برای ژنراتور DFIG پیشنهاد شده است. خطاهای توان‌های اکتیو و راکتیو و انتگرال آنها به عنوان ورودی کنترل کننده فازی استفاده می‌شود. در روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر فازی خروجی کنترل کننده فازی با مقدار E_{rdq} جمع شده تا ولتاژهای روتور تولید شود، در حالی که در روش کنترل مستقیم توان تمام فازی ولتاژهای روتور به طور مستقیم توسط کنترل کننده فازی تولید می‌شوند. در هر دو روش ارائه شده مقادیر مرجع به دست آمده برای ولتاژهای روتور به مدولاتور PWM داده می‌شود [۲۶، ۲۷]. به طور کلی استفاده از کنترل کننده فازی دارای مزایای زیر می‌باشد:

- عدم نیاز به سیستم تحت کنترل
- عدم نیاز به سنسورهای دقیق برای اندازه گیری
- پیاده‌سازی آسان

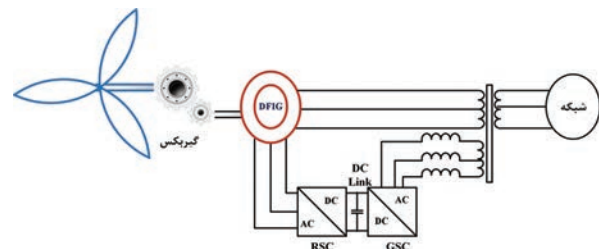
روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر فازی به طور مستقیم توان‌های اکتیو و راکتیو براساس کنترل کننده فازی همراه با توان‌های اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده، ولتاژ استاتور و سرعت روتور را کنترل می‌کند. در حالی روش کنترل مستقیم توان تمام فازی فقط نیاز به مقادیر اندازه‌گیری شده و مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو دارد. در روش‌های ارائه شده کنترل کننده‌های PI مقایسه کننده‌های هیستریزس و جدول کلیدزنی حذف شده است.

روش‌های کنترلی پیشنهادی فقط برای مدل‌سازی‌های عملی به صورت تئوری مناسب بوده و برای مدل‌سازی‌های واقعی مناسب نبوده و دارای مشکلاتی از جمله تاخیر در محاسبات و تاخیر در ارسال خروجی اطلاعات می‌باشد. پس از بررسی‌های فراوان برای حل این مشکل و کارآمد بودن روش‌های ارائه شده در صنعت و کارهای عملی از یک بورد FPGA استفاده شده که تمامی روش‌های پیشنهادی در آن پیاده‌سازی شده است. علت استفاده از بورد FPGA سرعت پردازش بالای اطاعات و همچنین به روزرسانی کردن سخت‌افزار بوده است. شبیه‌سازی‌های فراوانی

امروزه با رشد روز افزون مصرف انرژی استفاده از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها جهت تولید انرژی الکتریکی رو به افزایش است. با توجه به تولید آلاینده‌های زیست محیطی توسط نیروگاه‌ها و نیاز روز افزون به انرژی الکتریکی ضرورت تولید انرژی الکتریکی با روش‌های نوین و بدون تولید آلاینده‌های زیست محیطی بیشتر مدنظر مدیریت کلان تولید انرژی قرار می‌گیرد. یکی از گونه‌های انرژی که جهت تولید نیروی الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد انرژی بادی است. انرژی باد به منبع مهمی برای تولید برق در بسیاری از کشورها تبدیل شده است و انتظار می‌رود که انرژی باد در آینده انرژی الکتریکی بیشتری فراهم کند [۱، ۲، ۳]. سیستم‌های تبدیل انرژی باد با سرعت متغیر از دو روش ژنراتورهای دو سو تغذیه [۴] یا کانورترهای کامل قدرت پیاده‌سازی می‌شوند [۵، ۶]. امروزه بسیاری از مزارع بادی بر مبنای فناوری DFIG با کانورترهای با نرخ ۲۰ تا ۳۰ درصد از توان ژنراتور، کار می‌کنند. در مقایسه با ژنراتورهای القایی سرعت ثابت در ژنراتور DFIG با استفاده از کنترل پارامترهای روتور می‌توان به محدوده وسیع، قابل انعطاف و سریع کنترل توان اکتیو و راکتیو دست یافت [۸، ۷، ۴]. شماییک سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG در شکل (۱) نشان داده شده است.

در حالی که روش کنترل بردار جریان روتور به عنوان یک روش مرسوم برای کنترل ژنراتور DFIG شناخته می‌شود [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱]. برای به کارگیری روش کنترل برداری، نیاز به استفاده از کنترل کننده‌های PI می‌باشد که عیب اصلی آنها مقاومت کنترل کننده به علت رفتار غیرخطی توربین بادی و نوسانات تیغه است و این امکان وجود دارد که پس از مدتی نیاز به تصحیح ضرایب کنترل کننده‌ها باشد.

امروزه روش‌های کنترل مستقیم به دلیل سادگی و عملکرد پویا بالا برای کنترل ژنراتور DFIG ارائه شده است. روش DTC برای نخستین بار در اواسط دهه ۱۹۸۰ معرفی شد [۱۲، ۱۳]. این روش استفاده از پارامترهای ماشین را به کمینه می‌رساند و پیچیدگی الگوریتم‌های روش کنترل برداری را ندارد و فقط جهت تخمین شار، وابسته به مقاومت استاتور می‌باشد [۱۴، ۱۵، ۱۶]. روش DTC به طور مستقیم گشتاور و شار ماشین را به وسیله انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب از جدول کلیدزنی و با استفاده از موقعیت شار و گشتاور استاتور کنترل می‌کند [۱۷، ۱۸].



شکل ۱: شماییک سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG

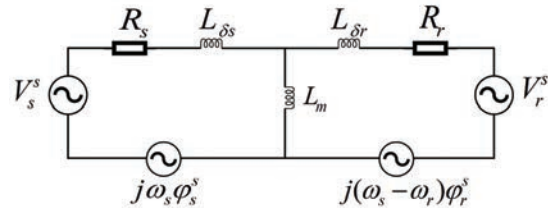
روش کنترل مستقیم توان DPC از روش کنترل مستقیم گشتاور DTC نشأت گرفته است، که نسبت به روش کنترل برداری دارای مزایای زیادی می‌باشد. که از جمله آن می‌توان به سادگی

برای روش‌های گفته شده انجام شده است که اثربخشی این روش‌ها را بر روی بورد FPGA تایید می‌کند.

۲- اصول توان اکتیو و راکتیو کنترل کننده‌های پیشنهادی

۱-۲- مدل سازی توربین بادی DFIG

در شکل (۲) مدل یک ژنراتور DFIG در دستگاه مرجع چرخان با سرعت سنکرون نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل ژنراتور القایی دوسو تغذیه در دستگاه چرخان با سرعت سنکرون
با توجه به شکل (۲) معادلات ولتاژ مدار استاتور و روتور به صورت روابط زیر بیان می‌شود [۶].

$$V_s^s = R_s I_s^s + \frac{d\phi_s^s}{dt} + j\omega_s \phi_s^s \quad (1)$$

$$V_r^s = R_r I_r^s + \frac{d\phi_r^s}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \phi_r^s \quad (2)$$

$$\phi_s^s = L_s I_s^s + L_m I_r^s \quad (3)$$

$$\phi_r^s = L_m I_s^s + L_r I_r^s \quad (4)$$

توان تزریقی به شبکه از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$P_s + jQ_s = -\frac{r}{\omega_s} V_s^s \times I_s^s \quad (5)$$

بنابراین در شرایط عملکرد نرمال و متعادل شبکه، دامنه و سرعت شار ثابت است. در نتیجه $\frac{d|\phi_s^s|}{dt} = 0$ می‌شود. اگر مولفه محور مستقیم ولتاژ استاتور را هم جهت با مولفه محور مستقیم دستگاه چرخان گردانیم، با صرف نظر کردن از مقاومت استاتور به رابطه (۶) دست پیدا می‌کنیم.

$$\begin{cases} V_{sdq} = V_{sd} \\ V_{sdq} = j\omega_s \phi_{sdq} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \phi_{sd} = \frac{V_{sd}}{\omega_s} \\ \phi_{sq} = -\frac{V_{sd}}{\omega_s} \end{cases} \quad (6)$$

با توجه به معادلات (۳)، (۴) و (۶) به توان‌های اکتیو و راکتیو می‌رسیم.

$$P_s = K_\sigma V_{sd} \phi_{rd} \quad (7)$$

$$Q_s = -K_\sigma V_{sd} \left(\frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{V_{sd}}{\omega_s} + \phi_{rq} \right) \quad (8)$$

که در معادله (۷) و (۸) $K_\sigma = \frac{r}{\omega_s} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$ می‌باشد. با توجه به معادلات (۷) و (۸)، در شرایطی که ولتاژ شبکه متعادل است دامنه ولتاژ ثابت باقی می‌ماند. یعنی با کنترل مولفه‌های شار روتور می‌توان توان‌های اکتیو و راکتیو را کنترل کرد.

۲-۲- کنترل توان اکتیو و راکتیو با تنظیم شار روتور

با گسسته‌سازی معادله (۲) دوره به شرح زیر است:

$$\frac{d\phi_{rdq}}{dt} = \frac{\phi_{rdq}(K+1) - \phi_{rdq}(K)}{T_s} = V_{rdq}(K) - R_r I_{rdq}(K) - j(\omega_s - \omega_r) \phi_{rdq}(K) \quad (9)$$

با صرف نظر کردن از مقاومت روتور اجزای شار روتور در نقطه

نمونه برداری $(1+k)$ بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \phi_{rd}(K+1) = \phi_{rd}(K) + T_s V_{rd}(K) + T_s (\omega_s - \omega_r) \phi_{rq}(K) \\ \phi_{rq}(K+1) = \phi_{rq}(K) + T_s V_{rq}(K) + T_s (\omega_s - \omega_r) \phi_{rd}(K) \end{cases} \quad (10)$$

با قرار دادن معادله (۱۰)، در معادلات (۷) و (۸)، مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو در لحظه نمونه‌برداری $1+K$ ، به صورت معادله (۱۱) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} P(K+1) = K_\sigma V_{sd}(K+1) \phi_{rd}(K+1) \\ P(K+1) \cong K_\sigma V_{sd}(K+1) \phi_{rd}(K+1) \\ Q(K+1) = -K_\sigma V_{sd}(K+1) \left[\frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{V_{sd}(K)}{\omega_s} + \phi_{rd}(K+1) \right] \\ Q(K+1) \cong -K_\sigma V_{sd}(K+1) \left[\frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{V_{sd}(K)}{\omega_s} + \phi_{rd}(K+1) \right] \end{cases} \quad (11)$$

مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو در لحظه $1+K$ همان مقادیر مرجع می‌باشند.

$$\begin{aligned} P(K+1) &= P_{ref}(K) \\ Q(K+1) &= Q_{ref}(K) \end{aligned} \quad (12)$$

با قراردادن معادله (۱۲) و (۱۰) در (۱۱)، مقادیر مرجع ولتاژهای کنترلی روتور به دست خواهند آمد.

$$\begin{cases} V_{rd}(K) = \frac{P_{ref} - P(K)}{T_s K_\sigma V_{sd}(K)} + \frac{\omega_s - \omega_r}{K_\sigma V_{sd}(K)} Q(K) + \frac{(\omega_s - \omega_r) L_r}{L_m \omega_s} V_{sd}(K) \\ V_{rq}(K) = \frac{Q_{ref} - Q(K)}{T_s K_\sigma V_{sd}(K)} + \frac{\omega_s - \omega_r}{K_\sigma V_{sd}(K)} P(K) \end{cases} \quad (13)$$

۳- روش‌های کنترلی پیشنهادی برای کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو ژنراتور DFIG

۳-۱- روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی

با بررسی دقیق‌تر معادله (۱۳) این معادله را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$V_{rd} = U_{rd} + E_{rd} \quad (14)$$

$$V_{rq} = U_{rq} + E_{rq} \quad (15)$$

$$U_{rd} = K_p (P_{ref} - P) \quad (16)$$

$$U_{rq} = -K_p (Q_{ref} - Q) \quad (17)$$

$$E_{rd} = \omega_{slip} \left(\frac{Q(K)}{K_\sigma V_{sd}(K)} + \frac{L_r V_{sd}(K)}{L_m \omega_s} \right) \quad (18)$$

$$E_{rq} = \omega_{slip} \frac{P(K)}{K_\sigma V_{sd}(K)} \quad (19)$$

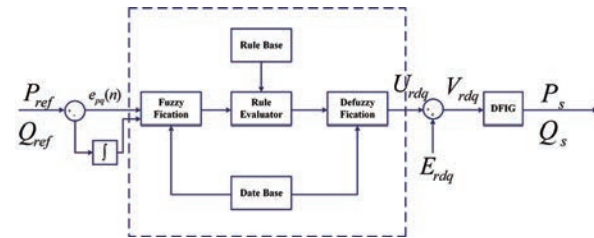
براساس معادلات (۱۶) تا (۱۹) می‌توان نتیجه گرفت که ولتاژهای مرجع روتور از دو جز تشکیل شده است. نخستین جز U_{rdq} که خروجی کنترل کننده‌های تناسبی بوده که مقادیر K_p و K_q ضرایب کنترل کننده‌ها می‌باشند. جز دوم E_{rdq} که متناسب با فرکانس لغزش می‌باشد.

$$\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r$$

در این مقاله بیشتر به دو دلیل از کنترل کننده فازی استفاده شده است. نخست اینکه نیازی به اطلاعات و مدل ریاضی سیستم تحت کنترل ندارد. دوم به دلیل ساختار ساده برای پیاده‌سازی‌های عملی بسیار مناسب می‌باشند.

خطای توان‌های اکتیو و راکتیو، E_{rd} و E_{rq} همچنین انتگرال این خطاها به عنوان ورودی‌های کنترل کننده فازی مورد استفاده قرار

می گیرند. ساختار کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی در شکل (۳) نشان داده شده است.



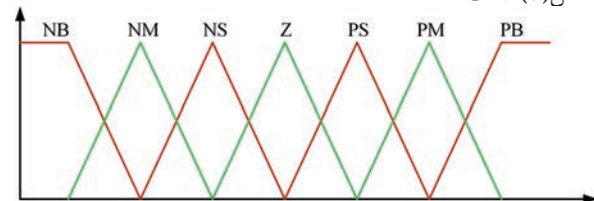
شکل ۳: ساختار کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی

۳-۲- منطق کنترل کننده فازی

همان طور که در شکل نشان داده شده است خطای توان های اکتیو و راکتیو و همچنین انتگرال آنها به عنوان ورودی های کنترل کننده فازی استفاده شده است. خروجی کنترل کننده فازی به عنوان ولتاژ مرجع روتور استفاده می شود. از طرفی از دو کنترل کننده فازی مستقل برای کنترل توان های اکتیو و راکتیو استفاده شده است. همه ورودی ها و خروجی از ۷ تابع عضویت استفاده شده است که این توابع عضویت عبارتند از:

BN (Big Negative)، MN (Medium Negative)، SN (Small Negative)، Z (Zero)، PS (Positive Small)، PM (Positive Medium)، PB (Positive Big)

به عنوان مثال توابع عضویت برای خطای توان اکتیو به صورت شکل (۴) است.



شکل ۴: توابع عضویت خطای توان اکتیو

سیستم فازی دارای ۴۹ قانون است که برای تصمیم گیری استفاده می شوند. این ۴۹ قانون در جدول (۱)، آورده شده است. برای نمونه یک قانون را می توان به صورت زیر نوشت:

جدول ۱: قوانین کنترل کننده فازی

$\int e / e$	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	Z
PM	PB	PB	PB	PM	PS	Z	NS
PS	PB	PB	PM	PS	Z	NS	NM
Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NS	PM	PS	Z	NS	NM	NB	NB
NM	PS	Z	NS	NM	NB	NB	NB
NB	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB

برای نمونه یک قانون را می توان به صورت زیر نوشت:

if ($e_p(e_q \text{ is } X) \text{ AND } (\int e_p(\int e_q) \text{ is } y) \text{ then } (U_{rd}(U_{rq} \text{ is } w))$)

عملکرد سیستم فازی براساس قانون ممدانی می باشد [۲۸، ۲۹]. وقتی مجموعه ای از ورودی ها خوانده می شود، هر کدام از قوانین

خروجی خود را تولید می کنند. به عنوان مثال برای کنترل کننده فازی توان اکتیو خروجی به صورت زیر می باشد.

$$\alpha_i \min \{ \mu_p(e_p) \text{ و } \mu_{fp}(\int e_p) \}$$

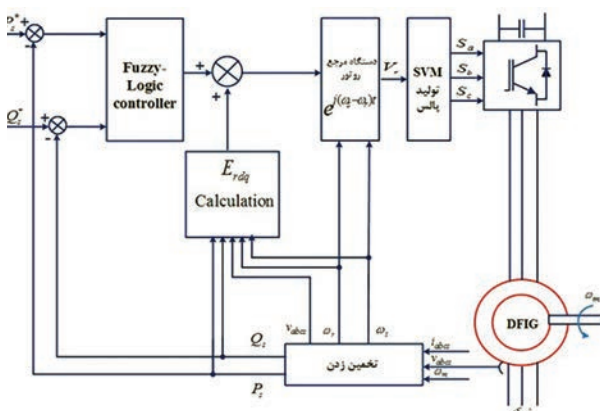
μ_p and μ_{fp} توابع عضویت هر ورودی است α_i ضریب وزنی می باشد. در مرحله بعد این خروجی با تمام توابع عضویت متغیرهای خروجی مقایسه می شوند:

$$O_i \min \{ \alpha_i \text{ و } \mu_{vi} \}$$

که در آن، μ_{vi} and O_i مقدار خروجی نهایی و تابع عضویت متغیر خروجی می باشند. براساس این اصل خروجی تمام قوانین با یکدیگر مقایسه شده و مقدار ماکزیمم انتخاب می گردد.

$$\mu_v = \max \{ O_i \} \quad i = 1, 2, \dots$$

در آخر از روش نافازی سازی برای تولید ولتاژ خروجی استفاده می شود. به طور کلی می توان گفت که نافازی سازی فرایند تبدیل متغیرها از محیط فازی به محیط قطعی می باشد. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترلی روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده فازی

۳-۳- کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده تمام فازی

طبق معادلات (۱۴) و (۱۵) مقادیر مرجع روتور از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت دوم، نیروی الکترومغناطیس بازگشتی بوده که به مقادیر توان های اکتیو و راکتیو، ولتاژ استاتور و تعدادی از پارامترهای ماشین وابسته می باشد. به عبارت دیگر این روش عملکرد دینامیکی DFIG را بهبود می بخشد. از طرفی چون این مولفه متناسب با فرکانس لغزش می باشد پس این مولفه در سرعت سنکرون برابر صفر می باشد. بنابراین این مولفه در کنترل کننده تمام فازی حذف شده و فقط کنترل کننده فازی برای تولید ولتاژ مرجع روتور مورد استفاده قرار می گیرد. ورودی ها و خروجی های سیستم کنترل کننده تمام فازی همانند سیستم کنترل کننده فازی است و فقط بازه ی تغییرات این متغیرها متفاوت است. بلوک دیاگرام کنترلی روش کنترل مستقیم توان تمام فازی در شکل (۶) نشان داده شده است. در مقایسه با نمودار بلوک شکل (۵)، بلوک محاسبه E_{rdq} برداشته می شود که طراحی و اجرای آن را ساده تر می کند.

در هر دو روش، هنگامی که ولتاژهای روتور محاسبه شد، این

دیجیتالی پیچیده و اجتناب از ساخت بردهایی با تراشه‌های گسسته به وجود آمده‌اند. با استفاده از تراشه‌های FPGA بوردهایی که پیش‌تر با تعداد زیادی از تراشه‌های دیجیتال ساخته می‌شدند در یک برد FPGA با سرعت بالاتر و از همه مهمتر با امکان به‌روزرسانی کردن سخت‌افزار پیاده‌سازی می‌شوند. استفاده از بوردهای FPGA در اجرای سیستم‌های کنترلی به دلیل مزایایی که دارد از جمله هزینه کمتر، قابل دسترس بودن و قابلیت پیکربندی در حال گسترش می‌باشد. برای پیاده‌سازی روش‌های ارائه شده از برد FPGA افراد اندیش که در شکل (۷) نشان داده شده استفاده شده است [۳۰، ۳۱، ۳۲]. تراشه این برد SPARTAN6SLX9 می‌باشد.



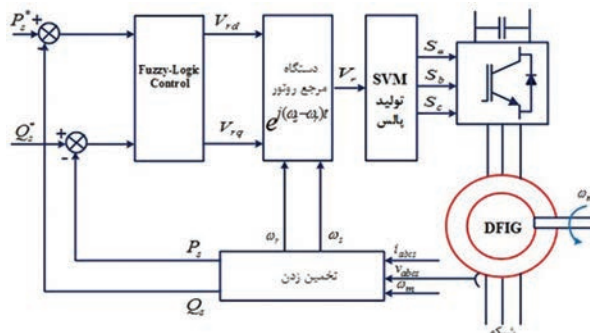
شکل ۷: نمایی از برد FPGA فراداندیش

برای پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی در برد FPGA ابتدا هر روش به بخش‌های مختلف تقسیم شده و در ادامه روابط هر بخش در نرم افزار ISE کد زنی می‌شوند.

۵- شبیه‌سازی

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی شبیه‌سازی‌های گوناگونی در شرایط مختلف با استفاده از نرم افزار / Matlab Simulink انجام گرفته است. سیستم شبیه‌ساز برای توربین بادی DFIG در شکل (۸) نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی‌ها از یک موتور القایی آسنکرون به عنوان ژنراتور القایی DFIG استفاده شده است. مشخصات ژنراتور در جدول (۲)



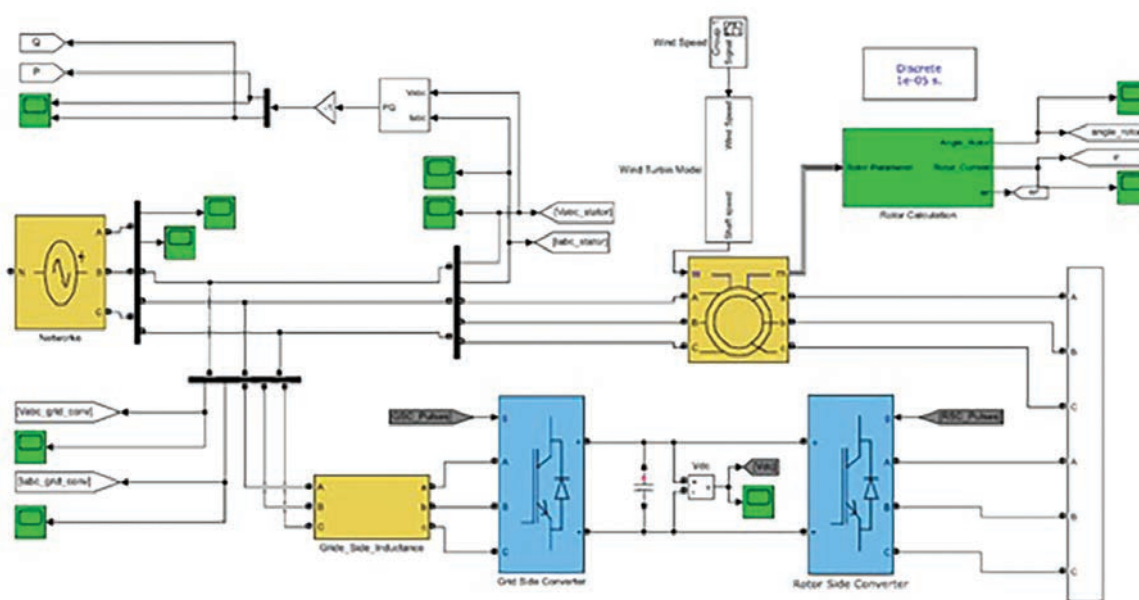
شکل ۶: بلوک دیاگرام کنترلی روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده تمام فازی ولتاژها باید به قاب مرجع روتور تبدیل شوند. این با معادله زیر حاصل می‌شود.

$$V_r^r = V_r^s e^{j(\omega_s - \omega_r)t}$$

لازم به ذکر است که نیازی به محدود کننده ولتاژ مرجع نیست، از آنجا که سیستم کنترل کننده فازی به‌طور ذاتی ولتاژهای مرجع تولید شده را در حالت گذرا محدود می‌کند. پس از محاسبه، می‌توان از تکنیک‌های پیشرفته مدولاسیون مانند SPWM، SVPWM و ... برای تولید پالس‌ها با یک فرکانس سوئیچینگ ثابت استفاده کرد.

۴- پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی با استفاده از برد FPGA

روش‌های کنترلی پیشنهادی طوری طراحی شده است که برای کاربرهای صنعتی و عملی بسیار مناسب می‌باشند و از طرفی طرح‌های پیشنهادی فقط برای سیستم‌های آزمایشگاهی توربین بادی DFIG قابل استفاده است. زیرا دارای مشکلات از قبیل تاخیر در محاسبات و تاخیر در ارسال خروجی اطلاعات می‌باشد. با بررسی‌های فراوان برای حل این مشکل و پیاده‌سازی روش‌های ارائه شده برای مدل‌های صنعتی و واقعی از یک برد FPGA استفاده شده است. بوردهای FPGA برای توسعه سخت‌افزارهای



شکل ۸: بخش قدرت توربین بادی DFIG

آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی ژنراتور DFIG

Asynchronous Machine	P _{nom} =2MW, V _{nom} =690V, F _{nom} =50 Hz
DCLink Capacitor	16000e-6 F
Grid Side Filter	4e-3 H + 0.01 Ω
Network	V _{nom} =690V, F _{nom} =50 Hz

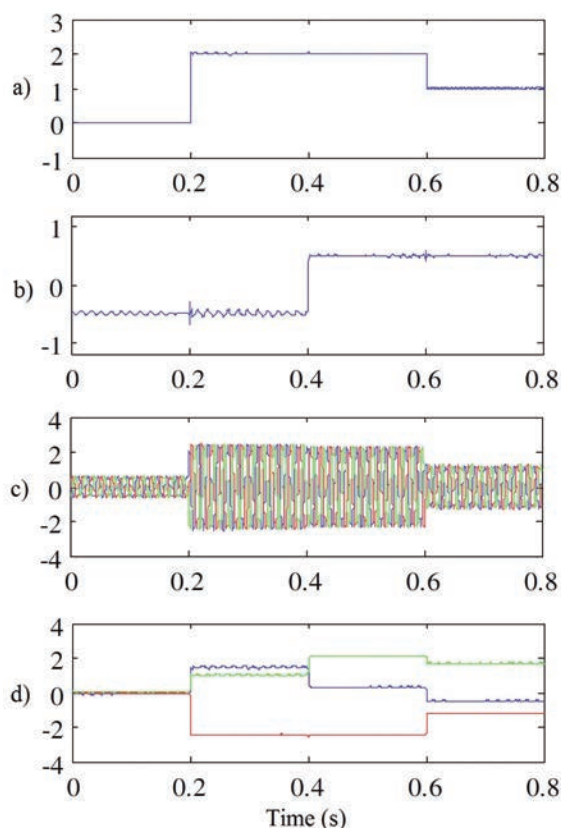
کنترل مستقیم توان پیشنهادی به ترتیب 4KHz و 2KHz است. از طرفی در روش پیشنهادی از یک مدولاتور PWM به روش SVM استفاده شده است.

برای بررسی عملکرد پویا تغییرات پله‌ای گوناگون در توان‌های اکتیو و راکتیو اعمال شده که در شکل (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این حالت سرعت روتور در مقدار 1pu از خارج اعمال شده و در این مقدار ثابت می‌ماند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در ابتدا توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب در مقدارهای 0MW و -5MW تنظیم شده‌اند، سپس در زمان 0.2s تغییر پله‌ای افزایش در مقدار توان اکتیو از مقدار 0 به 2MW داده شده است. همچنین در زمان 0.4s تغییر پله‌ای افزایش در مقدار مرجع توان راکتیو از مقدار -0.5Mvar به 0.5Mvar داده شده است. هر دو روش کنترلی پیشنهادی دارای پاسخ حالت پویای سریعی بوده و در زمانی در حدود چند میلی ثانیه مقادیر مرجع را دنبال می‌کند. به منظور بررسی دقیق‌تر، تغییر پله‌ای کاهشی از مقدار 1MW به 2MW در مرجع توان اکتیو اعمال شده است. هر دو روش کنترل پیشنهادی سریع واکنش نشان داده و مقدار توان اکتیو را در مقدار مرجع تنظیم می‌کنند.

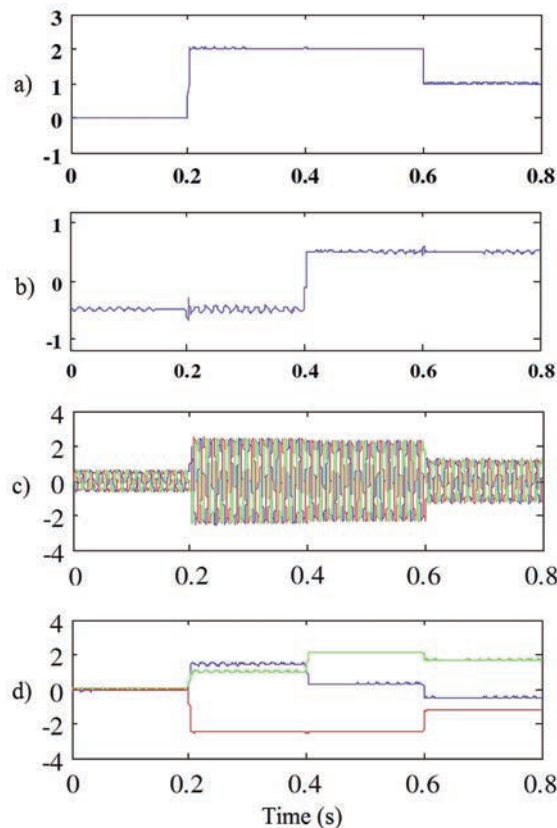
برای تایید اینکه تغییرات پارامترهای ژنراتور DFIG ناچیز بوده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد روش کنترلی ندارد شبیه‌سازی با ۴۰٪ خطا در مقدار اندوکتانس متقابل L_m و تغییرات سرعت روتور انجام گرفته است که نتایج را در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌کنیم. روش‌های کنترلی پیشنهادی عملکرد طبیعی خود را حتی با تغییر سرعت باد هم زمان با تغییرات پله‌ای در

از دو مبدل به‌عنوان مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه در توربین بادی DFIG استفاده شده است. این مبدل‌ها از طریق یک لینک DC به یکدیگر متصل می‌شوند، وظیفه مبدل سمت شبکه ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای کنترل مبدل سمت شبکه ارائه شده که در این مقاله از روش گفته شده در [۹] استفاده شده است. همچنین در روش پیشنهادی ولتاژ لینک DC بر روی مقدار 1200 V تنظیم شده است [۱۰، ۱۱]. از طرفی یک فیلتر RC نیز در محل اتصال استاتور به ترانسفورماتور استفاده شده است. وظیفه این فیلتر حذف هارمونیک‌های فرکانس بالای ناشی از کلیدزنی مبدل‌ها می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده فرکانس نمونه‌برداری روش کنترل مستقیم توان بر مبنای جدول کلید زنی 25KHz انتخاب شده است.

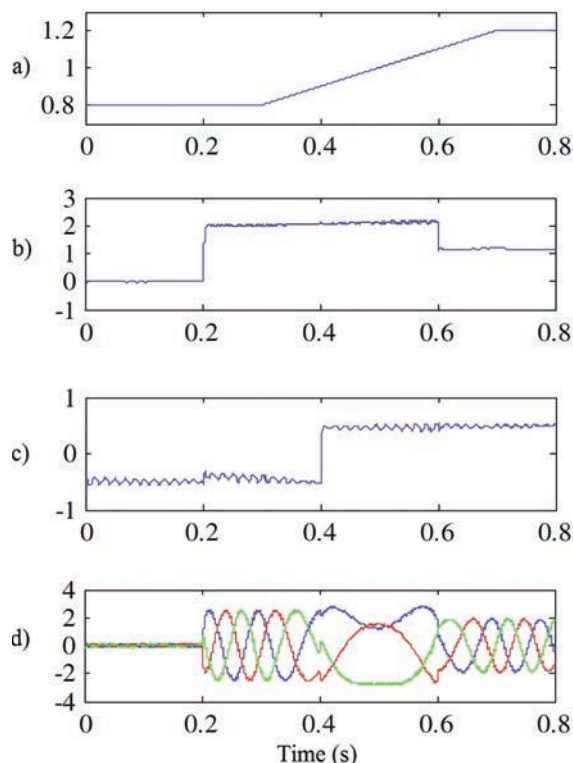
فرکانس نمونه‌برداری و کلیدزنی مبدل سمت روتور برای روش



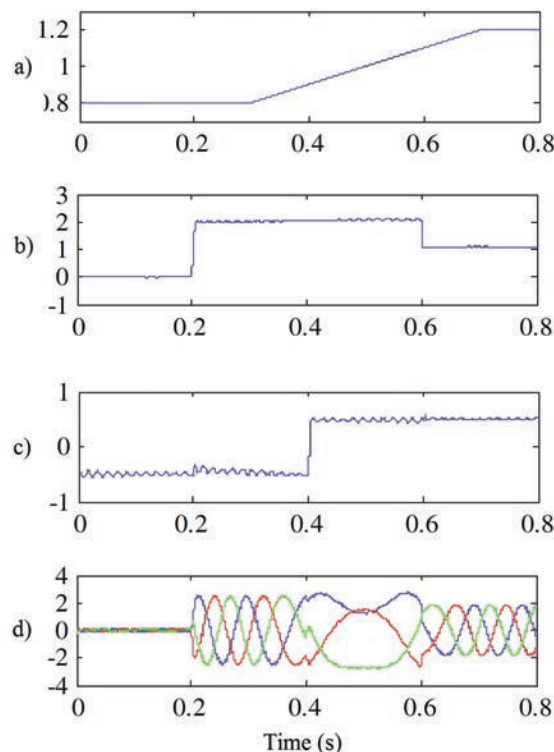
شکل ۱۰: عملکرد حالت پویا روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده تمام فازی (a) توان اکتیو (b) توان راکتیو (c) جریان استاتور (d) جریان روتور (KA)



شکل ۹: عملکرد حالت پایدار روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل‌کننده فازی (a) توان اکتیو (b) توان راکتیو (c) جریان استاتور (d) جریان روتور (KA)



شکل ۱۲: عملکرد روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده تمام فازی تحت تغییرات سرعت روتور و ۴۰٪ خطا در مقدار اندوکتانس متقابل (a) Lm جریان استاتور (b) توان اکتیو (c) توان راکتیو (d) جریان روتور KA



شکل ۱۳: عملکرد روش کنترل مستقیم توان مبتنی بر کنترل کننده تمام فازی تحت تغییرات سرعت روتور و ۴۰٪ خطا در مقدار اندوکتانس متقابل (a) Lm جریان استاتور (b) توان اکتیو (c) توان راکتیو (d) جریان روتور KA

doubly fed induction generator based wind turbines under both symmetrical and asymmetrical grid faults." IET renewable power generation 10.8 (2016): 1114-1122.

- [5] Tremblay, Etienne, Sergio Atayde, and Ambrish Chandra. "Comparative study of control strategies for the doubly fed induction generator in wind energy conversion systems: A DSP-based implementation approach." IEEE Transactions on sustainable energy 2.3 (2011): 288-299.
- [6] Bektache, A., and B. Boukhezzer. "Nonlinear predictive control of a DFIG-based wind turbine for power capture optimization." International journal of electrical power & Energy systems 101 (2018): 92-102.
- [7] Ngamroo, Issarachai. "Review of DFIG wind turbine impact on power system dynamic performances." IEEE Transactions on electrical and electronic engineering 12.3 (2017): 301-311.
- [8] Benbouhenni, Habib. "Comparative study between different vector control methods applied to DFIG wind turbines." Majlesi Journal of Mechatronic Systems 6.4 (2018): 15-23.
- [9] Bouderbala, Manale, et al. "Direct and indirect vector control of a doubly fed induction generator based in a wind energy conversion system." International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 9.3 (2018): 1531-1540.
- [10] Houcine, Becheri, et al. "Vector control of wind turbine conversion chain variable speed based on DFIG Using MPPT strategy." International Journal of Applied Engineering Research 13.7 (2018): 5404-5410.
- [11] Kumhar, Asha Ram. "Vector Control Strategy to Control Active and Reactive Power of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Energy Conversion System." 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE, 2018.
- [12] Boudjema, Zinelaabidine, et al. "A novel direct torque control using second order continuous sliding mode of a doubly fed induction generator for a wind energy conversion system." Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 25.2 (2017): 965-975.
- [13] Sahri, Younes, Salah Tamalouzt, and Sofia Lalouni Belaid. "Direct torque control of DFIG driven by wind turbine system connected to the grid." 2018 International Conference on Wind Energy and

توان های اکتیو و راکتیو حفظ می کند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله دو روش برای کنترل مستقیم توان پیشنهاد شده است. در ابتدا مدل ریاضی ژنراتور DFIG در دستگاه مرجع چرخان با سرعت سنکرون پیاده سازی شده است. در ادامه با استفاده از این مدل ولتاژهای مرجع روتور به وسیله کنترل کننده فازی محاسبه می شود. در روش ارائه شده یه مدولاتور PWM جایگزین مقایسه کننده های هیستریزس و جدول کلیدزنی شده است. روش های پیشنهادی جهت پیاده سازی بر روی سخت افزار مناسب نبوده و دارای مشکلاتی می باشند که برای حل این مشکل و کارایی روش های پیشنهادی فوق برای کاربردهای صنعتی از بورد FPGA استفاده شده است. شبیه سازی های مختلفی بر روی روش های سیستم کنترلی پیشنهادی تحت بورد FPGA انجام شده است، که طبق این شبیه سازی ها عملکرد سیستم در شرایط پایدار و همچنین پارامترهای دستگاه و تغییرات سرعت روتور مورد تایید است.

۷- منابع

- [1] World Wind Energy Association (online) , Available: <http://www.windea.org>
- [2] Soued, Salah, H. S. Ramadan, and Mohamed Becherif. "Effect of Doubly Fed Induction Generator on Transient Stability Analysis under Fault Conditions." Energy Procedia 162 (2019): 315-324.
- [3] Zhao, Hongshan, and Liangliang Cheng. "Open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of DF wind turbine." IET Renewable Power Generation 11.4 (2017): 417-424.
- [4] Mohammadi, Jafar, et al. "Improved fault ride through strategy for

- [67] Pang Z, Zhu D, Chen D, Li L, Shao Y. A computer-aided diagnosis system for dynamic contrast-enhanced MR images based on level set segmentation and ReliefF feature selection. *Comput. Math. Methods Medicine*. 2015 Jan 6;2015:450531-1.
- [68] Chen Z, Zhang X, Zhang Z. Clinical risk assessment of patients with chronic kidney disease by using clinical data and multivariate models. *International urology and nephrology*. 2016 Dec;48:2069-75.
- [69] Tazin N, Sabab SA, Chowdhury MT. Diagnosis of Chronic Kidney Disease using effective classification and feature selection technique. In 2016 international conference on medical engineering, health informatics and technology (MediTec) 2016 Dec 17 (pp. 1-6). IEEE.
- [70] Bhattacharya M, Jurkovic C, Shatkay H. Chronic Kidney Disease stratification using office visit records: Handling data imbalance via hierarchical meta-classification. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2018 Dec;18:35-44.
- [71] Akben SB. Early stage chronic kidney disease diagnosis by applying data mining methods to urinalysis, blood analysis and disease history. *Irbm*. 2018 Nov 1;39(5):353-8.
- [72] Almasoud M, Ward TE. Detection of chronic kidney disease using machine learning algorithms with least number of predictors. *International Journal of Soft Computing and Its Applications*. 2019;10(8).
- [73] Senan EM, Al-Adhaileh MH, Alsaade FW, Aldhyani TH, Alqarni AA, Alsharif N, Uddin MI, Alahmadi AH, Jadhav ME, Alzahrani MY. Diagnosis of chronic kidney disease using effective classification algorithms and recursive feature elimination techniques. *Journal of Healthcare Engineering*. 2021 Jun 9;2021.
- [74] Qin J, Chen L, Liu Y, Liu C, Feng C, Chen B. A machine learning methodology for diagnosing chronic kidney disease. *IEEE Access*. 2019 Dec 30;8:20991-1002.
- [75] Segal Z, Kalifa D, Radinsky K, Ehrenberg B, Elad G, Maor G, Lewis M, Tibi M, Korn L, Koren G. Machine learning algorithm for early detection of end-stage renal disease. *BMC nephrology*. 2020 Dec;21:1-0.
- [76] Polat H, Danaei Mehr H, Cetin A. Diagnosis of chronic kidney disease based on support vector machine by feature selection methods. *Journal of medical systems*. 2017 Apr;41:1-1.
- [77] Sharma S, Sharma V, Sharma A. Performance based evaluation of various machine learning classification techniques for chronic kidney disease diagnosis. *arXiv preprint arXiv:1606.09581*. 2016 Jun 28.
- [78] Mohammed Siyad B, Manoj M, Mohammed Siyad B, Manoj M. Fused features classification for the effective prediction of chronic kidney disease. *International Journal*. 2016 Mar;2:44-8.
- [79] Ani R, Sasi G, Sankar UR, Deepa OS. Decision support system for diagnosis and prediction of chronic renal failure using random subspace classification. In 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) 2016 Sep 21 (pp. 1287-1292). IEEE.
- [80] Subasi A, Alickovic E, Kevric J. Diagnosis of chronic kidney disease by using random forest. In *CMBEBIH 2017: Proceedings of the International Conference on Medical and Biological Engineering* 2017 2017 (pp. 589-594). Springer Singapore.
- [81] Padmanaban KA, Parthiban G. Applying machine learning techniques for predicting the risk of chronic kidney disease. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016 Aug;9(29):1-6.
- [82] <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.php/UCI Archive>, Machine Learning Repository
- [83] <https://www.mathworks.com>
- Applications in Algeria (ICWEAA). IEEE, 2018.
- [14] Bourouina, Ahmed, et al. "High order sliding mode direct torque control of a DFIG supplied by a five-level SVPWM inverter for the wind turbine." *Elektrotehniski Vestnik* 85.5 (2018): 263-270.
- [15] Kouadria, Selman, et al. "Improved control strategy of DFIG-based wind turbines using direct torque and direct power control techniques." *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10.4 (2018): 043306.13
- [16] Benbouhenni, Habib, Zinelaabidine Boudjema, and Abdelkader Belaidi. "Direct vector control of a DFIG supplied by an intelligent SVM inverter for wind turbine system." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 15.1 (2019): 45-55.
- [17] Patel, Ranjan Kumar, and Giribabu Dyanamina. "Direct torque control of doubly fed induction generator for wind energy conversion system." 2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE, 2017.
- [18] Taleb, M., M. El Haroussi, and A. Ba-Razzouk. "Improved Direct Torque Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Energy Conversion System." 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). IEEE, 2018.
- [19] Xiong, Linyun, et al. "Fractional order sliding mode based direct power control of grid-connected DFIG." *IEEE Transactions on Power Systems* 33.3 (2017): 3087-3096.
- [20] Sun, Dan, et al. "A sliding-mode direct power control strategy for DFIG under both balanced and unbalanced grid conditions using extended active power." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.2 (2017): 1313-1322.
- [21] Heydari, E., M. Rafiee, and M. Pichan. "Fuzzy-genetic algorithm-based direct power control strategy for DFIG." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 14.4 (2018): 353-361.
- [22] Zhang, Yongchang, Jian Jiao, and Donglin Xu. "Direct power control of doubly fed induction generator using extended power theory under unbalanced network." *IEEE Transactions on Power Electronics* 34.12 (2019): 12024-12037.
- [23] Benbouhenni, Habib. "A comparison study between fuzzy PWM and SVM inverter in NSMC control of stator active and reactive power control of a DFIG based wind turbine systems." *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)* 8.1 (2019): 78-92.
- [24] Mazouz, F., et al. "Direct power control of DFIG by sliding mode control and space vector modulation." 2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC). IEEE, 2018.
- [25] Amrane, Fayssal, Azeddine Chaiba, and Bruno Francois. "Suitable power control based on type-2 fuzzy logic for wind-turbine dfig under hypo-synchronous mode fed by multi-level converter." 2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B). IEEE, 2017.
- [26] Heydari, E., M. Rafiee, and M. Pichan. "Fuzzy-genetic algorithm-based direct power control strategy for DFIG." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 14.4 (2018): 353-361.
- [27] Zamzoum, Othmane, et al. "Power control of variable speed wind turbine based on doubly fed induction generator using indirect field-oriented control with fuzzy logic controllers for performance optimization." *Energy Science & Engineering* 6.5 (2018): 408-423.
- [28] Lee CC. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part I. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 1990;20:404e18.
- [29] Lee CC. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. Part II. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 1990;20:419e35
- [30] Ed-dahmani, Chafik, et al. "FPGA Based Variable Structure Control of Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power." *Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18)* (2018).
- [31] Nahilia, Houssam, et al. "Doubly fed induction wind generators model and field orientation vector control design and implementation on FPGA." *International Journal of Dynamics and Control* 7.3 (2019): 1005-1014.
- [32] Mahmoudi, Hassane, Marouane El Azzaoui, and Chafik Ed-Dahmani. "ZedBoard-FPGA Control of the DFIG Based Wind Power System." *Modeling, Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems*. Springer, Singapore, 2019. 333-355.



مقاله علمی-ترویجی

بررسی و معرفی گروه‌های پژوهشی و سیستم‌های تجاری تصویربرداری پزشکی مایکروویو

■ بهنام قندی^{*}، گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، ghandibehnam112@gmail.com

■ وحید محتشمی، گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، v.mohtashami@um.ac.ir

■ محمدسعید ماجدی، گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، majedi@um.ac.ir

■ امیررضا عطاری، گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، attari50@um.ac.ir
^{*}نویسنده مسئول

چکیده

امروزه تصویربرداری مایکروویو به‌عنوان فناوری نوظهور در تشخیص و مشخصه‌یابی اهداف در زمینه‌های زیادی از جمله عمرانی، صنعتی، زمین‌شناسی و پزشکی نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این گزارش با تأکید بر تصویربرداری پزشکی مایکروویو به بررسی و معرفی سیستم‌های دانشگاهی و تجاری شاخص در زمینه تشخیص سرطان سینه و عارضه‌های مغزی خواهیم پرداخت. اساس تصویربرداری پزشکی مایکروویو تفاوت در خصوصیات دی‌الکتریک بافت‌های مختلف بدن در باند مایکروویو می‌باشد. در این گزارش ۹ گروه پژوهشی شاخص و ۵ شرکت تجاری فعال در زمینه تصویربرداری پزشکی مایکروویو را معرفی و مورد بررسی قرار خواهیم داد. نتایج مطالعات بالینی سیستم‌های یاد شده حاکی از حساسیت و قابلیت اطمینان مطلوب تصویربرداری مایکروویو در تشخیص توده‌های ناسالم، چه در بافت سینه و چه در سر می‌باشد.

کلمات کلیدی: تصویربرداری مایکروویو، تشخیص سرطان سینه، تشخیص سکنه مغزی.

An Introduction to Research Groups and Commercial Systems of Microwave Medical Imaging.

■ Behnam Ghandi^{*}, Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, ghandibehnam112@gmail.com

■ Vahid Mohtashami, Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, v.mohtashami@um.ac.ir

■ Mohammad Saeed Majedi, Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad- Iran, majedi@um.ac.ir

■ Reza Attari, Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, attari50@um.ac.ir

^{*}Corresponding Author

Abstract

Nowadays, microwave imaging, as an emerging technology, plays an important role in the detection and characterization of targets in many fields, including civil engineering, industry, geology, and medicine. In this paper, with an emphasis on microwave medical imaging, we will review and introduce leading academic and commercial systems in the field of breast cancer diagnosis and brain complications. The basis of microwave medical imaging is the dif-

ference in the dielectric properties of different body tissues in the microwave band. In this paper, we will introduce and examine 9 prominent research groups and 5 commercial companies active in the field of microwave medical imaging. The results of clinical studies of the mentioned systems indicate the optimal sensitivity and reliability of microwave imaging in detecting unhealthy masses, both in the breast tissue and in the head.

Keywords: Microwave imaging, breast cancer detection, stroke diagnosis.

۱- مقدمه

کردن (Ionizing) آنها به عنوان روشی تهاجمی (Invasive) شناخته می شود. فارغ از این ماموگرافی به دلیل فشرده سازی فیزیکی بافت سینه می تواند برای بیمار ناراحت کننده باشد.

دلایل بالا به خوبی اهمیت استفاده از روشی غیرتهاجمی (Non-invasive)، غیر یونیزه کننده (Nonionizing)، ارزان و با قابلیت اطمینان بالا را به عنوان مکمل و کمک کننده به ماموگرافی برای تشخیص سرطان سینه نشان می دهد. همان طور که پیشتر ذکر شد اساس تصویربرداری مایکروویو اختلاف در خصوصیات دی الکتریک است. این روش علاوه بر بی خطر بودن برای بیمار، نیازی به فشرده سازی بافت نیز نداشته و می توان نشان داد که قابلیت اطمینان بالایی را نیز ثبت می کند. در بخش های بعدی مقاله در مورد تشخیص سرطان سینه مبتنی بر تصویربرداری مایکروویو به طور مشروح صحبت خواهیم نمود.

تشخیص آسیب های مغزی مبتنی بر تصویربرداری مایکروویو از جمله کاربردهای دیگر این فناوری به شمار می رود. آسیب های مغزی ای که به طور معمول توسط تصویربرداری مایکروویو شناسایی می گردند در دو دسته سکته مغزی و خونریزی داخلی در جمجمه تقسیم بندی می شوند.

بر اساس آمار سازمان بهداشت ۱۰ درصد مرگ و میر جهانی به طور متوسط در سال به واسطه خونریزی داخلی در جمجمه رخ می دهد و می توان آن را یکی از علل اصلی مرگ در جوانان دانست. اقدام فوری در تشخیص و درمان خونریزی داخلی سبب کاهش آمار مرگ و میر بالا می شود. متأسفانه در حال حاضر ابزاری کارآمد به طور گسترده وجود ندارد که صدمات مصدوم را در زمان کم و در محل سانحه (Pre-hospital) تشخیص دهد [۶].

سکته مغزی علاوه بر اینکه یک بیماری یا عارضه مغزی شناخته می شود؛ به عنوان یک چالش مهم در اقتصاد جهانی نیز تلقی می گردد [۷]. سکته مغزی به عنوان دومین دلیل رایج مرگ و سومین دلیل اصلی ناتوانی جسمی در افراد است [۸، ۹]. متأسفانه امروزه علی رغم توجه بالا بر سکته مغزی و عوامل آن، تنها بین ۱ تا ۸ درصد از مبتلایان به فناوری های تشخیص و درمان آن دسترسی داشته و از آنها بهره می برند که دلیل آن را می توان زمان طولانی برای تشخیص [۱۰، ۱۱]، هزینه بالا و حتی عدم دسترسی برای همگان دانست.

در تشخیص و درمان هر دو مورد سکته مغزی و خونریزی داخلی جمجمه، زمان نقشی کلیدی را ایفا می کند. بدین صورت که اگر در کوتاه ترین زمان ممکن، برای مثال در محل سانحه، تشخیص صورت گرفته و اقداماتی اولیه روی بیمار انجام گیرد؛ می توان اطمینان داد که تا حد بالایی از صدمات جبران ناپذیر جلوگیری شده است.

MRI و CT (Computed Tomography) از جمله روش هایی هستند که در تشخیص عارضه های مغزی مفید و موثر واقع می شوند؛ اما هر دو پرهزینه و غیر قابل حمل هستند و به همین دلیل فقط در مراکز درمانی قابل دسترسی می باشند [۶]. این در حالی است

تصویربرداری مایکروویو (Imaging Microwave) به عنوان روشی غیرمخرب مبتنی بر پردازش امواج مایکروویو پراکنده شده از اجسام، به مشخصه یابی محیط می پردازد. تصویربرداری مایکروویو که تقریباً به عنوان یک فناوری نوظهور شناخته می شود؛ در بسیاری از زمینه ها از جمله عمرانی، صنعتی، زمین شناسی و پزشکی کاربرد دارد [۱].

تصویربرداری پزشکی مایکروویو (Microwave Medical Imaging) در طی دو دهه اخیر به دلیل اتخاذ روشی غیرمخرب و بدون آسیب به بافت های بدن، بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. اساس کار این فناوری تفاوت در خصوصیات دی الکتریک (گذردی نسبی و رسانایی الکتریکی) بافت های مختلف بدن می باشد. در واقع بافت های مختلف بدن به دلیل دارا بودن خصوصیات دی الکتریک متفاوت در باند مایکروویو، قابل تمیز پیدا کردن از یکدیگر می باشند. علاوه بر این سلول های سرطانی به دلیل افزایش سطح آب در آنها، گذردی و رسانندگی بالاتری را از خود نشان داده و در نتیجه پراکندگی الکترومغناطیسی بالاتری خواهند داشت. این موضوع اساس تصویربرداری مایکروویو در تشخیص سلول های سرطانی است [۲، ۳].

امروزه تشخیص سرطان سینه (Breast Cancer Detection) و تشخیص عارضه های مغزی نظیر تشخیص سکته مغزی (Detection Stroke Brain) و خونریزی داخلی در جمجمه (Bleeding Intracranial) از جمله کاربردهای تصویربرداری مایکروویو در پزشکی به شمار می روند که مورد علاقه بسیاری از پژوهشگران برجسته قرار گرفته است.

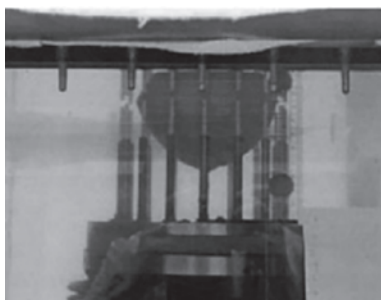
باتوجه به گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO) (World Health Organization)، سرطان سینه به عنوان نخستین سرطان شایع در جهان و فراوان ترین در میان زنان است [۴]. نکته قابل توجه در سرطان سینه این است که اگر این سرطان در مراحل ابتدایی تشکیل شناسایی گردد؛ علی رغم نرخ بالای شیوع آن، دوره درمان کوتاه تری داشته و مرگ و میر ناشی از آن نیز کمتر خواهد بود.

در حال حاضر در بسیاری از مراکز مراقبتی و درمانی، ماموگرافی (Mammography) به عنوان نخستین گزینه در تشخیص سرطان سینه شناخته می شود. در واقع اساس ماموگرافی میزان جذب اشعه ایکس توسط بافت های مختلف بدن است. در تصویر حاصل از ماموگرافی سه ناحیه سیاه، خاکستری و سفید قابل مشاهده هستند. نواحی سیاه نشان دهنده بافت چربی، نواحی خاکستری بافت متراکم سینه و لکه های سفید بیانگر توده های مشکوک یا رسوب موضعی کلسیم می باشند. به طور معمول بعد از ماموگرافی و در صورت وجود نواحی مشکوک، بافت سینه توسط سونوگرافی (Ultrasound) یا MRI (Magnetic Resonance Imaging) مورد بررسی بیشتر قرار می گیرد [۵].

ماموگرافی به دلیل استفاده از اشعه ایکس اگر چه رزولوشن بالایی را نتیجه می دهد اما به دلیل عبور از بافت های بدن و یونیزه



شکل ۱: سیستم تصویربرداری دانشگاه Dartmouth برای تشخیص سرطان سینه [۱۱].

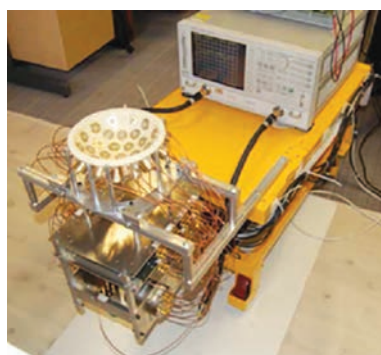


شکل ۲: محفظه قرارگیری سینه و آرایه ۱۶ عنصری از آنتن‌های تک قطبی اطراف آن [۱۱].

بالینی مطابقت داشت [۱۲]. نتایج حاصل از سیستم معرفی شده توسط دانشگاه Dartmouth نشان از توانایی تصویربرداری مایکروویو در تشخیص و مشخصه‌یابی تومورهای سرطانی دارد که می‌تواند به عنوان روشی ساده، ارزان و بدون آسیب برای بیمار موثر واقع شود.

۲-۲- گروه پژوهشی دانشگاه Bristol انگلستان

دانشگاه بریستول در سال ۲۰۱۱ سیستم MARIA-M4 را که مبتنی بر الگوریتم‌های راداری کار می‌کند؛ تحت سرپرستی دکتر Ian Craddock معرفی نمود [۱۴]. نسل قبلی این سیستم MARIA-M3 (شکل ۳) نام داشت که از یک آرایه ۳۱ عنصری از آنتن‌های شکافی (Slot Antennas) در محدوده فرکانسی ۳ تا ۱۰ گیگاهرتز استفاده می‌نمود [۱۵]. در سیستم MARIA-M3 از یک کاسه سرامیکی (Coupling Shell) با ضریب گذردگی ۱۰ و یک مایع با ضریب گذردگی مشابه برای تطبیق بین بافت سینه و آنتن‌ها استفاده می‌شد. مدت زمان حدود ۸۰ ثانیه برای ۴۶۰ اندازه‌گیری روی یک بافت سینه توسط این سیستم به ثبت رسیده است. سیستم نسل سوم دانشگاه Bristol، بر روی فانتوم فیزیکی [۱۶] و



شکل ۳: سیستم تصویربرداری دانشگاه Bristol موسوم به MARIA-M3 برای تشخیص سرطان سینه [۱۵].

که دستگاه‌های مبتنی بر تصویربرداری مایکروویو دارای ابعادی کوچک‌تر، قابل حمل، کم هزینه و استفاده آسان (حتی برای افراد غیر متخصص) هستند. از این‌رو می‌توان از این دستگاه‌ها در آمبولانس‌ها استفاده کرد تا علاوه بر تشخیص زود هنگام عارضه، تا رسیدن بیمار به مرکز درمانی، اقدام‌های درمانی اولیه بر روی وی انجام گیرد. این دستگاه‌ها بیشتر در باند فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ گیگاهرتز کار می‌کنند که امواج الکترومغناطیسی در این محدوده عمق نفوذ، تضعیف و رزولوشن مطلوبی برای کاربرد مذکور دارند [۶].

هدف از این گزارش بررسی مختصر دستاوردهای گروه‌های دانشگاهی و شرکت‌های تجاری فعال در حوزه تصویربرداری پزشکی مایکروویو برای تشخیص سرطان سینه و سگته مغزی می‌باشد. بدین منظور در بخش ۲ و ۳ به ترتیب به معرفی فعالیت‌های برخی از گروه‌های دانشگاهی مطرح و شرکت‌های تجاری فعال خواهیم پرداخت و در نهایت در بخش ۴ این گزارش را جمع‌بندی خواهیم نمود.

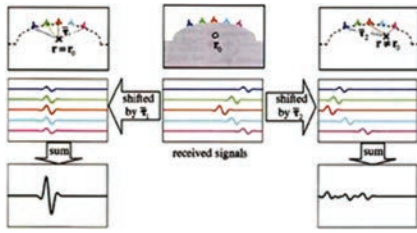
۲- گروه‌های پژوهشی دانشگاهی فعال در زمینه تصویربرداری پزشکی مایکروویو

در این قسمت به بررسی فعالیت‌های ۹ گروه پژوهشی دانشگاهی شاخص در زمینه تصویربرداری پزشکی مایکروویو خواهیم پرداخت که در این میان هفت گروه در زمینه تشخیص سرطان سینه و دو گروه در زمینه تشخیص عارضه‌های مغزی فعالیت می‌کنند.

۲-۱- گروه پژوهشی کالج Dartmouth ایالات متحده آمریکا

نخستین سیستم آزمایشگاهی برای تشخیص سرطان سینه (شکل ۱) در سال ۲۰۰۰ میلادی مبتنی بر توموگرافی مایکروویو (Microwave Tomography) توسط کالج Dartmouth تحت نظر دکتر M. Paul Meaney معرفی گردید [۱۱]. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که بیمار به روی شکم خود دراز کشیده و بافت سینه داخل محفظه (Tank) در نظر گرفته شده قرار می‌گیرد. در این حالت امکان تصویربرداری از بافت سینه از جهات مختلف امکان‌پذیرتر است. در محفظه قرارگیری بافت سینه مایعی که دارای گذردگی نزدیک به بافت سینه است تزریق می‌شود تا تطبیق بهتری بین آنتن‌ها و بافت برقرار شود. این سیستم از آرایه ثابت ۱۶ عنصری از آنتن‌های تک قطبی (Monopole)، مطابق شکل (۲)، در محدوده فرکانسی ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز استفاده می‌کند. منظور از ثابت بودن آرایه این است که ساختار آنتن‌ها چرخانده نمی‌شود اما موقعیت آنتن فرستنده و گیرنده در هر اسکن ممکن است تغییر کند تا دید کاملتری از بافت سینه حاصل شود. متوسط زمان یک اسکن کامل از بیماران نیز ۵ دقیقه گزارش شده است [۱۱، ۱۲].

این سیستم در مجموع بر روی ۱۵۰ بیمار مبتلا به سرطان سینه آزمایش شد که طبق آخرین گزارش منتشر شده در سال ۲۰۱۳، ۸ بیمار که در حال درمان از طریق شیمی درمانی (Chemotherapy) بودند؛ توسط این سیستم مورد مطالعات بالینی قرار گرفتند [۱۳]. برای مثال نتایج حاصل برای دو بیمار در ادامه بیان می‌گردد. در فرد اول که از وجود تومور (Tumor) در سینه سمت راست خود رنج می‌برد؛ در روز ۴۴ دوره درمان تصویربرداری صورت گرفت. تصاویر بازسازی شده کاهش حجم تومور را نشان می‌داد که با مشاهدات جراحان مطابقت داشت. در فرد دوم تصاویر روز ۵۲ دوره درمان حاکی از افزایش حجم تومور بود که در این حالت نیز با مشاهدات



شکل ۵: الگوریتم تاخیر و جمع [۳]

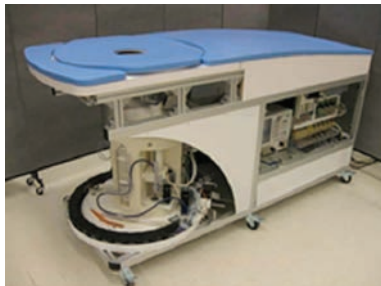
گردند که زمان رفت و برگشت موج کمینه گردد. همان‌طور که از رابطه (۱) پیداست در صورتی که مش مورد نظر محل هدف باشد؛ به دلیل جمع همدوس سیگنال‌ها حاصل مقداری بزرگ و در غیر این صورت مقداری کوچک خواهد بود. شکل (۵) به خوبی نحوه عملکرد الگوریتم DAS را نمایش می‌دهد [۳، ۱۹]. سیستم تصویربرداری نسل پنجم و ششم با همکاری شرکت Micrima [۲۰] طراحی و پیاده‌سازی شده است که در زیربخش ۳-۱- معرفی می‌گردد.

۳-۲- گروه پژوهشی دانشگاه Calgary کانادا

سیستم تصویربرداری میکروویو نسل اول دانشگاه Calgary کانادا (شکل ۶) موسوم به TSAR (Tissue Sensing Adaptive Radar) تحت سرپرستی دکتر Elise C. Fear در سال ۲۰۱۲ معرفی شد. این سیستم تک‌پایه (Monostatic) که مبتنی بر الگوریتم‌های راداری به بازسازی تصاویر می‌پردازد از یک آنتن ویوالدی (Vivaldi Antenna) در محدوده فرکانسی ۵۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز استفاده می‌کند [۲۱]. ساختار ستاپ اندازه‌گیری به گونه‌ای است که آنتن می‌تواند حول محفظه قرارگیری سینه چرخیده و توسط بازوی مکانیکی به صورت عمودی جابه‌جا شود. در نتیجه می‌توان گفت امکان اسکن استوانه‌ای شکل بافت سینه برقرار است. در این سیستم بین بافت سینه و محفظه تصویربرداری، از روغن کانولا جهت تطبیق استفاده می‌گردد [۲۱]. در این سیستم یک اسکن کامل بافت سینه شامل ۲۰۰ موقعیت اندازه‌گیری توسط آنتن در حدود ۳۰ دقیقه می‌شود که هر اندازه‌گیری به کمک یک VNA با ۱۶۰۱ نمونه فرکانسی و در محدوده فرکانسی یاد شده انجام



شکل ۶: سیستم نسل نخست تصویربرداری دانشگاه Calgary [۲۱]



شکل ۷: سیستم نسل دوم تصویربرداری دانشگاه Calgary [۲۳]



شکل ۴: سیستم تصویربرداری دانشگاه Bristol موسوم به MARIA-M4 برای تشخیص سرطان سینه [۱۸]

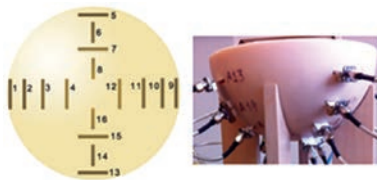
توسط آزمایشات کلینیکی [۱۷] تست شده است. شکل (۴) سیستم نسل چهارم این دانشگاه موسوم به MARIA-M4 را نشان می‌دهد که نسبت به سیستم نسل سوم، سعی شده است در ساختاری پذیرفته شده‌تر برای کار کلینیکی طراحی گردد. علاوه بر این در سیستم MARIA-M4 از آرایه ۶۰ عنصری از آنتن‌های شکافی در محدوده فرکانسی ۳ تا ۸ گیگاهرتز استفاده شده است که امکان ۱۷۷۰ اندازه‌گیری را در ۱۰ ثانیه فراهم می‌کند. در این سیستم نیز از کاسه سرامیکی با ضریب گذردهی ۱۰ و مایع با ضریب گذردهی مشابه به منظور تطبیق بین آنتن‌ها و بافت سینه بهره گرفته شده است. علاوه بر این امکان اضافه یا کم کردن کاسه‌های سرامیکی به محفظه جهت تطبیق بهتر بافت با آنتن‌ها فراهم شده است. کاهش زمان اسکن در سیستم نسل چهارم، اطمینان از جابه‌جا نشدن بافت سینه در فرایند تصویربرداری و امکان تکرارپذیری اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. این سیستم جهت تست کلینیکی بر روی ۸۵ بیمار مورد استفاده قرار گرفت که نتایج امیدبخشی را ثبت نمود [۱۸]. لازم به ذکر است که در سیستم‌های معرفی شده از سوی دانشگاه Bristol، از الگوریتم تاخیر و جمع (Delay-and-Sum) [۱۹] برای بازسازی تصاویر استفاده می‌شود. در واقع از این الگوریتم به عنوان الگوریتم پایه در بیشتر سیستم‌های راداری تصویربرداری میکروویو برای بازسازی تصاویر بهره‌گیری می‌شود. الگوریتم DAS مانند سایر الگوریتم‌های راداری مبتنی بر استخراج تاخیر زمانی سیگنال رفت و برگشت می‌باشد. رابطه (۱) نحوه محاسبه شدت (برای مثال برای کاربرد تشخیص سرطان سینه) برای هر مش تصویر دو بعدی به مختصات (x_p, y_q) را نشان می‌دهد:

$$I(x_p, y_q) = \sum_{n=1}^N \gamma(\varphi_n, \tau_n(r_{p,q})) \quad (1)$$

در رابطه فوق γ ، شکل حوزه زمان ماتریس پراکندگی در مکان Π ام و τ_n تاخیر متناظر با مش (q, p) می‌باشد که از رابطه (۲) مبتنی بر اصل فرما محاسبه می‌گردد.

$$\tau_n(r_{p,q}) = 2 \times \min \left\{ \frac{\|a_n - \xi_1\| \sqrt{\epsilon_{ext}}}{c_0} + \frac{\|\xi_1 - \xi_2\| \sqrt{\epsilon_{skin}}}{c_0} + \frac{\|\xi_2 - r_{p,q}\| \sqrt{\epsilon_{breast}}}{c_0} \right\} \quad (2)$$

در رابطه (۲) a_n بردار شامل مسیر حرکت مرکز فاز آنتن، $r_{p,q}$ بردار شامل مکان مش‌های صفحه دو بعدی، C_0 سرعت نور در فضای آزاد و ϵ_{ext} ، ϵ_{skin} ، ϵ_{breast} به ترتیب ضریب گذردهی مایع تطبیق، ضریب گذردهی پوست و ضریب گذردهی بافت سینه هستند. همچنین مقادیر k_1^2 ، k_2^2 روی مرز هستند که باید به گونه‌ای انتخاب



شکل ۹: ساختار قرارگیری آرایه آنتن‌ها در سیستم MU [۲۶].



شکل ۱۰: سیستم نسل دوم تصویربرداری دانشگاه McGill. (الف) نحوه قرارگیری آنتن‌های مایکرواستریپ و (ب) نحوه استفاده و تصویربرداری از بیمار [۳۰].



شکل ۱۱: سیستم تصویربرداری دانشگاه Shizuoka برای تشخیص سرطان سینه [۳۱].
سال ۲۰۲۰ با تغییراتی در ساختار اندازه‌گیری بهبود داده شد [۳۰]. شکل (۱۰) سیستم نسل دوم دانشگاه McGill را نشان می‌دهد که از آرایه ۱۶ عنصری آنتن مایکرواستریپ (Microstrip Antenna) قابل انعطاف استفاده می‌کند [۳۰].

۲-۵- گروه پژوهشی دانشگاه Shizuoka ژاپن

دانشگاه Shizuoka ژاپن در سال ۲۰۱۳ سیستم راداری تصویربرداری مایکروویو چندپایه (شکل ۱۱) خود موسوم به SU را معرفی نمود. عناصر آرایه آنتن، stacked patch antenna در بازه فرکانسی ۴ تا ۹ گیگاهرتز می‌باشند که جهت تطبیق بهتر با بافت سینه سه سایز کاسه تطبیق مختلف طراحی شده‌اند. ضریب گذردهی کاسه نزدیک به ضریب گذردهی چربی می‌باشد. در این سیستم نیازی به مایع تطبیق نیست زیرا هوای بین بافت سینه و کاسه به‌طور کامل مکیده شده و بافت سینه به کاسه می‌چسبد. این سیستم بر روی ۲ نفر تست شده و نتایج آن در [۳۱] ذکر شده است.

۲-۶- گروه پژوهشی دانشگاه جنوبی علم و صنعت چین

در سال ۲۰۱۷ گروه پژوهشی Southern University of Science and Technology (SUST) چین تحت سرپرستی دکتر Qingfeng Zhang سیستم تصویربرداری نسل اول (شکل ۱۲) خود را موسوم به SUST معرفی نمود. در این سیستم چند دوپایه (Multi-Bistatic) از دو آنتن هورن (Horn Antenna) در محدوده فرکانسی ۴ تا ۵/۸ گیگاهرتز به‌عنوان فرستنده-گیرنده استفاده می‌شود که با گام ۱ درجه حول محفظه تصویربرداری بافت سینه چرخیده و به‌صورت عمودی نیز در ۴ صفحه موازی به فاصله ۲ سانتی‌متر از یکدیگر فرایند تصویربرداری را انجام می‌دهند. این گروه سیستم خود را بر روی ۱۱ بیمار آزمایش کرده و پیش‌بینی کرده است نتایج آزمایش بر روی ۱۰۰ بیمار را به زودی منتشر خواهد نمود [۳۲].

۲-۷- گروه پژوهشی دانشگاه Hiroshima ژاپن

دانشگاه Hiroshima سیستم تصویربرداری خود (شکل ۱۳) را موسوم به HU در سال ۲۰۱۷ معرفی نمود. این سیستم از یک آرایه ۱۶ عنصری آنتن شکافی مسطح (Planar Slot Antenna) مطابق شکل

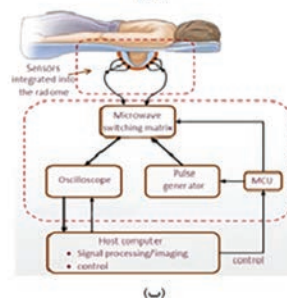
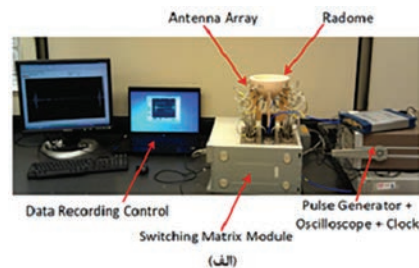
شده و تصاویر به وسیله الگوریتم DAS بازسازی می‌شوند [۲۱]. سیستم نسل اول TSAR بر روی ۸ بیمار مورد آزمایش قرار گرفته که متأسفانه در برخی از موارد، موفق عمل نکرده و افزایش حساسیت سیستم لازم دانسته شده است [۲۲].

نسل دوم سیستم TSAR (شکل ۷) با هدف اعطاء آزادی بیشتر به حرکت آنتن در سال ۲۰۱۳ طراحی شد. در این ساختار آنتن همواره در فاصله ثابتی نسبت به پوست قرار داشته و امکان اسکن استوانه‌ای، نیم کره و شبیه به شکل بافت سینه امکان پذیر است [۲۳]. این سیستم بر روی فانتوم فیزیکی تست شده [۲۴، ۲۵] اما نتایج تست کلینیکی بر روی بیماران هنوز گزارش نشده است.

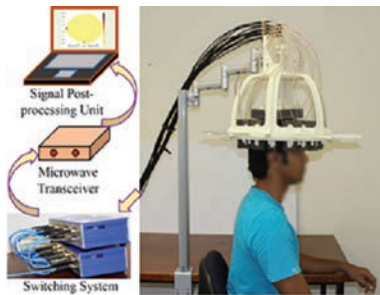
۲-۴- گروه پژوهشی دانشگاه McGill کانادا

دانشگاه McGill در سال ۲۰۱۳ تحت سرپرستی دکتر Milica Popović سیستم راداری تصویربرداری مایکروویو نسل اول خود موسوم به MU (شکل ۸) را معرفی نمود [۲۶]. این سیستم از اندازه‌گیری در حوزه زمان بهره می‌برد که از مزایای آن می‌توان به کاهش سرعت پردازش، افزایش سرعت اسکن و کاهش هزینه اشاره نمود. اما لازم به ذکر است سیستم حوزه فرکانس سیگنال به نویز بالاتری داشته و علاوه بر آن فقط با یک دستگاه VNA (Vec-tor Network Analyzer) اندازه‌گیری انجام می‌شود که می‌تواند به سادگی سیستم کمک کند [۲۶]. در سیستم نسل اول از آرایه ثابت ۱۶ عنصری از آنتن‌های شکافی در محدوده فرکانسی ۲ تا ۴ گیگاهرتز استفاده می‌شود. در این آرایه به‌منظور بیشینه دریافتی میدان‌های پراکندگی از قطبش‌های متعامد بهره گرفته می‌شود. یک اسکن کامل این سیستم شامل ۲۴۰ اندازه‌گیری در حدود ۵ دقیقه می‌شود. در این سیستم به‌عنوان مایع تطبیق بین آنتن‌ها و بافت سینه از ژل سونوگرافی استفاده شده است که علاوه بر اینکه به‌طور گسترده در دسترس می‌باشد؛ برای پوست نیز حساسیتی ایجاد نمی‌کند [۱۲، ۲۷، ۲۸]. نتایج حاصل از تست این سیستم بر روی فانتوم فیزیکی [۲۶] و آزمایشات بالینی [۲۷، ۲۸] امیدوار کننده گزارش شده است.

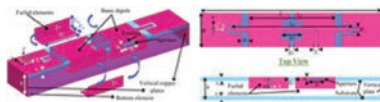
سیستم نسل دوم این دانشگاه با هدف تغییر در ساختار اندازه‌گیری به‌صورت پوشیدنی (Wearable) در سال ۲۰۱۶ معرفی [۲۹] و در



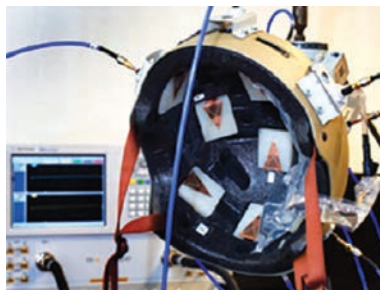
شکل ۸: سیستم تصویربرداری دانشگاه McGill. (الف) سیستم آزمایشگاهی و (ب) نمودار عملکردی سیستم تصویربرداری و پردازش‌های بعد از آن جهت بازسازی تصویر [۲۶].



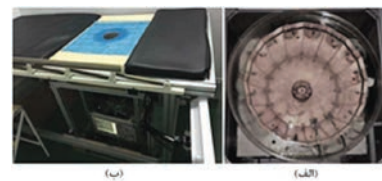
شکل ۱۵: سیستم تصویربرداری دانشگاه Queensland برای خونریزی داخل جمجمه [۳۴].



شکل ۱۶: ساختار آنتن‌های طراحی شده در سیستم Queensland [۳۴].



شکل ۱۷: سیستم تصویربرداری نسل اول دانشگاه Chalmers برای تشخیص عوارض مغزی [۳۸].



شکل ۱۲: سیستم نسل نخست تصویربرداری دانشگاه SUST برای تشخیص سرطان سینه [۳۲].



شکل ۱۳: سیستم تصویربرداری دانشگاه Hiroshima برای تشخیص سرطان سینه [۳۳].



شکل ۱۴: ساختار قرارگیری آرایه آنتن‌ها در سیستم HU [۳۶].

گروه‌های پیشرو در زمینه طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های تصویربرداری توموگرافی مایکروویو با هدف تشخیص عارضه‌های مغزی به شمار می‌روند. تحقیقات دانشگاهی این گروه از سال ۲۰۰۰ در زمینه تصویربرداری مایکروویو آغاز شد که طراحی اولیه سیستم نسل اول و شبیه‌سازی ساختار آنتن‌ها در سال ۲۰۰۸ ارائه [۳۷] و ساختار تکمیل شده و بهبود یافته سیستم آزمایشگاهی نسل اول (شکل ۱۷) در سال ۲۰۱۴ معرفی گردید [۳۸].

بسته پلاستیکی که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود جهت تطبیق فیزیکی و الکترومغناطیسی سر بیمار با ساختار به کار می‌رود که بدین منظور با آب پر می‌شود. استفاده از پلاستیک به تطبیق الکترومغناطیسی بهتر بین آنتن‌ها و سر نیز کمک می‌کند. این سیستم از یک آرایه ثابت ۱۰ عنصری از Patch Antenna بهره می‌برد [۳۸].

جهت مطالعات بالینی، سیستم نسل اول در مجموع بر روی ۴۰ بیمار که در سه دسته تقسیم‌بندی می‌شدند؛ انجام شد. ۲۰ نفر که سکتة حاد (Acute Stroke) داشتند (مطالعه بر روی این افراد در بازه زمانی ۷ تا ۱۳۲ ساعت پس از بروز سکتة انجام شده است که این زمان را در اصطلاح دوره زمانی آگاهی از سلامت فرد پس از وقوع سکتة می‌نامند)، ۹ نفر که مبتلا به خونریزی داخلی در جمجمه (Intracerebral Hemorrhage) بودند و ۱۱ نفر که مبتلا به Ischemic Stroke بودند (این حالت از سکتة مغزی زمانی رخ می‌دهد که یکی از رگ‌های خونی مغز به واسطه لخته خونی یا ذرات دیگر مسدود شده باشد). در این مطالعه محدوده فرکانسی ۸۸۵ تا ۱۶۷۰ مگاهرتز گزارش شده است. نتایج حاصل از این مطالعه بالینی نشان از حساسیت و تشخیص ۸۸ درصد از موارد بیماری می‌دهد [۳۸].

(۱۴) در محدوده فرکانسی ۳/۱ تا ۱۰/۶ گیگاهرتز استفاده می‌کند. مزیت سیستم HU فشردگی (Compactness) آن است که پردازش نیز توسط FPGA انجام می‌گیرد [۳۳]. مطالعات بالینی این دستگاه بر روی ۵ بیمار انجام شده است. برای مثال در مورد یک بیمار تصویر بازسازی شده از سیستم HU مطابق با تصویر MRI بوده است و هر دو یک محل را برای تومور نشان می‌دادند. در سایر بیماران نیز نتایج با سابقه پزشکی آن‌ها مطابقت مطلوبی داشته است [۳۳، ۱۲].

۲-۸- گروه پژوهشی دانشگاه Queensland استرالیا

گروه پژوهشی تصویربرداری مایکروویو دانشگاه Queensland تحت سرپرستی دکتر Amin Abbosh در سال ۲۰۱۶ یکی از کامل‌ترین سیستم‌های تصویربرداری مایکروویو خود (شکل ۱۵) را معرفی نمود. این سیستم قابل حمل بوده و به منظور تشخیص خونریزی داخل جمجمه به کار می‌رود [۳۴]. ساختار تصویربرداری از یک آرایه ثابت ۱۶ عنصری از Slot-Loaded Folded Dipole Structure (شکل ۱۶) در محدوده فرکانسی ۱ تا ۲/۴ گیگاهرتز بهره می‌برد.

سیستم دانشگاه Queensland هم بر روی فانتوم فیزیکی [۳۶] و هم به واسطه مطالعات بالینی [۳۴] مورد بررسی قرار گرفته که در هر دو مورد نتایج مطلوبی را ثبت نموده است. واحد پردازش این سیستم از الگوریتم DAS برای بازسازی تصاویر بهره می‌گیرد [۳۴]. لازم به ذکر است در مقایسه با سایر سیستم‌های تصویربرداری، این سیستم از ماده تطبیق بین آنتن و بافت استفاده ننموده است [۶].

۲-۹- گروه پژوهشی دانشگاه Chalmers سوئد

گروه تصویربرداری مایکروویو دانشگاه Chalmers سوئد تحت سرپرستی دکتر Mikael Persson و دکتر Andreas Fhager از جمله

جدول ۱: بررسی سیستم‌های آکادمیک تصویربرداری مایکروویو معرفی شده برای تشخیص سرطان سینه.

HU	SU	SUST	TSAR	MU	MARIA	Dartmouth	
5	2	11	8	13	223	150	تعداد مطالعات بالینی
14 min	3 min	4 min	30 min	5 min	10 s	5 min	زمان تصویربرداری
Planar slot	Stacked Patch	Horn	Vivaldi	Microstrip	Slot	Monopole	نوع آنتن
Multistatic	Multistatic	Multistatic	Monostatic	Multistatic	Multistatic	Multistatic	نحوه داده‌برداری
DAS	DAS	DAS	DAS	DAS	DAS	Tomography	الگوریتم تصویرسازی

۳-۱- شرکت Micrima

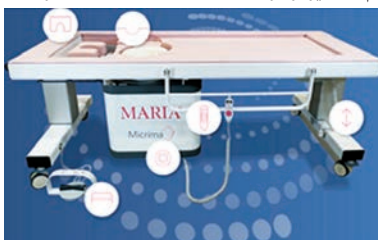
شرکت Micrima [۲۰] با هدف شناسایی مین‌های زیرزمینی شروع به کار کرده و در سال ۲۰۰۶ به طراحی و پیاده‌سازی سیستم تصویربرداری مایکروویو برای تشخیص سرطان سینه روی آورد. فناوری این شرکت مبتنی بر مطالعات گروه تصویربرداری مایکروویو دانشگاه Bristol می‌باشد. شرکت Micrima نسل پنجم و ششم سیستم MARIA را پیاده‌سازی و معرفی نمود.

سیستم نسل پنجم MARIA-M5 (شکل ۱۸)، فقط ویرایش بهبود یافته نسل چهارم بوده است که از جمله ویژگی‌های آن می‌توان به ساختار قابل پذیرش‌تر جهت استفاده کلینیکی اشاره نمود. در حالی که شرکت Micrima در سیستم MARIA-M6 (شکل ۱۹) علاوه بر بهبود ساختار فیزیکی سیستم و اضافه نمودن قابلیت‌های بیشتر، از فناوری هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) در تشخیص و تصویرسازی از بافت سینه بهره می‌برد [۲۰، ۴۰]. نکته جالب توجه در اسناد و سایت شرکت Micrima معرفی سیستم MARIA به‌عنوان کمک کننده فرایند ماموگرافی در «تشخیص صحیح» سرطان سینه می‌باشد [۴۰].

ساختار تصویربرداری MARIA-M6 از یک آرایه ۶۰ عنصری از آنتن‌ها بهره می‌برد. در فناوری MARIA-M6 یک اسکن کامل برای به دست آوردن تصویر سه بعدی از بافت سینه، به‌صورت تجمیع سه اسکن منحصر به فرد با چرخش آنتن‌ها تعریف می‌شود. مدت زمان چرخش ساختار آنتن‌ها برای آماده‌سازی اسکن بعدی ۲۲ ثانیه می‌باشد. در هر اسکن مشخص ۵۹۰ داده اندازه‌گیری توسط آنتن‌ها به ثبت می‌رسد. درواقع در هر اسکن،



شکل ۱۸: سیستم تصویربرداری MARIA-M5 محصول شرکت Micrima [۲۰].



شکل ۱۹: سیستم تصویربرداری MARIA-M6 محصول شرکت Micrima [۴۰].

نسل دوم و سوم سیستم دانشگاه Chalmers با همکاری شرکت Medfield Diagnostics AB [۳۹] طراحی و پیاده‌سازی شد که در زیربخش ۳-۳ معرفی و ارائه می‌گردد.

۳-۲- مقایسه سیستم‌های دانشگاهی

در این زیربخش به‌طور کوتاه به بررسی سیستم‌های دانشگاهی ارائه شده در زیربخش‌های قبل از نظر ویژگی‌هایی مشخص خواهیم پرداخت. جدول (۱) و (۲) بیانگر مروری کلی بر سیستم‌های تصویربرداری مایکروویو برای تشخیص به ترتیب سرطان سینه و عارضه‌های مغزی می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنوع به‌کارگیری نوع آنتن از جمله تفاوت‌های سیستم‌های معرفی شده می‌باشد در حالی که بیشتر این سیستم‌ها به‌منظور تصویرسازی از الگوریتم راداری تاخیر و جمع استفاده می‌کنند تا محل توده سرطانی (در کاربرد تشخیص سرطان سینه) یا محل وقوع سگته (در کاربرد تشخیص سگته مغزی) مشخص گردد. لازم به ذکر است در سیستم‌هایی که مبتنی بر توموگرافی مایکروویو به تصویرسازی می‌پردازند؛ اگر چه زمان تصویرسازی طولانی‌تر است اما علاوه بر محل هدف، پروفایل ضریب دی‌الکتریک بافت را نیز مشخص می‌کند که از این‌رو در کاربردهایی نظیر تشخیص سگته مغزی، نوع سگته نیز به راحتی قابل تشخیص است که امری مهم در فرایند درمان بیمار می‌باشد.

جدول ۲: بررسی سیستم‌های آکادمیک تصویربرداری مایکروویو معرفی شده برای تشخیص عارضه‌های مغزی.

Chalmers	Queensland	
40	-	تعداد مطالعات بالینی
10 s	2 s	زمان تصویربرداری
Patch	Folded slot	نوع آنتن
Multistatic	Multi-monostatic	نحوه داده‌برداری
Tomography	DAS	الگوریتم تصویرسازی

۳-۳- شرکت‌های تجاری فعال در زمینه تصویربرداری پزشکی مایکروویو

پس از آشنایی با گروه‌های پژوهشی شاخص تصویربرداری مایکروویو در دنیا، در این قسمت به بررسی فعالیت‌های پنج شرکت تجاری شاخص در زمینه تصویربرداری پزشکی مایکروویو خواهیم پرداخت که در این میان یک شرکت در زمینه تشخیص سرطان سینه، سه شرکت در زمینه تشخیص عارضه‌های مغزی و یک شرکت در هر دو زمینه فعالیت می‌کند.



شکل ۲۰: سیستم تصویربرداری MammoWave محصول شرکت UBT [۴۲].



شکل ۲۱: سیستم تصویربرداری BrainWave محصول شرکت UBT [۴۴].

از تحقیقات گروه تصویربرداری میکروویو دانشگاه Chalmers تحت سرپرستی دکتر Andreas Fhager می‌باشد. در واقع در سال ۲۰۰۵ نیز تاسیس این شرکت نتیجه کار پژوهشی دکتر Andreas Fhager در دوره دکتری تحت سرپرستی دکتر Persson Mikael در دانشگاه Chalmers بود [۳۹].

همان‌طور که در زیر بخش ۹-۲ اشاره شد؛ نسل دوم و سوم سیستم تصویربرداری میکروویو دانشگاه Chalmers با هدف تشخیص عارضه‌های مغزی توسط شرکت Medfield طراحی و توسعه داده شد. نسل دوم این سیستم تحت عنوان Strokefinder R10 فرق چندانی با نسل اول ندارد و فقط در ساختار به نسبت قابل قبولی طراحی گردید تا در مطالعات بالینی مورد استفاده قرار بگیرد. شکل (۲۲) سیستم Strokefinder R10 را در حین مطالعات بالینی نشان می‌دهد [۶].

سیستم نسل سوم با عنوان Strokefinder MD100 به عنوان نخستین سیستم تصویربرداری میکروویو قابل حمل توسط شرکت Medfield معرفی گردید. این سیستم که در شکل (۳۲) قابل مشاهده است از یک آرایه ثابت ۸ عنصری از آنتن‌ها بهره می‌برد. قابلیت این سیستم به گونه‌ای است که با توجه به آناتومی (Anatomy) سر بیمار قابل تنظیم است تا تطبیق مناسبی بین سر و آرایه آنتن‌ها رخ دهد. این سیستم فارغ از اینکه قابلیت استفاده با باتری را داشته و فقط ۶ کیلوگرم وزن دارد؛ به دلیل ابعاد کوچک به راحتی قابل نصب در آمبولانس می‌باشد. زمان یک اندازه‌گیری کامل توسط این سیستم حدود ۳ دقیقه است و نکته جالب توجه این است که در زمان فوق، زمان آماده‌سازی بیمار و تنظیم ساختار آنتن‌ها نیز در نظر گرفته شده است. این زمان

ی‌ک آنتن فرستنده و مابقی گیرنده هستند (ساختار Multistatic) و این روند برای ۹ آنتن دیگر در همان اسکن تکرار می‌شود تا در مجموع در یک اسکن ۵۹۰ داده اندازه‌گیری به‌دست آید. در نتیجه، پس از تکمیل سه اسکن ۱۷۷۰ داده اندازه‌گیری در دسترس خواهد بود که به خوبی نمای سه بعدی از بافت سینه را نتیجه می‌دهد. تمامی اندازه‌گیری‌ها در ۱۰۱ نمونه فرکانسی در محدود ۳ تا ۸ گیگاهرتز (گام فرکانسی ۵۰ مگاهرتز) انجام می‌گیرد [۴۰].

سیستم MARIA-M6 تاکنون جهت مطالعات بالینی بر روی بیش از ۵۰۰ بیمار مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج مطلوب و امیدبخشی را به ثبت رسانده است [۴۰، ۲۰].

۳-۲- شرکت UBT

شرکت Umbria Bioengineering Technologies (UBT) در سال ۲۰۱۵ به‌عنوان استارت‌آپ (Startup) وابسته به دانشگاه Perugia ایتالیا شروع به فعالیت کرد. شرکت UBT از جمله شرکت‌های پیشرو در زمینه طراحی و ساخت سیستم‌های تصویربرداری پزشکی مبتنی بر فناوری میکروویو می‌باشد. تا به امروز UBT دو محصول تصویربرداری از جمله MammoWave برای تشخیص سرطان سینه و BrainWave برای تشخیص سکته مغزی را معرفی نموده است [۴۱].

سیستم MammoWave (شکل ۲۰) جهت تصویربرداری میکروویو از بافت سینه و تشخیص سرطان سینه، بدون استفاده از محیط تطبیق، از ساختار چند دوپایه (Multi-Bistatic) آنتن‌ها در محدوده فرکانسی ۱ تا ۹ گیگاهرتز با گام فرکانسی ۵ مگاهرتز استفاده می‌کند. این ساختار جهت تصویربرداری تمام دید از بافت سینه در زوایای صفر، ۷۲، ۱۴۴، ۲۱۶ و ۲۸۸ درجه در اطراف آن توسط یک ساختار مکانیکی می‌چرخد. سیستم MammoWave جهت بازسازی تصویر از اصل هایگنس (Huygens Principle) بهره می‌برد [۴۱]. از جمله ویژگی‌های مثبت این سیستم می‌توان به دقت، سادگی در استفاده، در دسترس بودن، راحتی و خطر نداشتن برای بیمار به دلیل استفاده نکردن از تصویربرداری با اشعه ایکس اشاره نمود. مطالعات بالینی سیستم MammoWave در بیمارستان‌های Pe- rugia و Foligno در سال ۲۰۲۰ به اتمام رسیده و در سال ۲۰۲۱ در [۴۲] منتشر شده است. سیستم MammoWave از هوش مصنوعی نیز بهره می‌برد که در [۴۳] به موضوع تشخیص سرطان سینه داده‌های آزمایشگاهی موجود با هوش مصنوعی پرداخته شده است. سیستم BrainWave (شکل ۲۱) از ساختار چنددوپایه آنتن‌ها، مشابه سیستم MammoWave، در محدوده فرکانسی ۱ تا ۵ گیگاهرتز استفاده می‌کند. در این سیستم تصویربرداری در زوایای صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه انجام می‌گیرد و مشابه سیستم MammoWave از اصل هایگنس برای بازسازی تصویر استفاده می‌شود [۴۴]. سیستم BrainWave بر روی فانتوم فیزیکی تست شده و نتایج آن در [۴۵] منتشر شده است. مطالعات بالینی این سیستم در سال ۲۰۲۱ در بیمارستان مربوط به دانشگاه Pisa ایتالیا شروع شده و هنوز در حال انجام است [۴۶]. محققان UBT اقدام به طراحی دیگری برای سیستم BrainWave با توجه به هدف تشخیص سریع سکته مغزی نمودند که قابل نصب در آمبولانس می‌باشد [۴۱].

۳-۳- شرکت Medfield Diagnostics AB

شرکت Medfield Diagnostics AB در سال ۲۰۰۵ توسط دکتر Mikael Persson و دکتر Andreas Fhager وابسته به دانشگاه Chalmers سوئد تاسیس شد. مبنای فناوری این شرکت برگرفته

مایکروویو برای تشخیص عارضه‌های مغزی تاسیس شد. در شکل (۲۴) آخرین نسخه سیستم تصویربرداری مایکروویو شرکت EM-Tensor تحت عنوان BrainScanner قابل مشاهده است. ساختار این سیستم به گونه‌ای است که هم به صورت کلینیکی و هم در آمبولانس قابل استفاده می‌باشد. شکل (۲۵) نحوه استفاده از این سیستم در آمبولانس را نشان می‌دهد. از جمله ویژگی‌های این سیستم می‌توان به ساختار کوچک، قابل حمل، راحتی، عدم خطر برای بیمار و سرعت در تشخیص اشاره نمود [۴۸].

۳-۵- شرکت EMVision

شرکت EMVision وابسته به دانشگاه Queensland استرالیا با هدف طراحی و ساخت سیستم‌های تصویربرداری مایکروویو برای تشخیص عارضه‌های مغزی پایه‌گذاری شد [۴۹]. EMVision از جمله شرکت‌های پیشرو در زمینه تصویربرداری مایکروویو می‌باشد که تا به امروز دو سیستم را معرفی و تجاری‌سازی نموده است. نسل اول سیستم این شرکت که قابلیت نصب و به کارگیری کلینیکی را دارد در شکل (۲۶) قابل مشاهده است. سیستم نسل دوم با هدف تشخیص سریع عارضه‌های مغزی در محل و انجام اقدامات لازم پیش از رسیدن به بیمارستان، در ساختاری قابل حمل و بسیار سبک طراحی و ساخته شده است که در شکل (۲۷) قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو سیستم قابل حمل بوده و قابلیت استفاده در آمبولانس را دارند اما سیستم نسل دوم به دلیل ساختار کوچک‌تر و سبک‌تر در سایر کاربردها و به خصوص در آمبولانس‌های هوایی مورد توجه می‌باشد [۴۹].



شکل ۲۶: سیستم تصویربرداری نسل اول شرکت EMVision [۴۹].



شکل ۲۷: سیستم تصویربرداری نسل دوم شرکت EMVision [۴۹].

۳-۶- مقایسه سیستم‌های تجاری

در این زیربخش به‌طور کوتاه به بررسی سیستم‌های تجاری



شکل ۲۲: سیستم Strokefinder R10 محصول شرکت Medfield [۶].



شکل ۲۳: سیستم Strokefinder MD100 محصول شرکت Medfield [۶].



شکل ۲۴: سیستم BrainScanner محصول شرکت EMTensor جهت استفاده کلینیکی [۴۸].



شکل ۲۵: سیستم BrainScanner محصول شرکت EMTensor جهت استفاده در آمبولانس [۴۸].

کوتاه در جای خود بسیار با اهمیت بوده و بدین سبب می‌توان جهت اقدامات درمانی بر روی بیمار در کمترین زمان پس از وقوع حادثه پیش‌قدم شد [۶, ۳۹].

مطالعات بالینی Strokefinder MD100 بر روی ۲۰ بیمار که دچار ضربه مغزی (Traumatic Brain Injury) شده بودند و ۲۰ نفر سالم که به لحاظ سن و جنسیت با گروه اول یکسان بودند؛ انجام شد و نتایج بسیار امیدوار کننده‌ای با حساسیت ۱۰۰ درصد ثبت گردید. نتایج مطالعات بالینی فوق در [۴۷] منتشر شده است [۶].

۳-۴- شرکت EMTensor

شرکت EMTensor در سال ۲۰۱۲ توسط دکتر Serguei Semenov در اتریش با هدف طراحی و ساخت سیستم‌های تصویربرداری

جدول ۳: بررسی سیستم‌های تجاری تصویربرداری مایکروویو معرفی شده.

EMVision	EMTensor	Medfield	UBT-MW	UBT-BW	Micrima	
سکته مغزی	سکته مغزی	سکته مغزی	سرطان سینه	سکته مغزی	سرطان سینه	هدف تشخیص
-	۴۰	۴۰	۱۰۳	-	۵۰۰	تعداد مطالعات بالینی
Patch	Printed Slot	Patch	Monopole	Patch	Slot	نوع آنتن
Multistatic	Multistatic	Maltistatic	Multi-Bistatic	Multi-Bistatic	Multistatic	نحوه داده‌برداری
DAS	Tomography	-	Tomography	Tomography	DAS	الگوریتم تصویرسازی
No	No	Yes	Yes	No	Yes	هوش مصنوعی

بودن، هزینه پایین و دردسترس بودن، می‌توان آن را به‌عنوان فناوری مکمل و کمک کننده در کنار هر یک از موارد فوق دانست.

۵- مراجع

- [1] M. Pastorino, Microwave imaging: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] E.C. Fear, X. Li, S. C. Hagness, and M. A. Stuchly, "Confocal microwave imaging for breast cancer detection: Localization of tumors in three dimensions", IEEE Transactions on biomedical engineering, vol, 49, pp. 812-822, 2002.
- [3] ع. نقیبی، «طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم تصویربرداری مایکروویو راداری برای تشخیص سرطان سینه و تحلیل عوامل موثر بر قدرت تفکیک و کیفیت تصویر»، دکتری، ۱۴۰۰.
- [4] Global Cancer Observatory. Available: <https://gco.iarc.fr>
- [5] ا. ج. راد، «تصویربرداری راداری مایکروویو برای تشخیص سرطان سینه» کارشناسی ارشد، ۱۳۹۸.
- [6] A. Fhager, S. Candefjord, M. Elam, and M. Persson, "Microwave diagnostics ahead: Saving time and the lives of trauma and stroke patients", IEEE Microwave Magazine, vol, 19, pp. 78-90, 2018.
- [7] V. L. Feigin, B. Norrving, and G. A. Mensah, "Global burden of stroke", Circulation research, vol, 120, pp. 439-448, 2017.
- [8] C. J. Murray, T. Vos, R. Lozano, M. Naghavi, A. D. Flaxman, C. Michaud, et al., "Disability-adjusted life years (DALYs) for 291 diseases and injuries in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010", The Lancet, vol. 380, pp. 2197-2223, 2012.
- [9] R. Lozano, M. Naghavi, K. Foreman, S. Lim, K. Shibuya, V. Aboyans, et al., "Global and regional mortality from 235 causes of death for 20 age groups in 1990 and 2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010", The Lancet, vol. 380, pp. 2095-2128, 2012.
- [10] K. Fassbender, C. Balucani, S. Walter, S. R. Levine, A. Haass, and J. Grotta, "Streamlining of prehospital stroke management: the golden hour", The Lancet Neurology, vol, 12, pp. 585-596, 2013.
- [11] P. M. Meaney, M. W. Fanning, D. Li, S. P. Poplack, and K. D. Paulsen, "A clinical prototype for active microwave imaging of the breast", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol, 48, pp. 1841-1853, 2000.
- [12] D. O'Loughlin, M. O'Halloran, B. M. Moloney, M. Glavin, E. Jones, and M. A. Elahi, "Microwave breast imaging: Clinical advances and remaining challenges", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol, 65, pp. 2580-2590, 2018.
- [13] P. M. Meaney, P. A. Kaufman, L. S. Muffly, M. Click, S. P. Poplack, W. A. Wells, et al., "Microwave imaging for neoadjuvant chemotherapy monitoring: Initial clinical experience", Breast Cancer Research, vol. 15, pp. 1-16, 2013.
- [14] T. Henriksson, M. Klemm, D. Gibbins, J. Leendertz, T. Horseman, A. Preece, et al., "Clinical trials of a multistatic UWB radar for breast imaging", in 2011 Loughborough Anten-

ارائه شده در زیربخش‌های قبل از نظر ویژگی‌هایی مشخص خواهیم پرداخت. جدول (۳) بیانگر مروری کلی بر سیستم‌های تصویربرداری مایکروویو برای تشخیص سرطان سینه و عارضه‌های مغزی می‌باشد. لازم به ذکر است در این بررسی آخرین نسخه معرفی شده ملاک قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سیستم‌های تجاری بیشتر از آنتن‌های Patch استفاده شده است تا ظاهری پوشیدنی داشته باشد و در کاربرد آزمایشات کلینیکی به راحتی مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین در سیستم‌های تشخیص سکته مغزی همان‌طور که مشهود است به جز سیستم EMVision، مابقی سیستم‌ها از توموگرافی (به‌منظور تصویرسازی) یا هوش مصنوعی (فقط به‌منظور تشخیص) در تشخیص نوع سکته مغزی بهره می‌برند از این رو می‌توان به اهمیت تشخیص نوع سکته در فرایند درمان بیمار پی برد. علاوه بر این برخورداری سیستم‌های تجاری از هوش مصنوعی را می‌توان راهبردی موثر در افزایش دقت و سرعت تشخیص این سیستم‌ها دانست.

۴- جمع‌بندی

در این گزارش با عنایت به تصویربرداری مایکروویو به‌عنوان فناوری نوظهور در تشخیص سرطان سینه و عارضه‌های مغزی به بررسی و معرفی گروه‌های پژوهشی شاخص و شرکت‌های تجاری فعال در این زمینه پرداختیم. بدین منظور در ابتدا اهمیت مساله تشخیص زودهنگام سرطان سینه، سکته مغزی و خونریزی داخلی جمجمه را برشمردیم و در ادامه به تفصیل، ۹ گروه پژوهشی شاخص در زمینه طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های تصویربرداری پزشکی مایکروویو برای تشخیص سرطان سینه و عارضه‌های مغزی را بررسی و معرفی نمودیم. بخش پایانی گزارش نیز به تحلیل و معرفی ۵ سیستم تجاری شاخص در این زمینه اختصاص پیدا کرد. نتایج مطالعات بالینی سیستم‌های یاد شده حاکی از حساسیت و قابلیت اطمینان بالای تصویربرداری مایکروویو در تشخیص توده‌های ناسالم، چه در بافت سینه و چه در سر، می‌باشد. علاوه بر این همان‌طور که به خوبی در سیر زمانی این گزارش پیداست؛ از نخستین سیستم تصویربرداری مایکروویو معرفی شده در سال ۲۰۰۰ میلادی توسط کالج Dartmouth تا نسل دوم سیستم EMVision، که می‌توان به عنوان جدیدترین و نوآورانه‌ترین سیستم از آن یاد کرد، تحول و نوآوری در افزایش دقت سیستم، کاربری مطلوب‌تر برای بیمار و افزایش سرعت در تشخیص بیماری بهبود پیدا کرده است و از طرفی می‌توان از آن‌ها به‌عنوان برجسته‌ترین فاکتورهای رقابتی در ارزیابی سیستم‌های آینده یاد کرد. تصویربرداری مایکروویو اگرچه در مقایسه با فناوری‌هایی چون CT، MRI، ماموگرافی و غیره قدرت تفکیک کمتری دارد؛ اما به‌دلیل سرعت در تشخیص، قابل حمل

- and H. Sakahara", Clinical test of microwave mammography", in 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013, (pp.2028-2029).
- [32] F. Yang, L. Sun, Z. Hu, H. Wang, D. Pan, R. Wu, et al., "A large-scale clinical trial of radar-based microwave breast imaging for Asian women: Phase I," in 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017, pp. 781-783.
- [33] H. Song, S. Sasada, T. Kadoya, M. Okada, K. Arihiro, X. Xiao, et al., "Detectability of breast tumor by a hand-held impulse-radar detector: performance evaluation and pilot clinical study," Scientific reports, vol. 7, pp. 1-11, 2017.
- [34] A. T. Mobashsher and A. Abbosh, "On-site rapid diagnosis of intracranial hematoma using portable multi-slice microwave imaging system," Scientific reports, vol. 6, pp.2016, 1-17.
- [35] A. T. Mobashsher and A. Abbosh, "Three-dimensional folded antenna with ultra-wideband performance, directional radiation and compact size," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 8, pp. 171-179, 2014.
- [36] A. T. Mobashsher, A. M. Abbosh, and Y. Wang, "Microwave system to detect traumatic brain injuries using compact unidirectional antenna and wideband transceiver with verification on realistic head phantom," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 62, pp.2014, 1826-1836.
- [37] H. Trefna and M. Persson, "Antenna array design for brain monitoring," in 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008, pp. 1-4.
- [38] M. Persson, A. Fhager, H. D. Trefna, Y. Yu, T. McKelvey, G. Pegenius, et al., "Microwave-based stroke diagnosis making global prehospital thrombolytic treatment possible," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 61, pp. 2806-2817, 2014.
- [39] Medfield Diagnostics AB Inc. Available :www.medfielddiagnostics.com
- [40] Brochure of 6th Generation MARIA. Available: www.micrima.com/_files/ugd/ad09a7_5d3af3947dfe47449124812f6e942aa0.pdf
- [41] UBT Inc. Available :www.ubt-tech.com
- [42] L. Sani, A. Vispa, R. Loretoni, M. Duranti, N. Ghavami, D. Alvarez Sánchez-Bayuela, et al., "Breast lesion detection through MammoWave device: Empirical detection capability assessment of microwave images' parameters," PLoS ONE, vol. 16(4), p. e0250005, 2021.
- [43] S. P. Rana, M. Dey, G. Tiberi, L. Sani, A. Vispa, G. Raspa, et al., "Machine learning approaches for automated lesion detection in microwave breast imaging clinical data," Scientific reports, vol. 9, pp. 1-12, 2019.
- [44] B. Sohani, J. Puttock, B. Khalesi, N. Ghavami, M. Ghavami, S. Dudley, et al., "Developing artefact removal algorithms to process data from a microwave imaging device for haemorrhagic stroke detection," Sensors, vol. 20, p. 5545, 2020.
- [45] B. Sohani, B. Khalesi, N. Ghavami, M. Ghavami, S. Dudley, A. Rahmani, et al., "Detection of haemorrhagic stroke in simulation and realistic 3-D human head phantom using microwave imaging," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 61, p. 102001, 2020.
- [46] A Feasibility Clinical Trial on BrainWave. Available: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT04622644>
- [47] J. Ljungqvist, S. Candefjord, M. Persson, L. Jönsson, T. Skoglund, and M. Elam, "Clinical evaluation of a microwave-based device for detection of traumatic intracranial hemorrhage," Journal of neurotrauma, vol. 34, pp.2017, 2176-2182.
- [48] EMTensor Inc. Available :www.emtensor.com
- [49] EMVision Inc. Available :emvision.com.au
- nas & Propagation Conference, 2011, pp. 1-4.
- [15] M. Klemm, J. A. Leendertz, D. Gibbins, I. J. Craddock, A. Preece, and R. Benjamin, "Microwave radar-based differential breast cancer imaging :Imaging in homogeneous breast phantoms and low contrast scenarios," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, pp.2010, 2337-2344.
- [16] M. Klemm, J. Leendertz, D. Gibbins, I. Craddock, A. Preece, and R. Benjamin, "Microwave radar-based breast cancer detection :Imaging in inhomogeneous breast phantoms," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 8, pp.1349-. 2009, 1352
- [17] M. Klemm, I. Craddock, J. Leendertz, A. Preece, D. Gibbins, M. Shere, et al., "Clinical trials of a UWB imaging radar for breast cancer," in Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, 2010, pp. 1-4.
- [18] A. W. Preece, I. Craddock, M. Shere, L. Jones, and H. L. Winton, "MARIA M4 :clinical evaluation of a prototype ultra-wideband radar scanner for breast cancer detection," Journal of Medical Imaging, vol. 3, p.2016, 033502.
- [19] X. Li, E. J. Bond, B. D. Van Veen, and S. C. Hagness, "An overview of ultra-wideband microwave imaging via space-time beamforming for early-stage breast-cancer detection," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 47, pp.2005, 19-34.
- [20] Micrima Inc. Available :www.micrima.com
- [21] J. Bourqui, J. M. Sill, and E. C. Fear, "A prototype system for measuring microwave frequency reflections from the breast," International journal of biomedical imaging, vol. 2012, pp.9-9. 2012
- [22] E. C. Fear, J. Bourqui, C. Curtis, D. Mew, B. Docktor, and C. Romano, "Microwave breast imaging with a monostatic radar-based system :A study of application to patients," IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 61, pp. 2013, 2119-2128
- [23] J. Bourqui and E. C. Fear, "Systems for ultra-wideband microwave sensing and imaging of biological tissues," in 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2013, (pp.834-835).
- [24] J. Garrett and E. Fear, "A new breast phantom with a durable skin layer for microwave breast imaging," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, pp.2015, 1693-1700.
- [25] J. Bourqui, M. Kuhlmann, D. J. Kurrant, B. R. Lavoie, and E. C. Fear, "Adaptive monostatic system for measuring microwave reflections from the breast," Sensors, vol. 18, p.1340. 2018
- [26] E. Porter, E. Kirshin, A. Santorelli, M. Coates, and M. Popović, "Time-domain multistatic radar system for microwave breast screening," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 12, pp.2013, 229-232.
- [27] Y. Li, E. Porter, A. Santorelli, M. Popović, and M. Coates, "Microwave breast cancer detection via cost-sensitive ensemble classifiers :Phantom and patient investigation," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 31, pp.2017, 366-376.
- [28] E. Porter, M. Coates, and M. Popović, "An early clinical study of time-domain microwave radar for breast health monitoring," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 63, pp. 2015, 530-539
- [29] E. Porter, K. Duff, M. Popovic, and M. Coates, "Investigation of time-domain microwave radar with breast clinic patients," in 10 2016th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2016, (pp.1-3).
- [30] L. Krnold, M. Taherzadeh, F. Nabki, M. Coates, and M. Popović, "Microwave breast screening prototype :System miniaturization with IC pulse radio," IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, vol. 5, pp. 2020, 168-178
- [31] Y. Kuwahara, S. Miura, Y. Nishina, K. Mukumoto, H. Ogura,

فروشگاه اینترنتی آذران شاپ با ارائه خدمات اینترنتی بر پایه ایجاد اعتماد برای مشتریان در فضای مجازی این امکان را فراهم آورده تا همه درخواست های مشتریان محترم را در کمترین زمان ممکن ارائه دهد

همچنین یکی از مهمترین اهداف فروشگاه اینترنتی جهت فروش محصولات در وبسایت آذران شاپ تعیین قیمت های رقابتی می باشد

روش های دسترسی

یکی از مهمترین دغدغه های فروشگاه اینترنتی آذران شاپ ایجاد فضای دسترسی آسان جهت خرید و ارسال سریع همه محصولات برای مشتریان گرامی بوده است. در همین راستا فروشگاه اینترنتی آذران شاپ علاوه بر امکان دسترسی به محصولات خود در وبسایت شاپ اقدام به ایجاد اپلیکیشن اینترنتی با نام آذران شاپ نموده که جهت دریافت این اپلیکیشن از طریق خود وبسایت آذران شاپ و همچنین برنامه شناخته شده بازار امکان دانلود بر روی گوشی های هوشمند نیز به راحتی امکان پذیر می باشد

مشتریان ما در هر لحظه از شبانه روز بدون هیچ محدودیت زمانی با امکان مشاهده و همچنین مقایسه محصولات از طریق ویژگی های هر محصول که به صورت مجزا توسط تیم طراح و پشتیبانی گروه اینترنتی آذران شاپ انجام شده می توانند به ثبت و خرید محصول دلخواه خود در اپلیکیشن و همچنین وبسایت آذران شاپ بپردازند و در کمترین زمان ممکن با ارسال رایگان از طرف تیم پشتیبانی به تمام نقاط ایران محصولات خریداری شده خود را دریافت نمایند

یکی از نکات مهم فروشگاه اینترنتی آذران شاپ ایجاد بستر همکاری بین شرکت های مختلف برای به اشتراک گذاری محصولات دیگر شرکت ها در این فروشگاه نیز می باشد. دیگر شرکت ها در حوزه برق صنعتی میتوانند در فروشگاه آذران شاپ بعد از ارتباط با گروه پشتیبانی اقدام به ثبت محصولات خود در فروشگاه اینترنتی آذران نمایند تا از طریق بستر وبسایت فروشگاه و همچنین اپلیکیشن امکان فروش محصولات خود را داشته باشند

بازرگانی آذران صنعت

پس از سالها تجربه فعالیت در بخش های مختلف صنعت برق در رشته های ابزار دقیق ، صنعتی و ساختمانی همچنین آشنایی با نیازهای این بخش مهم از صنعت کشور ، برآن شدیم تا ضمن پایش تغییرات تکنولوژی و در نظر گرفتن تسهیلاتی که استفاده از محصولات بروز در پیشبرد صنایع کشور دارند ، مجموعه ای قابل اتکا برای برآوردن نیازهای این صنعت فراهم آوریم

آذران صنعت پس از نزدیک به یک دهه تلاش مفتخر است در راستای ارائه محصولات برق صنعتی و ساختمانی و ابزار دقیق با اخذ نمایندگی هایی از برندهای معتبر ایرانی و خارجی در خدمت شما عزیزان باشد

آذران صنعت افتخار دارد که با استفاده از کادری مجرب و مشاوره رایگان از سوی کارشناس رسمی دادگستری در رشته تاسیسات ساختمان و طراح و ناظر سازمان نظام مهندسی در زمینه برق ، آسانسور و سیستم های جریان ضعیف جهت هرگونه مشاوره آماده خدمت رسانی باشد

این مجموعه در دو بخش فروش فیزیکی و فروش اینترنتی آماده خدمت رسانی تمام وقت میباشد و به همین منظور جهت ارائه خدمات از راه دور به راه اندازی فروشگاه اینترنتی آذران شاپ به نشانی مقابل میباشد

www.AzaranShop.com





بازرگانی آذران صنعت

نماینده انحصاری دورمن اسمیت انگلستان

در شرق کشور و

محصولات DeDe

فروش تجهیزات حفاظت تابلویی و کلیه ملزومات برق

صنعتی، طراحی، نظارت، اجرا همراه با

مشاوره رایگان توسط کارشناس

رسمی دادگستری

فروش اینترنتی

AzaranShop.com



مشهد چهارراه مجد مجتمع تجاری موبایل ضامن آهو طبقه ششم واحد 803

مشهد میدان صاحب الزمان مجتمع تجاری سبحان طبقه همکف واحد 10



www.AzaranShop.com



دارای نرم افزار تخصصی
فروش محصولات

091 551 81247

091 558 34380

099 228 98780

@azaraansanat

مدیریت
واحد بازرگانی
فروش اینترنتی
وزیری

اینستاگرام