

# عصر برق ۱۴

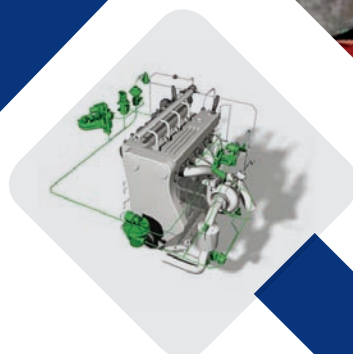
## ASR-E-BARQ

### فصلنامه علمی

انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران، شاخه خراسان  
سال هفتم • شماره ۱۴ • پاييز ۱۳۹۹  
قيمت ۲۰,۰۰۰ تومان



تامين انرژی مبتنی بر ریز شبکه‌های جریان  
مستقیم / آشنایی با دستاوردهای دفتر  
تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان  
خراسان رضوی / خواص الکترونی، نوری  
و مغناطیسی تک لایه مولیبدن دی سولفید  
در حضور نقص‌های نقطه‌ای با استفاده  
از اصول اولیه / مروری بر حسگرهای  
کوانتومی / الگوریتم‌های فراکاوشی  
جدید / صرفه‌جویی انرژی الکتريکی  
در قطار شهری با استفاده هم‌زمان از  
ذخیره‌سازهای انرژی و مشخصه سرعت  
بهینه قطار / تدوین نرم‌افزار پایش  
وضعیت ترانسفورماتور به کمک تحلیل  
پاسخ فرکانسی (FRA) / کنترل‌کننده‌های  
الکترونیکی مدرن در سوپاپ‌های سیلندر  
خودرو





# انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران - شاخه خراسان

## Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers

### تصاویری از بازدیدهای انجام شده توسط انجمن



### جلسات انجمن



### همایش ملی فناوری‌های نوین انرژی



### گارگاه‌های برگزار شده توسط انجمن



● مشهد، بلوار وکیل آباد، نبش بلوار امامت، مجموعه فرهنگی ورزشی شرکت برق منطقه‌ای خراسان

● تلفن: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۷

● شماره: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۸

● وب سایت انجمن: [www.kiaeee.ir](http://www.kiaeee.ir)

● پست الکترونیک: [info@kiaeee.ir](mailto:info@kiaeee.ir)



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

### شورای سیاست گذاری:

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

### شورای نویسندگان:

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

### مدیر اجرایی:

مهندس غلامرضا یزدانی شواکند

### روابط عمومی:

مهندس فریده سعادت، مهندس سمیرا شمس

### مدیر برنامه ریزی:

دکتر مصطفی رجبی مشهدی

### صفحه آرایی و امور گرافیک:

امواج برتر (۰۵۱-۳۸۹۴۰۱۲۰)

لیتوگرافی و چاپ: زبرجد (۰۵۱-۳۱۶۶۶۶)

صحافی: حافظ (۰۵۱-۳۳۹۲۹۱۱۱)

## به نام دوست

## فهرست مطالب

۲	یادداشت سردبیر؛ تامین انرژی مبتنی بر ریزشکته‌های جریان مستقیم
۳	آشنایی با دستاوردهای دفتر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی
۷	خواص الکترونی، نوری و مغناطیسی تک لایه مولیبدن دی‌سولفید در حضور ...
۱۱	مروری بر حسگرهای کوانتومی
۲۷	الگوریتم‌های فراکاوشی جدید
۳۷	صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در قطار شهری با استفاده هم‌زمان از ...
۴۴	کنترل محرکه ماشین جریان مستقیم بدون جاروبک با هدف ... (چکیده رساله دکتری)
۴۴	مدل مداری سلول‌های خورشیدی پلیمری و کاربرد آن برای ... (چکیده رساله دکتری)
۴۵	آنالیز تاثیر فیدبک و یا اطلاعات جانبی بر نرخ و ظرفیت و ... (چکیده رساله دکتری)
۴۵	کنترل پیش بین مقاوم زمان-واقعی دو حلقه‌ای (چکیده رساله دکتری)
۴۶	تدوین نرم‌افزار پایش وضعیت ترانسفورماتور به کمک تحلیل پاسخ فرکانسی (FRA)
۵۸	کنترل‌کننده‌های الکترونیکی مدرن در سوپاپ‌های سیلندر خودرو

### ● از مطالب و نوشته‌های شما استقبال می‌کنیم:

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

## فرخوان سال



### نشانی:

مشهد، بلوار وکیل آباد، نبش بلوار امامت، شرکت برق منطقه‌ای  
خراسان، ساختمان اداری، طبقه اول  
تلفن دبیرخانه نشریه: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۷  
نمبر: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۸

وب سایت: [www.kiaeee.ir](http://www.kiaeee.ir)

پست الکترونیک: [asrebarq@gmail.com](mailto:asrebarq@gmail.com)



## تامین انرژی مبتنی بر ریز شبکه‌های جریان مستقیم

یادداشت سردبیر

مازاد آن را به شبکه تزریق می‌کنند. لازم به یادآوری است که در حال حاضر بخش بزرگی از وسایل الکتریکی و الکترونیکی مجبور به استفاده از سامانه‌های هستند تا ولتاژ ac را به ولتاژ dc تبدیل کنند و به این ترتیب هزینه‌ای اضافه برای تولید وسایل الکتریکی برای سازگاری با ولتاژ ac پرداخت می‌شود.

سامانه‌های نوین انرژی ممکن است از نظر هماهنگی با سامانه‌های فرسوده قدیمی مشکل پیدا کنند یا بر آن‌ها اثر نامطلوب بگذارند، در حالی که ریز شبکه‌ها یک ارتباط طبیعی با منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برقرار نموده و به یک فناوری مورد توجه در سیستم‌های قدرت تبدیل شده‌اند. ریز شبکه‌های dc اکنون به راحتی در بخش‌های مسکونی و تجاری استفاده می‌شوند و در صورت بروز مشکل یا حوادث طبیعی می‌توانند به سرعت از شبکه جدا شوند و بار خود را از روش‌های مختلف تامین کنند، این حالت جزیره‌ای که ویژگی ریز شبکه‌ها است امنیت، قابلیت اطمینان، کیفیت شبکه و رفاه مشترکان را بهبود می‌بخشد و هم‌چنین با حذف خطوط بلند ac از تلفات جلوگیری می‌کند و از همه مهم‌تر این‌که با استفاده از حسگرهای هوشمند و سامانه‌های هوشمند مدیریت انرژی، سامانه‌ی تامین انرژی کارآمدتر و اقتصادی‌تری و با قابلیت اطمینان بالاتری را ارائه می‌دهند.

اکنون سیستم‌های روشنایی کارآمد و شارژرهای باتری از برق dc استفاده می‌کنند، خودروهای برقی بر مبنای استفاده از ولتاژ مستقیم توسعه یافته‌اند، مراحل تبدیل ac به dc در بخش‌های مسکونی و تجاری برای تامین انرژی مورد نیاز تجهیزات مانند رایانه افزایش یافته است و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نیازمند جریان dc هستند و به این ترتیب به نظر می‌رسد مفهوم ریز شبکه‌ها و سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر الکترونیک قدرت در هم تنیده شده‌اند تا به کارآمدی نظریه ادیسون در استفاده از جریان و ولتاژ مستقیم تحقق بخشند و سرعت حرکت از سمت سامانه‌های جریان متناوب (ac) به سمت سامانه‌های جریان مستقیم (dc) را تندتر نمایند.

چندین دهه پیش، نظریه جورج وستینگهاوس و نیکولا تسلا که از طرفداران جریان متناوب (ac) بودند برنده شد و جریان مستقیم (dc) مورد نظر ادیسون به حاشیه رانده شد. در واقع اختراع موتور القایی از سوی تسلا، جنگ را به سود جریان ac تغییر داد و پس از آن نیروگاه‌های سوخت فسیلی به برگ برنده‌ی دیگری تبدیل شدند تا حاکمیت انرژی الکتریکی متناوب را که علاوه بر تولید آسان از مزیت انتقال آسان‌تر هم برخوردار بود تثبیت نماید. این سیطره اگر چه هرگز به حذف کامل جریان dc از چرخه استفاده منجر نشد، اما سال‌ها استفاده از جریان ac را به رقیب بلامنازعی تبدیل نمود که تامین جریان dc هم از طریق تبدیل جریان ac ممکن باشد.

اما شروع قرن بیستم و دگرگونی‌ها در نحوه‌ی تولید انرژی الکتریکی حکایت دیگری را رقم زد. رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی، مسایل زیست محیطی، نگرانی انتشار گازهای گلخانه‌ای و رو به افول نهادن منابع انرژی فسیلی از یک سو و فرسودگی شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی و تلفات انرژی در خطوط بلند از سوی دیگر برنامه‌ریزان انرژی را در سراسر دنیا به رویکردهای نوآورانه‌ای برای تامین انرژی پایدار و آدار نمود تا تامین انرژی از منابع پاک را در دستور کار قرار دهند. نیروگاه‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده راه خود را در سامانه‌های تامین انرژی الکتریکی باز نمودند تا هم چالش‌های قابلیت اطمینان و کیفیت انرژی حل شود و هم دغدغه‌ی امنیت تامین انرژی در شرایط بحرانی برطرف گردد. به این ترتیب مفاهیم جدیدی مانند ریز شبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند در سامانه‌های انرژی الکتریکی پدیدار شدند. حالا نوبت نظریه ادیسون فرا رسیده است تا این بار آرایه‌های خورشیدی، خودروهای برقی، ذخیره‌سازهای انرژی، ابرخازن‌ها و باتری‌ها در کنار تجهیزات پر تعداد الکترونیکی مصرف کننده‌ی جریان مستقیم، همان نقشی را بازی کنند که موتور القایی تسلا در کنار نهادن جریان dc بازی کرد.

ریز شبکه‌های ولتاژ پایین dc که اکنون به عنوان یک راه حل تامین انرژی به صورت محلی و با پاسخگویی سریع به تقاضای بار مطرح هستند، انرژی الکتریکی را از سامانه‌های نوین انرژی الکتریکی مانند خورشیدی و خودروهای برقی که اغلب مبتنی بر ولتاژ dc هستند، دریافت می‌نمایند و بخشی از آن را به صورت مستقیم در اختیار مصرف کننده‌های dc و بخشی دیگر را پس از تبدیل به جریان ac، در اختیار مصرف کننده‌های محلی قرار می‌دهند و

جواد ساده  
سردبیر

\*\*\*



آشنایی با

## دستاوردهای دفتر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی

شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی پس از تغییرات ساختاری که از ابتدای تاسیس آن در سال ۱۳۷۱ تاکنون رخ داده، در حال حاضر تامین برق استاندارد و مطمئن به یک میلیون و سیصد هزار مشترک در بیست و نه مدیریت برق شهرستان را در وسعتی حدود ۱۱۷۰۰۰ هزار کیلومتر مربع برعهده داشته است. دارا بودن طولانی‌ترین شبکه توزیع برق کشور به طول حدود ۴۲۰۰۰ کیلومتر، سرویس‌دهی به مشترکین نوار مرزی در ۸۵۰ کیلومتر مرز مشترک با کشورهای همسایه، تعداد زیاد مشترکین کشاورزی و روستایی و همچنین پراکندگی جمعیت در سطح استان و شرایط سخت جغرافیایی از ویژگی‌هایی است که موجب شده است مدیران و کارکنان شرکت تمامی توجه و اهتمام خود را به خدمت‌رسانی به مردم عزیز این استان به کار بسته و در این راه از هیچ کوششی فروگذار ننمایند. در همین راستا و در سال‌های اخیر با همت و تلاش جمعی، فعالیت‌ها و پروژه‌های مهمی در سراسر شرکت شروع شده است که این تلاش در جهت تحقق اهداف نقشه استراتژی در چهار چوب برنامه‌ها و ابتکارات مصوب تداوم خواهد یافت.



مهندس حسن کریم‌پور معاونت برنامه ریزی و مهندسی و قائم مقام شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی

با هدف توزیع برق به صورت مطمئن و پایدار و همچنین افزایش رضایت‌مندی مشترکان و ذینفعان شرکت و در راستای نقشه استراتژی شرکت و با شعار (تلاش همه برای خاص بودن) اقدامات مهمی در شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی انجام شده است.

مهندس حسن کریم‌پور معاون برنامه‌ریزی و مهندسی شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی، طی گفت‌وگویی با خبرنگار عصر برق ضمن اشاره به کلید واژه «خاص» در شعار شرکت که برگرفته از عبارات «خدمت‌رسانی شایسته و با کیفیت به مردم»، «ارتقای بهره‌وری با استفاده از دانش و فناوری» و «صیانت از محیط‌زیست و دارایی‌ها» است، از اجرای پروژه‌های متعدد در ارتباط با موضوع‌های استقرار شبکه سبز، کاهش تلفات، پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریتی، هوشمندسازی شبکه و تاسیسات، توسعه دولت الکترونیک از طریق ارائه خدمات غیرحضور در حوزه‌های فروش و پس از فروش انشعاب

برق و بهره‌برداری با استفاده از اپلیکیشن برق من، سامانه‌های ناب پلاس، مرکز سیمپات و پورتال ارتباطی در بستر وب و کاهش انرژی توزیع نشده خبر داد.

وی از پروژه‌های جایگزینی سیم‌های مسی با کابل خودنگهدار، حذف حریم‌های خطرناک، حمایت از توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، تحویل ولتاژ استاندارد، پیاده‌سازی سیستم یکپارچه ERP، کاربردی‌سازی GIS در تمامی فرایندهای عملیاتی شرکت، پیاده‌سازی استاندارد ۳۴۰۰۰ تعالی منابع انسانی، مدیریت دارایی‌های فیزیکی، نظام بهبود مستمر و استقرار 5s+1، توسعه نقاط اتوماسیون در شبکه 20KV، توسعه مانیتورینگ شبکه، راه‌اندازی مرکز تماس، ارتقای تاب‌آوری شبکه و توسعه فعالیت‌های خط گرم به‌عنوان نمونه‌هایی از پروژه‌های کلیدی شرکت نام برد.

مهندس کریم‌پور در پایان اظهار امیدواری کرد روند اجرای فعالیت‌ها و پروژه‌های مرتبط، در سال آینده نیز با شتاب بیشتری ادامه یافته تا شاهد تحقق کامل اهداف شرکت و رضایت بیش از پیش مشتریان محترم برق باشیم.



دکتر مهدی ظریف

مسوول دفتر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی

دفتر تحقیقات توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی در راستای ترویج فرهنگ تحقیق و پژوهش و جاری نمودن این امر مهم در مجموعه فعالیت‌های شرکت با اقدامات برجسته‌ای در خصوص تحقیق و پژوهش‌های کاربردی توانسته است نتایج و رتبه‌های درخشانی در صنعت برق به‌دست آورد که بخشی از آنها عبارت است از: ۱۱ پروژه تحقیقاتی خاتمه یافته در سال‌های ۹۸ و ۹۹، ترجمه و تالیف ۲ عنوان کتاب در زمینه صنعت برق، کسب رتبه برتر درسی و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق با بیشترین مقالات پذیرفته شده در بین شرکت‌های توزیع نیروی برق کشور، انعقاد تفاهم‌نامه با مراکز پژوهشی استان در راستای ارتباط موثر بین صنعت و دانشگاه، حضور فعال در نمایشگاه‌های مرتبط با پژوهش و نوآوری و کسب عنوان غرفه نمونه در چهاردهمین نمایشگاه بین‌المللی برق (قدرت، الکترونیک)، برگزاری رویداد استارت‌آپ و یکیند مدیریت مصرف برق با معرفی ایده‌های برتر و اجرای پروژه‌های شاخص و برجسته تحقیقاتی مصوب وزارت نیرو.

دکتر مهدی ظریف مسوول دفتر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی در گفت‌وگو با خبرنگار عصربرق ابراز داشت: در راستای رفع مشکلات صنعت برق و توسعه تحقیقات کاربردی از طریق انجام طرح‌های پژوهشی کاربردی و پیاده‌سازی آن‌ها در سطح

شرکت، نیازهای حوزه‌های مختلف شناسایی و پس از اخذ تاییدیه، عناوین آنها اعلام می‌شود. از این‌رو آمادگی دریافت، بررسی و حمایت از سایر پیشنهادات پژوهشی مرتبط نیز وجود دارد. وی در ادامه گفت: پژوهشگران می‌توانند با ثبت‌نام در سامانه ساتب (satab.nri.ac.ir) از طریق ثبت نیاز پژوهشی، موضوعات مورد نظر خود را با عنوان اولویت تحقیقاتی ارسال نمایند و یا جهت انجام پروژه‌های مصوب وزارت نیرو از طریق ارسال پیشنهاد تعریف پروژه با ثبت آن در سامانه ساتب اقدام نمایند (راهنمای ثبت‌نام و ورود به سامانه در سایت شرکت به آدرس www.kedc.ir بخش تحقیقات، زیر منوی فرایندهای پژوهش ارائه شده است). مفتخریم که در دفتر تحقیقات توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی با شماره تلفن ۳۸۱۸۹۰۳۷۱ پاسخگوی سوالات احتمالی شما محققان محترم باشیم.

در ادامه به معرفی چند پروژه شاخص خاتمه یافته می‌پردازیم.

### اجرای پایلوت و تحلیل فنی و اقتصادی استفاده از تیر بتنی چند ضلعی در شبکه روشنایی معابر به طول یک کیلومتر در شهرستان کاشمر

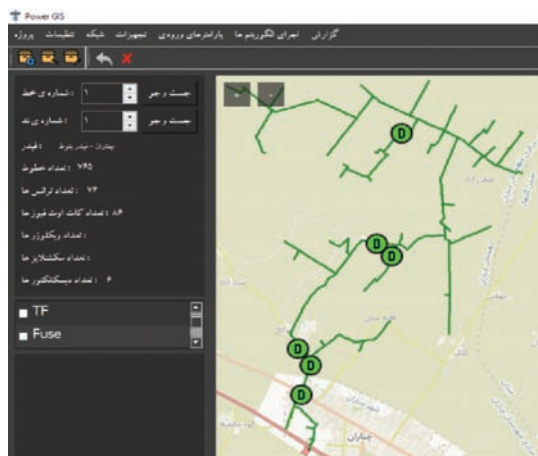
هدف از اجرای این پروژه کاهش هزینه احداث شبکه روشنایی و همچنین هزینه‌های نگهداری، کاهش خطرات برق گرفتگی احتمالی ناشی از برقرار شدن بدنه‌های فلزی و حفظ زیبایی و مبلمان شهری توام با کاهش هزینه اولیه در مقایسه با پایه‌های فلزی هشت وجهی می‌باشد. پس از طراحی و ساخت پایه‌های سیمانی هشت وجهی، اجرای پایلوت آن در منطقه شهری برای مقایسه مزایای آن با شبکه‌های روشنایی پایه فلزی ۸ وجهی انجام گرفت. محل نصب به گونه‌ای انتخاب شد که دو بلوار در طرفین میدان وجود داشته باشد، یکی با پایه‌های فلزی هشت وجهی رایج موجود و دیگری با نصب پایه‌های سیمانی ۸ وجهی جدید روشن شود و امکان مقایسه بصری و فنی توسط افراد متخصص و عادی فراهم باشد. نتایج و دستاوردهای حاصل شده از این پروژه به کسب رضایت شهروندان و ذی‌نفعان از زیبایی معابر و روشنایی، کاهش مشکلات نصب در مقایسه با پایه‌های فلزی و عدم نیاز به حفاری طولی در بلوارها و معابر و کاهش نیاز به نگهداری و بازدید اتصال زمین اشاره کرد.

### مکانیابی و تنظیم بهینه ریکلوزرها، سکشن لایزرها و کات‌اوت فیوزها در شبکه توزیع استان خراسان رضوی با در نظر گرفتن گزارش آماری عملکرد تجهیزات

تامین برق به‌صورت اقتصادی و مطمئن و در نتیجه جلب رضایت مشتریان، جزء مهمترین اهداف بهره‌برداران شبکه توزیع برق می‌باشد. از طرفی، شبکه گسترده توزیع، در معرض حوادث گوناگونی قرار دارد که گاهی منجر به قطع برق و تحمیل خسارات ناشی از خاموشی می‌گردد. درصد بالایی از حوادث در شبکه توزیع از نوع گذرا هستند. از این‌رو یکی از راهکارهای متداول و موثر در جهت بهبود قابلیت اطمینان، نصب ریکلوزر و سکشن لایزر در شبکه می‌باشد که با نصب آنها در مکان‌های بهینه، مدت خاموشی و انرژی توزیع نشده کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. هزینه سرمایه‌گذاری بالا، نصب تجهیزات جدید را با محدودیت مواجه می‌سازد. بنابراین تعیین کمترین تعداد تجهیز لازم و تعیین موقعیت بهینه نصب آن‌ها از جمله نیازهای اساسی بهره‌برداران شبکه‌های توزیع می‌باشد. هدف از اجرای این پروژه، طراحی نرم‌افزاری جهت تعیین مکان بهینه نصب ریکلوزر و سکشن لایزر در فیدهای شبکه توزیع استان خراسان رضوی می‌باشد. در این راستا، اطلاعات شبکه در فرمت GIS دریافت و بر اساس آن



نمایش خروجی‌های لازم در نرم‌افزار به صورت گرافیکی  
 • مکانیابی بهینه بر اساس تابع هدف مد نظر طراح در چند سناریوی مختلف



### دستورالعمل فنی اتصال مولدهای مقیاس کوچک خورشیدی به شبکه توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی

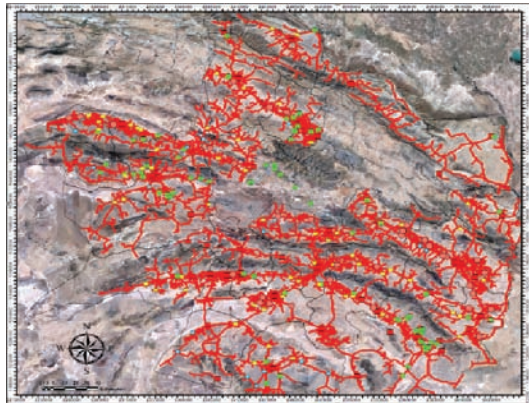
اتصال نیروگاه‌های تولید پراکنده به شبکه توزیع انرژی الکتریکی مزایای فنی و اقتصادی قابل توجهی را برای بهره‌بردار شبکه، سرمایه‌گذار نیروگاه و همچنین سازمان توانیر به‌عنوان متولی اصلی تامین برق در کشور دارد. از دیدگاه بهره‌بردار شبکه استفاده از تولیدات پراکنده مزایای فنی از جمله کاهش تلفات، کاهش افت ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان را به‌دنبال دارد. از دیدگاه سرمایه‌گذار منافع اقتصادی حاصل از فروش انرژی الکتریکی و افزایش قابلیت اطمینان تامین بارهای داخلی را به‌همراه دارد. از دیدگاه مدیریت کلان شبکه نیز، کاهش و به تعویق افتادن سرمایه‌گذاری‌ها در بخش تولید، انتقال و فوق توزیع را در پی خواهد داشت. از سوی دیگر، افزایش ضریب نفوذ مولدهای تولید پراکنده مسایل

گراف توصیف‌کننده توپولوژی شبکه ساخته شده و اطلاعات نقاط بار، مکان کلیدهای موجود و... نیز ثبت می‌شوند. همچنین، پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان و نیز اطلاعات لازم برای تحلیل‌های مبتنی بر پخش بار مانند ارزیابی پرو فایل ولتاژ گره‌ها و تلفات شبکه، در بستر گرافیکی نرم‌افزار تهیه شده توسط کاربر وارد می‌شود. سپس طبق انتخاب کاربر، تحلیل‌های لازم انجام و گزارش نتایج ارائه می‌شود. در این راستا، مسئله مکان‌یابی بهینه با هدف کمترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان و با رعایت قیود لازم، به صورت یک مساله بهینه‌سازی مدلسازی شده است.

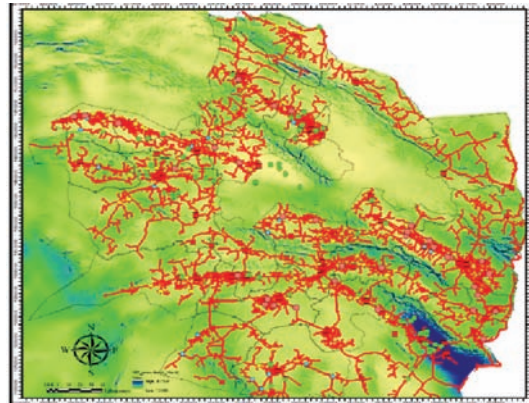
خروجی اصلی نرم افزار، مکان بهینه جهت نصب کلیدهاست که نقاط پیشنهادی به صورت گرافیکی در نقشه GIS فیدر مورد مطالعه نشان داده خواهد شد. همچنین مقدار محاسبه شده برای شاخص‌های قابلیت اطمینان شامل SAIFI، SAIDI، MAIFI و ENS، قبل و بعد از نصب کلید در مکان پیشنهادی نمایش داده خواهد شد. همچنین اجرای دقیق پخش بار برای فیدر مورد مطالعه (بر اساس جنس و موقعیت هادیها، طول انشعابها، میزان مصرف هر نقطه بار و... ) انجام و شبکه از لحاظ جریان، ولتاژ و... تحلیل می‌گردد. بر خلاف بسیاری از نرم‌افزارهای موجود، دیتای ورودی برای پخش بار نیز همان شیپ فایل GIS می‌باشد. در ادامه، بخش‌های خاص (مثلا نقاط با ولتاژ کمتر از حد مجاز) برای کاربر نمایش داده خواهد شد. بستر نرم افزاری طراحی شده مبتنی بر GIS، فضای مناسبی فراهم می‌کند که در آن کاربر به سادگی می‌تواند تاثیر تعداد و مکان‌های مختلف نصب کلیدهای جدید بر شاخص‌های قابلیت اطمینان بر روی هر فیدر را به‌خوبی ارزیابی کند.

مهمترین نقاط قوت نرم افزار تهیه شده عبارت است از:

- قابلیت دریافت اطلاعات ورودی به صورت شیپ فایل GIS و تهیه ماتریس تلاقی گره و شاخه متناظر گراف شبکه مورد مطالعه
- قابلیت محاسبه چهار شاخص مهم قابلیت اطمینان (SAIFI، SAIDI، MAIFI، ENS) به صورت کلی و بر اساس یک روش تحلیلی و ریاضی نوآورانه، سریع و کارا مبتنی بر تئوری گراف.
- انجام محاسبات پخش بار بر اساس اطلاعات دریافتی از فایل GIS و



اطلس منابع تولید پراکنده خراسان رضوی



اطلس منابع تولید پراکنده خراسان رضوی (پتانسیل بادی - ۵۰ متر)

دیدگاه بهره‌بردار شبکه به منظور رسیدن به اهداف مورد نظر در این پروژه، از جمله اقدامات انجام گرفته به شرح زیر می‌باشند:

- مطالعات پخش بار بصورت ساعتی
- مطالعات اتصال کوتاه
- محاسبات هماهنگی حفاظتی
- محاسبات پایداری ولتاژ
- تحلیل هارمونیک شبکه در حضور نیروگاه
- محاسبات سیستم زمین نیروگاه
- طراحی سیستم اتوماسیون و مانیتورینگ نیروگاه
- برآورد تلفات انرژی سالیانه فیدر قبل و بعد حضور نیروگاه
- تحلیل و بررسی سیستم ذخیره‌ساز در صورت وجود
- پیشنهاد سیستم اندازه‌گیری پارامترهای فنی نیروگاه شامل ولتاژ، توان و جریان تزریقی، هارمونیک تزریقی و ...

### تهیه اطلس تولیدات پراکنده استان خراسان رضوی (وضعیت فعلی و آینده)

هدف از اجرای این پروژه ارایه اطلس منابع تولید پراکنده موجود بر روی شبکه توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی، بررسی تکنیک‌های بین‌المللی و راهکارهای عملی ممکن در مکان‌یابی منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع و فیدهای با تعداد بسیار زیاد، ارایه اطلس موقعیت‌ها و ظرفیت‌های موجود در شبکه برای حضور DG و ارایه اطلس پتانسیل منابع تجدیدپذیر در محدوده تمامی فیدهای شبکه توزیع خراسان رضوی با پیشنهاد نوع DG منصوبه می‌باشند. نتایج حاصل از اجرای این پروژه ارایه اطلس تولید پراکنده در شرایط موجود برای استان خراسان رضوی، ارایه تکنیک جامع و کامل جهت پیش‌بینی نقاط کاندید منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع با فیدهای زیاد و ارایه اطلس نهایی شرایط موجود و پیش‌بینی نقاط کاندید در شبکه استان خراسان رضوی می‌باشد.

\*\*\*

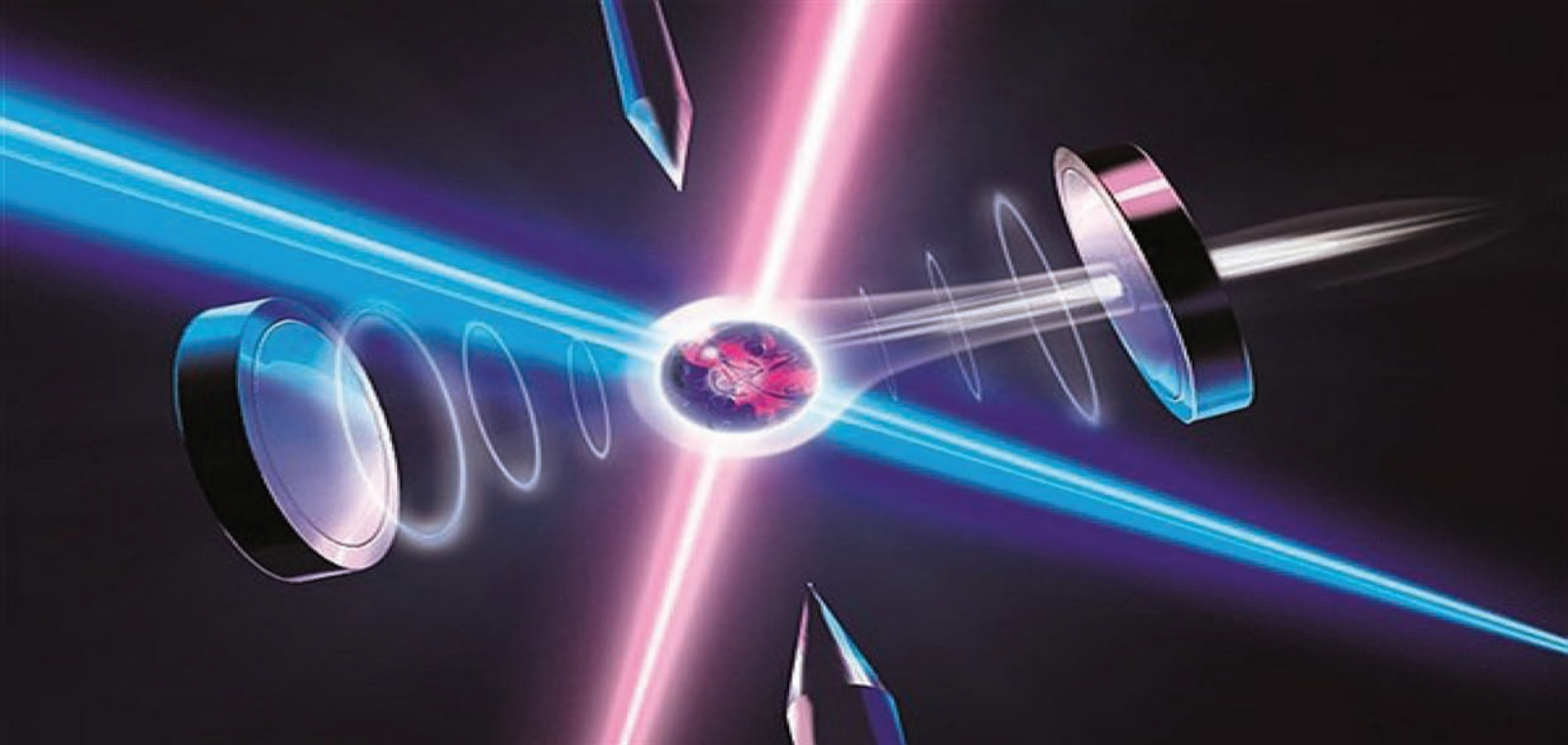
و چالش‌های فنی را پیش روی مدیر و بهره‌بردار شبکه قرار خواهد داد. براین اساس، سازمان توانیر دستورالعمل جامعی را برای انجام مطالعات اتصال به شبکه مولدین تولید پراکنده تهیه کرده و در اختیار شرکت‌های توزیع و برق منطقه‌ای و همچنین مشاوران این عرصه قرار داده است. از آنجایی که این دستورالعمل بصورت کلی و برای تمام انواع مولدین از قبیل سنکرون، آسنکرون و همچنین سلول‌های فتولتاییک ارایه شده است، مسایل و چالش‌های خاص مرتبط با هر یک از انواع این مولدین مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین، لازم است که یک دستورالعمل تکمیلی بر اساس نیازها و مسایل هر یک از انواع مولدین با توجه به تجربیات و استانداردهای موجود در این زمینه آماده و مبنای تصمیم‌گیری حضور این مولدین در شبکه قرار گیرد.

در این پروژه هدف تمرکز بر مسایل فنی نیروگاه‌های خورشیدی برای اتصال به شبکه توزیع می‌باشد. ایجاد یک رویه واحد در انجام مطالعات فنی و در اختیار داشتن معیارهای مشخص تصمیم‌گیری برای ارزیابی تاثیر حضور مولدین خورشیدی در شبکه از اهم قابلیت‌های این پروژه می‌باشد. در این راستا، تمام بخش‌های مطالعات فنی از قبیل پخش بار، اتصال کوتاه، مطالعات هارمونیک، هماهنگی سیستم‌های حفاظتی، سیستم زمین، مانیتورینگ و اتوماسیون نیروگاه مورد بازنگری اساسی قرار گرفته، و بر اساس مدلسازی رفتار نیروگاه‌های خورشیدی دستورالعمل جدید خاص این نوع مولدین برای اتصال به شبکه ۲۰ کیلوولت ارایه می‌گردد.

ارایه یک دستورالعمل مختص نیروگاه‌های خورشیدی و ایجاد یک رویه واحد مزایای فنی، اقتصادی و اجتماعی متنوعی از دیدگاه بهره‌بردار شبکه و سرمایه‌گذار نیروگاه به وجود خواهد آمد. این مزایا عبارتند از:

- داشتن یک رویه واحد با در نظر گرفتن شرایط خاص تولید واحدهای خورشیدی
- رفع مشکلات و چالش‌های موجود در ارتباط با ارزیابی تاثیر واقعی نیروگاه‌های خورشیدی روی پارامترهای بهره‌برداری شبکه
- تشویق سرمایه‌گذاران به احداث نیروگاه در مناطق با اولویت فنی از





مقاله علمی-ترویجی

## خواص الکترونی، نوری و مغناطیسی تک لایه مولیبدن دی سولفید در حضور نقص های نقطه‌ای با استفاده از اصول اولیه

■ مریم نبیری / گروه مهندسی برق / واحد یزد / دانشگاه آزاد اسلامی / یزد - ایران / nayeri@iauyazd.ac.ir

■ حامد طاهری / گروه مهندسی برق / آموزشکده فنی امام علی (ع) دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان یزد - ایران / hamedtaheri2006@gmail.com

### چکیده

این پژوهش به مطالعه در خصوص نقص‌های تهی جای مولیبدن دی سولفید تک لایه بر پایه اصول اولیه می پردازد. روش محاسبات اصول اولیه مبتنی بر تئوری تابعی چگالی (DFT) به مطالعه و بررسی ساختار الکترونی اتم‌ها، مولکول‌ها و جامدات می پردازد و روش دقیق و هوشمندانه‌ای برای جایگزینی مسایل چندذره‌ای محسوب می شود. ابرسلول در نظر گرفته شده در این ساختار شامل ۳۶ اتم می باشد و از تقریب شیب تعمیم یافته برای پتانسیل تبادل-همبستگی استفاده شده است. مولیبدن دی سولفید تک لایه ذاتی دارای شکاف نوار مستقیم با انرژی  $1/82 \text{ eV}$  می باشد. وجود نقص در این ساختار منجر به تغییرات قابل توجهی در خواص الکترونیکی و مغناطیسی ماده می گردد. نتایج نشان می دهند حذف یک اتم مولیبدن و یا حذف یک اتم گوگرد منجر به تغییر حالات اسپینی و مغناطیسی شدن ماده می گردد. به علاوه، حذف یک و دو اتم گوگرد منجر به انرژی شکاف نوری کمتر از حالت ذاتی می شود. برداشتن یک اتم گوگرد اولین بیشینه قسمت موهومی تابع دی الکتریک در حوالی شکاف نوار رخ می دهد. حذف دو اتم گوگرد و یا یک اتم مولیبدن با یک اتم گوگرد نیز منجر به غیرمستقیم شدن شکاف نوار می گردد. مطالعه عیوب ساختاری می تواند فرصت‌های نوینی را برای رهیافت در خصوص رشد و سنتز نانو مواد فراهم سازد.

**کلمات کلیدی:** تابع دی الکتریک، طیف انتقال، مغناطیسی، مولیبدن دی سولفید، نقص.

## Electronic, Optical and Magnetic Properties of Molybdenum Disulfide Monolayer in the Presence of Point Defects Using first Principles

■ Maryam Nayeri\* / Department of Electrical Engineering/ Yazd Branch/ Islamic Azad University/ Yazd, Iran./ nayeri@iauyazd.ac.ir

■ Hamed Taheri / Department of Electrical Engineering/ Imam Ali Technical University/ Technical University of Yazd/ Yazd, Iran. hamedtaheri2006@gmail.com

\*Corresponding author

### Abstract

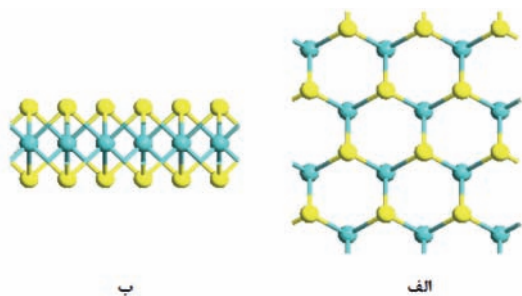
This study investigates the defects of molybdenum disulfide substitutions based on first principles. The first principle-based computational method based on density functional theory (DFT) studies the elec-

tronic structure of atoms, molecules and solids and is an accurate and intelligent method for substituting multiparticle problems. The supercell considered in this structure consists of 36 atoms and a generalized gradient approximation is used for the exchange-correlation potential. Intrinsic molybdenum disulfide has a direct band gap with an energy of 1.82 eV. Defects in this structure lead to significant changes in the electronic and magnetic properties of the material. The results show that the removal of one molybdenum atom or the removal of one molybdenum atom with two sulfur atoms leads to a change in the spin states and magnetization of the material. In addition, the removal of one or two sulfur atoms results in a band gap energy lower than its intrinsic. By removing a sulfur atom, the first imaginary part of the dielectric function occurs around the band gap energy. Removal of two sulfur atoms or one molybdenum atom with one sulfur atom also causes the band gap to be indirect. The study of structural defects can provide new opportunities for approaches to the growth and synthesis of nanomaterials.

**Keywords:** Dielectric function, Transmission spectrum, Magnetic, Molybdenum disulfide, Defect.

## ۱- مقدمه

حرارت‌های بالا به وجود بیاید. از جمله نقص‌های نقطه‌ای، جاهای خالی می‌باشند. وجود نقص جای خالی منجر به نزدیک شدن اتم‌های اطراف جای خالی می‌شود که این امر تنش کششی را میان اتم‌های مجاور جای خالی به وجود می‌آورد و از این‌رو نظم اتمی به هم می‌ریزد و از طرفی منجر به تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های نوری و الکترونیکی ماده می‌گردد. پژوهش حاضر بر روی وجود نقص‌های جای خالی در مولیبدن دی‌سولفید تک لایه و تاثیر آن بر خواص الکتریکی و نوری ماده با رویکرد اصول اولیه تمرکز دارد. نقص‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل جای خالی یک اتم گوگرد، دو اتم گوگرد، یک اتم مولیبدن، یک اتم گوگرد به همراه یک اتم مولیبدن و دو اتم گوگرد با یک اتم مولیبدن در ساختار مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه است. بخش بعدی به جزئیات محاسباتی بکار گرفته برای ساختار مورد نظر می‌پردازد. نتایج و بحث و تحلیل ساختار مولیبدن دی‌سولفید ذاتی و دارای نقص در بخش سوم ارائه می‌گردد. بخش پایانی نتیجه‌گیری را در بر می‌گیرد.



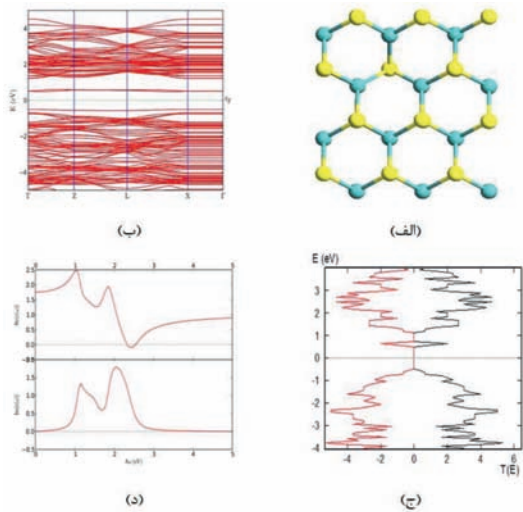
شکل ۱: ساختار مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه. (الف) نمای از بالا و (ب) دید جانبی.

## ۲- جزئیات محاسبات

به‌منظور مطالعه اثر نقص‌های نقطه‌ای بر روی ساختار تک‌لایه  $\text{MoS}_2$ ، ابر سلولی با ۳۶ اتم، شامل ۲۴ اتم S با آرایش اتمی  $3p^4 3s^2$  Ar ۱۰،  $4s^1$  S ۱۲ و ۱۲ اتم Mo با آرایش اتمی  $4d^5 5s^1$  Kr ۳۶، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه اتم Mo در این حالت ناپایدار است، برای پایدار شدن یکی از الکترون‌های زیر لایه S به اوربیتال d انتقال می‌یابد. بدین ترتیب آرایش اتم مولیبدن به صورت  $4d^5 5s^1$  Kr ۳۶، Mo نمایش داده می‌شود. محاسبات با روش تئوری تابعی چگالی (DFT) در چارچوب تقریب شیب تعمیم یافته (GGA) برای پتانسیل تبدیلی-همبستگی [۱۰] و با استفاده از کد VASP [۱۱] انجام می‌گیرد.

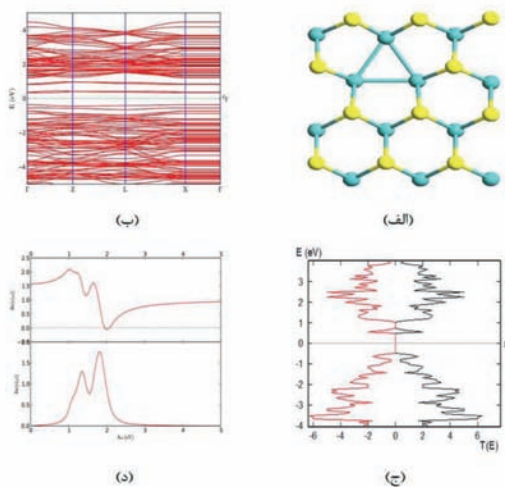
بسیاری از مواد دو بعدی در حالت توده به‌صورت پشته‌ای از لایه‌هایی قرار می‌گیرند که پیوند درون لایه‌ای محکم و برهم‌کنش بین لایه‌ای ضعیفی دارند و این لایه‌ها با ورقه ورقه شدن بصورت لایه‌های نازک منفرد و اتمی در می‌آیند [۱]. نمونه‌ای از این مواد گرافن است که تک لایه گرافیت می‌باشد. ساختار نوار الکترونیکی گرافن، پاشندگی خطی در نزدیکی k دارد و حامله‌ای بار را می‌توان به‌عنوان فرمیون‌های بدون جرم دیراک تشریح کرد [۲]. گرافن مثال بی‌نظیری از یک هادی حرارتی و الکتریکی بسیار نازک با قابلیت حرکت زیاد است [۳]. مواد دو بعدی دیگری نظیر سیلیسن، فسفر سیاه،  $\text{ZnO}$  دوبعدی و TMDC نیز شناخته شده‌اند. مواد TMDC محدوده وسیعی از خواص حرارتی، شیمیایی، مکانیکی، نوری و الکتریکی را نشان می‌دهند که توسط محققان در چند دهه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۴]. به تازگی تجدید فعالیت در زمینه مواد TMDC در اشکال دو بعدی نازک و در حد چند اتم آغاز شده است. مواد TMDC، گروهی از مواد با فرمول  $\text{MX}_2$  هستند که در آن M فلز واسطه می‌باشد و X یک کالکوژن (نظیر S، Se و Te) است. محدوده خواص الکترونیکی این مواد از عایق نظیر  $\text{HfS}_2$  به نیمه‌هادی ( $\text{MoS}_2$  و  $\text{WS}_2$ ) و نیمه‌فلز ( $\text{TiSe}_2$  و  $\text{WTe}_2$ ) تا فلز ( $\text{VSe}_2$  و  $\text{NbS}_2$ ) تغییر می‌کند. در بسیاری از مواد TMDC نیمه‌هادی، گذاری از شکاف نوار غیرمستقیم در توده به شکاف نوار مستقیم در تک‌لایه وجود دارد. به‌طور مثال مولیبدن دی‌سولفید ( $\text{MoS}_2$ ) توده با شکاف نوار غیرمستقیم برابر با ۱/۳eV به شکاف نوار مستقیم به میزان ۱/۸eV در  $\text{MoS}_2$  تک‌لایه افزایش می‌یابد. شکاف نوار مستقیم در  $\text{MoS}_2$  تک‌لایه منجر به پدیده پرتو افشانی نوری می‌گردد که امکان کاربردهای الکترونیک نوری را فراهم می‌کند [۵]. مطالعه خواص الکترونیکی  $\text{MoS}_2$  تک لایه با استفاده از اصول اولیه و بر پایه تئوری تابع چگالی توسط کادانتسوف و همکارانش انجام گرفت [۶]. همچنین ویژگی‌های نوری و الکترونیکی ساختار مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه تحت تاثیر کرنش کششی و فشاری با استفاده از روش تنگست در [۷] و [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. ونگ و همکارانش تاثیر جای خالی اتم گوگرد را در حضور کرنش کششی مورد مطالعه قرار دادند [۹]. بلورها همواره دارای نقص‌های ساختاری و یا نقص در ترکیب می‌باشند. وجود نقص در نیمه‌هادی‌ها، ویژگی‌هایی همچون هدایت الکتریکی، نوری و فعالیت شیمیایی این مواد را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نقص‌های نقطه‌ای ساده‌ترین و در عین حال رایج‌ترین عیوب سطحی هستند. چنین عیوبی می‌تواند در موقع انجماد، تغییر شکل دادن، اشعه دادن با انرژی زیاد و یا در درجه

مشاهده چنین اثراتی می‌تواند برای بکارگیری اینگونه ساختارها در ادوات نانو و اپتوالکترونیک موثر واقع گردد.



شکل ۳: الف) ساختار اتمی مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه با جای خالی یک اتم گوگرد. ب) ساختار نوار، ج) طیف انتقال، د) قسمت موهومی و حقیقی تابع دی‌الکتریک آن.

ساختار نوار محاسبه شده در شکل (۴) برای این سیستم در حضور نقص دو اتم گوگرد (اتم سطح بالایی و سطح پایینی)، بیانگر شکاف نوار غیرمستقیم با انرژی شکاف  $0.71 \text{ eV}$  است. با توجه به غیرمستقیم بودن ماده، اولین بیشینه در محدوده شکاف نوار رخ نمی‌دهد و دارای مقداری معادل با  $1.35 \text{ eV}$  می‌باشد. طیف انتقال این سیستم نیز حاکی از غیرمغناطیسی بودن آن است.



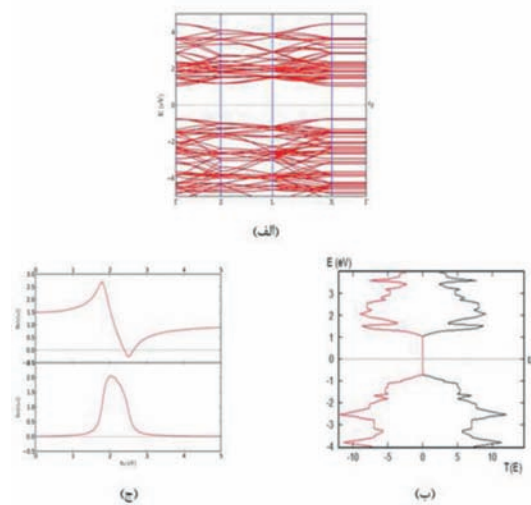
شکل ۴: الف) ساختار اتمی مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه با حذف دو اتم گوگرد. ب) ساختار نوار، ج) طیف انتقال، د) قسمت موهومی و حقیقی تابع دی‌الکتریک آن.

شکل (۵) نیز ویژگی‌های الکتریکی و نوری مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه، هنگامی که یک اتم مولیبدن از ساختار جدا شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل (۵) برمی‌آید، حذف یک اتم مولیبدن موجب می‌شود ساختار، گذاری از نیمه‌هادی به سمت فلز داشته باشد. به علاوه عدم تقارن اسپین بالا و پایین نشان دهنده مغناطیسی بودن ساختار است. نخستین بیشینه طیف تابع دی‌الکتریک نیز در انرژی  $0.19 \text{ eV}$  اتفاق می‌افتد. این‌گونه ساختارها می‌توانند در ادوات اسپینترونیک مورد استفاده قرار گیرند.

انرژی قطع به جهت مش‌بندی فضای حقیقی  $75$  هارتری و تعداد نقاط  $k$  برای مش‌بندی منطقه اول بریلوین برای نمونه موردنظر  $1 \times 3 \times 3$  در نظر گرفته شده است. برای واهلش ساختار، از نیرویی معادل با  $0.5 \text{ eV/\AA}$  بهره گرفتیم. شکل (۱) ساختار مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه با نمایی از بالا و جانب را نشان می‌دهد. اتم‌های گوگرد، زردرنگ و اتم‌های مولیبدن به رنگ آبی نمایش داده شده‌اند. ثابت شبکه ساختار و طول پیوند مولیبدن-سولفور به ترتیب  $3.16$  و  $2.41$  آنگستروم می‌باشند.

### ۳- نتایج و بحث

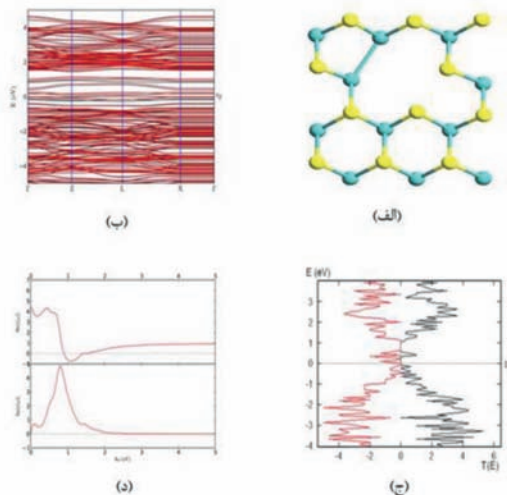
برای درک نقص‌های ساختاری و عملکرد آن بر روی سیستم مورد نظر، ابتدا مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه بدون نقص از نظر خواص الکتریکی و نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۲) ساختار نوار، طیف انتقال و تابع دی‌الکتریک مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه ذاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: الف) ساختار نوار، ب) طیف انتقال، رنگ قرمز نمایشگر اسپین پائین و رنگ مشکی معرف اسپین بالاست و ج) تابع دی‌الکتریک مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه. همان‌گونه که از شکل (۲) مشاهده می‌شود، مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه دارای شکاف نوری برابر با  $1.82 \text{ eV}$  می‌باشد که در توافق خوبی با نتایج به‌دست آمده از روش تنگ بست در [۷] می‌باشد. طیف انتقال این ساختار نشان از تقارن حالت اسپین بالا و پایین دارد. این نتایج نیز در مقایسه با نتایج حاصله در [۱۲] دارای تطابق بسیار خوبی است. علاوه بر این، قسمت موهومی طیف تابع دی‌الکتریک که مرتبط با ضریب جذب نوری است، دارای اولین بیشینه در محدوده شکاف نوار انرژی است. این موضوع نشان‌دهنده کاربرد این ماده در ادوات اپتوالکترونیک است. نتایج حاصل از طیف تابع دی‌الکتریک ساختار مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه با روش DFT در این پژوهش، در توافق بسیار خوبی با نتایج به‌دست آمده از روش تنگ بست در [۷] و [۸] است. حال برای بررسی تاثیر نقص بر روی ویژگی‌های مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه، در این پژوهش، پنج نوع نقص نقطه‌ای تحت مطالعه قرار می‌گیرد. شکل‌های (۳) و (۴) خواص الکترونیکی و نوری مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه دارای نقص را به ترتیب در حضور جای خالی یک اتم گوگرد و دو اتم گوگرد نشان می‌دهند.

نقص از نوع تهی جای یک اتم گوگرد، منجر به کاهش انرژی شکاف نوار ساختار به  $1.1 \text{ eV}$  و همچنان با شکاف مستقیم می‌گردد. نخستین بیشینه قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک نیز در  $1 \text{ eV}$  اتفاق می‌افتد.

گوگرد منجر به شکاف نواری کمتر از حالت ذاتی می‌شود و این شکاف همچنان مستقیم باقی می‌ماند، در حالیکه حذف دو اتم گوگرد منجر به غیرمستقیم شدن شکاف نواری می‌گردد. برداشتن اتم مولیبدن نیز موجب فلزی و مغناطیسی شدن ساختار می‌گردد. این نتایج در جهت کنترل نقص‌های ساختاری به منظور دستیابی به ادوات الکترونیکی مناسب ضروری به نظر می‌رسد.

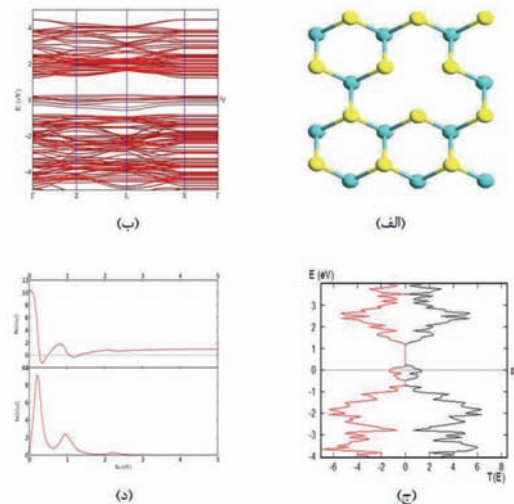


شکل ۷: الف) ساختار اتمی مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه با حذف یک اتم مولیبدن و دو اتم گوگرد. ب) ساختار نواری، ج) طیف انتقال، د) قسمت موهومی و حقیقی تابع دی‌الکترونیک. این ساختار

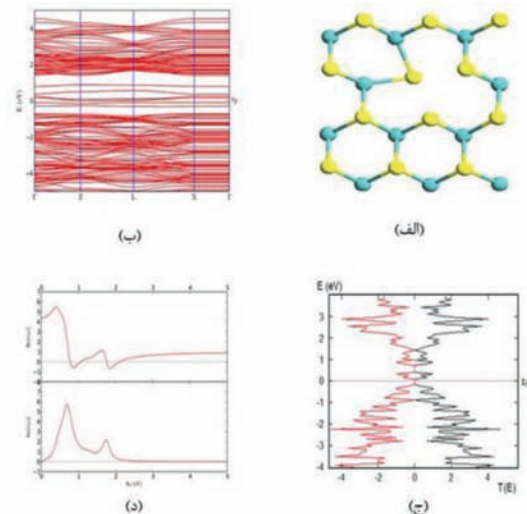
#### مراجع

- [1] Novoselov, K.S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T.J., Khotkevich, V.V., Morozov, S.V. and Geim, A.K., 2005. Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), pp.10451-10453.
- [2] Neto, A.C., Guinea, F., Peres, N.M., Novoselov, K.S. and Geim, A.K., 2009. The electronic properties of graphene. *Reviews of modern physics*, 81(1), p.109.
- [3] Mayorov, A.S., Gorbachev, R.V., Morozov, S.V., Britnell, L., Jalil, R., Ponomarenko, L.A., Blake, P., Novoselov, K.S., Watanabe, K., Taniguchi, T. and Geim, A.K., 2011. Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature. *Nano Letters*, 11(6), pp.2396-2399.
- [4] Yoffe, A.D., 1993. Low-dimensional systems: quantum size effects and electronic properties of semiconductor microcrystallites (zero-dimensional systems) and some quasi-two-dimensional systems. *Advances in Physics*, 42(2), pp.173-262.
- [5] Kuc, A., Zibouche, N. and Heine, T., 2011. Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide T S 2. *Physical Review B*, 83(24), p.245213.
- [6] Kadantsev, E.S. and Hawrylak, P., 2012. Electronic structure of a single MoS2 monolayer. *Solid State Communications*, 152(10), pp.909-913.
- [7] Nayeri, M., Fathipour, M. and Goharrizi, A.Y., 2016. The effect of uniaxial strain on the optical properties of monolayer molybdenum disulfide. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(45), p.455103.
- [8] Nayeri, M., Fathipour, M. and Goharrizi, A.Y., 2016, May. The effect of uniaxial strain on the electronic structure of monolayer MoS 2. In 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 267-270). IEEE.
- [9] Wang, W., Yang, C., Bai, L., Li, M. and Li, W., 2018. First-principles study on the structural and electronic properties of monolayer MoS2 with S-vacancy under uniaxial tensile strain. *Nanomaterials*, 8(2), p.74.
- [10] J.P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, 1996. Generalized gradient approximation made simple. *Physical Review Letters* 77, pp.3865-3868.
- [11] Kresse, G., and Furthmuller, J., 2002, Vienna ab-initio simulation package (VASP): The guide. VASP Group, Institut für Materialphysik, Universität Wien, Sensengasse, 8.
- [12] Nayeri, M., Moradinasab, M. and Fathipour, M., 2018. The transport and optical sensing properties of MoS2, MoSe2, WS2 and WSe2 semiconducting transition metal dichalcogenides. *Semiconductor Science and Technology*, 33(2), p.025002.

\*\*\*



شکل ۵: الف) ساختار اتمی مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه با تهی جای یک اتم مولیبدن. ب) ساختار نواری، ج) طیف انتقال، د) قسمت موهومی و حقیقی تابع دی‌الکترونیک.



شکل ۶: الف) ساختار اتمی مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه با حذف یک اتم گوگرد به همراه یک اتم مولیبدن. ب) ساختار نواری، ج) طیف انتقال، د) قسمت موهومی و حقیقی تابع دی‌الکترونیک.

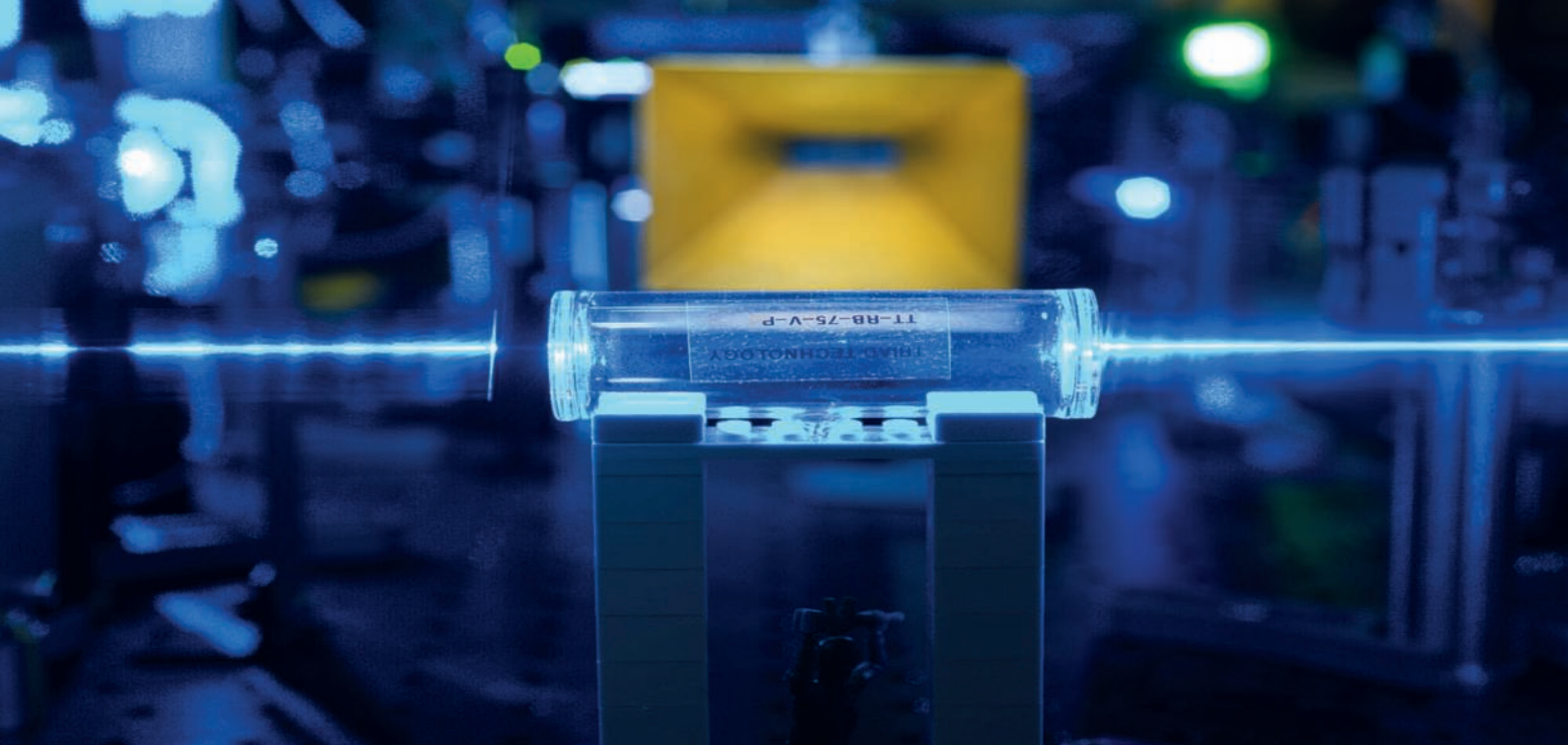
برداشتن یک اتم گوگرد به همراه یک اتم مولیبدن موجب کاهش شکاف نواری به میزان  $0.09 \text{ eV}$  می‌گردد و گذاری از شکاف نواری مستقیم به غیرمستقیم رخ می‌دهد (شکل ۶).

نخستین بیشینه قسمت موهومی تابع دی‌الکترونیک در  $0.68 \text{ eV}$  رخ می‌دهد. آخرین ساختار تحت مطالعه، مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه دارای نقص جای خالی یک اتم مولیبدن و دو اتم گوگرد می‌باشد. شکل (۷) ویژگی‌های این ساختار را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل (۷) مشاهده می‌شود این ساختار رفتار فلزی و مغناطیسی از خود به نمایش می‌گذارد. با توجه به اینکه نقص‌های ساختاری در نیمه‌هادی‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد، مطالعه اثرات آن‌ها در شناسایی مکانیزم کنترل نقص اهمیت به‌سزایی دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تاثیر نقص‌های نقطه‌ای بر روی خواص الکترونیکی، نوری و مغناطیسی مولیبدن دی‌سولفید تک‌لایه مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه با استفاده از محاسبات اصول اولیه و بر روی پنج نقص تهی جای، انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن است که تهی جای یک اتم



مقاله علمی-ترویجی

## مروری بر حسگرهای کوانتومی

پریناز سیف الدینی/دانشجوی دکتری نانوالکترونیک/ دانشکده فنی و مهندسی/ دانشگاه تهران/ seifaddini@ut.ac.ir

حسین آقابابا / استادیار مهندسی برق / دانشکده فنی و مهندسی / دانشگاه تهران / aghababa@ut.ac.ir

### چکیده

سنجش کوانتومی با استفاده از سیستم کوانتومی، خواص کوانتومی یا پدیده‌های کوانتومی، اندازه‌گیری یک مقدار فیزیکی را توصیف می‌کند. حسگرهای کوانتومی می‌توانند به حساسیت‌هایی برسند، که طبق قوانین متعارف فیزیک که زندگی روزمره را کنترل می‌کنند، غیرممکن باشد. این سطح حساسیت تنها به لطف دنیای مکانیک کوانتومی با خواص جذاب آن، مانند برهم‌نهی که در آن اتم می‌تواند در آن واحد در دو تراز مختلف انرژی باشد، قابل حصول است. نمونه‌های تاریخی حسگرهای کوانتومی شامل مغناطیس‌سنجی‌ها مبتنی بر دستگاه‌های تداخل کوانتومی ابررسانا و بخارات اتمی یا ساعت‌های اتمی است. به تازگی، سنجش کوانتومی به یک شاخه مجزا از تحقیقات در حال رشد در حوزه علم و فناوری کوانتومی تبدیل شده است، با رایج‌ترین سطوح که به کیوبیت‌های اسپینی، یون‌های به دام افتاده و کیوبیت‌های شار می‌پردازند. انتظار می‌رود این زمینه فرصت‌های جدیدی را با توجه به حساسیت و دقت بالا در فیزیک کاربردی و سایر زمینه‌های علمی فراهم کند. در این بررسی، مقدمه‌ای بر اصول اساسی، مفاهیم و کاربردهایی از حسگرهای کوانتومی ارائه خواهد شد.

**کلمات کلیدی:** سنجش کوانتومی، حسگر کوانتومی، تکنولوژی کوانتومی.

## Review of Quantum Sensors

Parinaz Seifaddini/ Department of Electrical and Computer Engineering/ Faculty of Engineering/ University of Tehran/ Tehran, Iran  
seifaddini@ut.ac.ir

Hossein Aghababa\*/ Department of Electrical and Computer Engineering/ Faculty of Engineering/ University of Tehran/ Tehran, Iran  
aghababa@ut.ac.ir

\*Corresponding Author

### Abstract

Using quantum systems, properties or phenomena are particular ways to measure a physical quantity. Quantum sensors are eligible to reach sensitivities that are not justifiable due to the usual physics laws. This level of sensitivity is only accessible by the quantum mechanic world and its inspiring features such as the possibility for simultaneous atoms presence at the two different energy bands. Magnetometers based on superconductive quantum interference systems or atomic clocks are historic examples of quantum sensors. Recently, quantum sensing has become a separate branch of progressing investigations in quantum science and technology, which points to spin qubits, trapped ions, and flux qubits. According to

the high sensitivity and accuracy of the quantum sensors, it can open many new opportunities in the realm of applicable physics and other scientific fields. In this study, we present an introduction to basic principles, concepts, and applications of quantum sensors.

**Keywords:** Quantum measurement, Quantum sensor, Quantum technology.

## ۱- مقدمه

فناوری کوانتومی شامل محاسبات، ارتباطات، تصویربرداری و حسگرها است. آخرین مورد از این چهار زمینه، حسگرهای کوانتومی است، که داده‌های کیفی جدیدی را در مورد جهان ما ارائه می‌دهند، که می‌توانند به اطلاعات ارزشمندی در مورد محیط‌زیست ما تبدیل شوند. حسگرهای کوانتومی با خصوصیات قابل توجه از جمله حساس‌تر، دقیق‌تر و پایدارتر از فناوری کوانتومی، می‌توانند موجب تغییر در کارایی شوند. این حسگرها می‌توانند منجر به کاربردهای جدیدی شوند، که فقط با چنین بهبودهایی امکان‌پذیرند و کاربردهایی در زمینه هوا فضا، اقلیم، ساخت‌وساز، دفاع، انرژی، سلامت، امنیت، حمل و نقل و آب را در برمی‌گیرد، که قابل عرضه به بازارهای بزرگ می‌باشد.

حسگرهای کوانتومی، روی ضعف سیستم‌های کوانتومی یا در واقع حساسیت قوی آن‌ها به اختلالات خارجی، سرمایه‌گذاری می‌کنند. این روند در فناوری کوانتومی، یادآور تاریخ نیمه‌رساناهاست. بسیاری از دانشمندان معتقدند که کوانتوم از اولین موفقیت تجاری واقعی‌اش در حسگری لذت خواهد برد. اگرچه سنسج کوانتومی به عنوان یک حوزه‌ی پژوهشی جدا در علوم کوانتومی و مهندسی، کاملاً جدید است، اما بسیاری از مفاهیم آن در جامعه‌ی فیزیک، به خوبی شناخته شده و از دهه‌ها توسعه در طیف‌سنجی وضوح بالا، به ویژه در فیزیک اتمی و تشدید مغناطیسی، حاصل شده است. مثال‌های مهم در این زمینه، ساعت‌های اتمی، مغناطیس‌سنج‌های بخار اتمی و دستگاه‌های تداخل کوانتومی ابررسانا هستند. ابزارهایی که می‌توانند لقب جدید در حوزه سیستم‌های کوانتومی بگیرند، به طور فزاینده‌ای در سطح تک‌اتمی بررسی می‌شوند، جایی که از درهم‌تنیدگی به عنوان منبعی برای افزایش حساسیت استفاده می‌شود و سیستم‌های کوانتومی و دستکاری‌های کوانتومی به‌طور ویژه برای اهداف حسگری، طراحی و مهندسی می‌شوند [۱].

این پژوهش ابتدا با ارائه برخی از تعاریف اساسی برای سنسج کوانتومی و با ذکر معیارهای ابتدایی برای در نظر گرفتن یک سیستم کوانتومی به‌عنوان حسگر کوانتومی آغاز می‌شود، سپس به معرفی انواع حسگرهای کوانتومی و کارهایی که در این زمینه انجام شده پرداخته شده است. در ادامه نحوه تجاری‌سازی و پرکاربردترین حسگرهایی که وارد بازار شده‌اند شرح داده شده و در نهایت با چشم‌انداز مختصری در مورد آینده ممکن این حسگرها و نتیجه‌گیری در مورد هر آنچه که در این مقاله بررسی شد این بحث به پایان می‌رسد.

## ۱-۱- تعریف موضوع تحقیق

### ۱-۱-۱- سنسج کوانتومی

عبارت سنسج کوانتومی، به‌طور معمول برای توصیف یکی از موارد زیر استفاده می‌شود:

۱- استفاده از یک شی کوانتومی برای اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی (کوانتومی یا کلاسیکی). شی کوانتومی، با سطوح انرژی کوانتیده مشخص می‌شود، به‌عنوان مثال حالات ارتعاشی، مغناطیسی یا الکترونی کیوبیت‌های اسپینی یا ابررسانا یا اتم‌های خنثی.

۲- استفاده از همدوسی کوانتومی (یعنی حالات برهم نهی زمانی یا

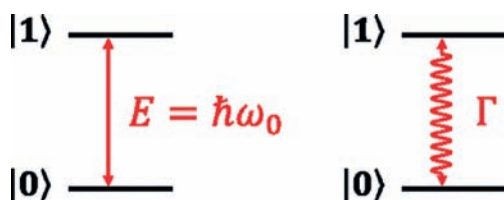
فضایی موج مانند) برای اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی. ۳- استفاده از درهم‌تنیدگی کوانتومی<sup>۲</sup> برای بهبود حساسیت یا دقت یک اندازه‌گیری، فراسوی چیزی که به‌طور کلاسیکی، ممکن است. از این سه تعریف، دو مورد اول، گسترده‌تر بوده و بسیاری از سیستم‌های فیزیکی را پوشش می‌دهند، حتی برخی از سیستم‌هایی که به‌طور کامل کوانتومی نیستند؛ مثلاً تداخل موج کلاسیکی که در سیستم‌های نوری یا مکانیکی ظاهر می‌شود. سومین تعریف، یک تعریف به‌درستی کوانتومی است. با این حال، از آنجایی که حسگرهای کوانتومی تعاریف یک و دو، اغلب به کاربردها نزدیک‌تر هستند، بیشتر بر آن‌ها تمرکز خواهد شد [۱].

### ۱-۱-۲- حسگرهای کوانتومی

مشابه با معیارهای دیوینچنزو<sup>۳</sup> برای محاسبات کوانتومی، می‌توان مجموعه‌ای از چهار ویژگی لازم برای یک سیستم کوانتومی برای عمل به‌عنوان یک حسگر کوانتومی را لیست کرد. این ویژگی‌ها شامل سه معیار اصلی دیوینچنزو می‌شود:

۱- سیستم کوانتومی، سطوح انرژی قابل حل و گسسته دارد. به‌طور خاص، ما این سیستم را، یک سیستم دوترانه با یک حالت انرژی پایین‌تر  $|0\rangle$  و یک حالت انرژی بالاتر  $|1\rangle$ ، که به‌وسیله‌ی یک انرژی گذار  $E = \hbar\omega_0$  جدا می‌شوند، فرض خواهیم کرد. (شکل ۱). ۲- آماده‌سازی سیستم کوانتومی به یک حالت شناخته‌شده و خواندن حالتش، ممکن است

۳- سیستم کوانتومی می‌تواند به‌طور همدوس، به‌طور معمول با میدان‌های وابسته به زمان دستکاری شود. این شرط، به‌طور قطع برای تمام پروتکل‌ها لازم نیست، مثال‌هایی مانند، طیف‌سنجی موج پیوسته یا اندازه‌گیری‌های سرعت آسایش این معیار را ندارند.



شکل ۱: شکل‌های سیستم کوانتومی دو حالت؛ که  $|0\rangle$  حالت انرژی پایین و  $|1\rangle$  حالت انرژی بالا می‌باشد [۱]

تمرکز روی سیستم‌های دوترانه ۱، یک محدودیت سخت نیست، زیرا بسیاری از ویژگی‌های سیستم‌های کوانتومی پیچیده‌تر می‌توانند از طریق یک حسگر کیوبیتی مدل شوند. چهارمین ویژگی، مختص حسگری کوانتومی است.

۴- سیستم کوانتومی با یک کمیت فیزیکی  $v(t)$ ، مانند یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی برهمکنش می‌کند. برهمکنش، با یک پارامتر عبور یا جفت‌شدگی به فرم  $\hat{q} \partial v / \partial \hat{q} = \gamma$  که تغییرات انرژی گذار  $E$  را به تغییرات پارامتر خارجی  $V$  مربوط می‌کند، سنجیده می‌شود. بیشتر مواقع، جفت‌شدگی یا خطی ( $q=1$ ) و یا مربعی ( $q=2$ ) است. برهمکنش با پارامتر خارجی، منجر به یک

جابه‌جایی در ترازهای انرژی سیستم کوانتومی یا انتقالات بین سطوح انرژی می‌شود [۱].

## ۲- انواع حسگرهای کوانتومی

در این بخش مروری بر معرفی برخی حسگرهای کوانتومی، مکانیزم حسگری آن‌ها و همچنین مهم‌ترین آزمایشات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود:

### ۲-۱- ابرهای اتمی سرد

ظهور سردسازی لیزری در دهه ۱۹۸۰، منجر به انقلابی در حسگری اتمی شد. رایج شدن سرعت کاهش یافته اتم‌های سرد، حسگری با زمان‌های طولانی‌تر را با استفاده از اتم‌های محدود به لحاظ فضایی امکان‌پذیر کرد، که در طول مسیرهای خاص در خلا یا تله، سقوط آزاد می‌کردند. سقوط آزاد اتم‌ها، توسعه‌ی گرانسج‌های اتمی و ژیرسکوپ‌ها را امکان‌پذیر کرده است. در این دستگاه‌ها، یک ابر اتمی، شتاب را با حسگری جابه‌جایی فاز فضایی یک پرتوی لیزر در طول مسیر سقوط آزادش، اندازه می‌گیرد. اتم‌های به دام افتاده، برای آشکارسازی و تصویربرداری میدان‌های مغناطیسی در مقیاس میکرو به کار گرفته شده‌اند. بی‌شک پیشرفته‌ترین اثبات‌های حسگری کوانتومی در هم تنیدگی بهبود یافته، در اتم‌های سرد به دام افتاده و سلول‌های بخار، اجرا شده‌اند. در هم تنیدگی به شکل فشردگی اسپین، با اندازه‌گیری‌های غیرمخرب نوری جمعیت اتمی و برهمکنش‌های اتمی تولید شده است [۱].

### ۲-۱-۱- تداخل سنج اتمی سرد چند محوره

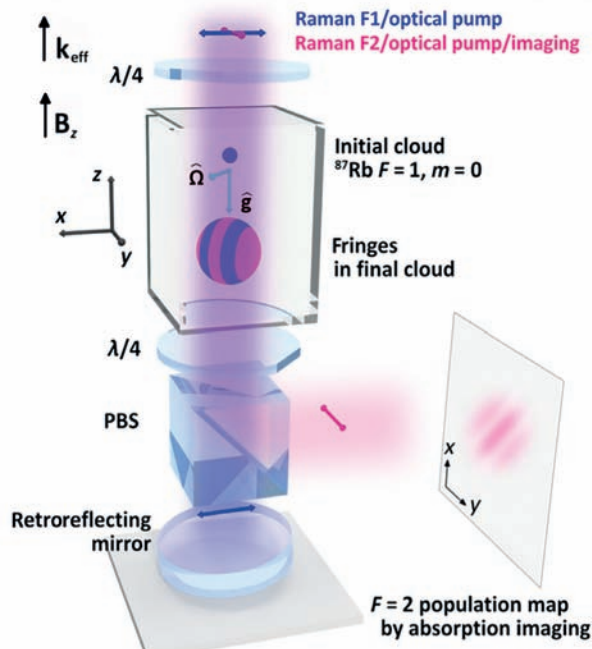
محققان موسسه ملی استاندارد و فناوری (NIST)، ژیروسکوپ اتمی خود را از لحاظ توانایی‌های اندازه‌گیری چندکاره و اندازه‌گیری‌های دقیق، ارتقا داده‌اند. تداخل سنج اتمی می‌تواند در ناوبری و زمین‌شناسی (مطالعه شکل زمین براساس اندازه‌گیری گرانش) به دلیل حساسیت آن به شتاب و چرخش همراه با ثبات و دقت مورد استفاده قرار گیرد.

ساختار ژیروسکوپ، یک محفظه شیشه‌ای با حجم ۱ سانتی‌متر مکعب حاوی حدود ۱۰ میلیون اتم روبیدیوم سرد است که به دام می‌افتند و رها می‌شوند (شکل ۲).

حساسیت‌های ژیروسکوپ NIST برای بزرگی و جهت اندازه‌گیری چرخش به ترتیب ۰/۳۳ درجه در ثانیه و ۰/۲۷ درجه با زمان متوسط یک ثانیه است. علاوه بر این، ژیروسکوپ NIST از این جهت منحصر به فرد است، که می‌تواند چرخش‌ها را در طول دو محور و شتاب در امتداد یک محور به‌طور همزمان با یک منبع واحد اتم اندازه‌گیری کند.

در این ژیروسکوپ، هنگامی که اتم‌ها ابتدا در یک ابر به دام می‌افتند، تحت اثر جاذبه قرار گرفته و رها می‌شوند، پرتوی لیزر باعث می‌شود، که آن‌ها از بین دو حالت انرژی عبور کنند. این فرآیند شامل جذب و انتشار ذرات سبک است، که به حرکت اتم‌ها می‌انجامد و باعث می‌شود که امواج ماده آن‌ها از هم جدا شوند و بعداً باز ترکیب شوند. هنگامی که اتم‌ها سرعت یا چرخش می‌یابند، امواج ماده آن‌ها تغییر می‌کنند و به روش‌های قابل پیش‌بینی تداخل می‌یابند.

اتم‌ها با درخشش پرتو لیزر ضعیف دوم از طریق ابر، تصویر می‌شوند. از آنجاکه اتم‌ها در حالت‌های مختلف انرژی، نور فرکانس‌های مختلف را جذب می‌کنند، تصاویر نوارهای مداخله‌ای از جمعیت اتم را در دو حالت مختلف نشان می‌دهند. سرعت چرخش و محور چرخش با تجزیه و تحلیل فاصله و جهت باندهای تداخل در ابر اتم و شتاب از تغییرات در موقعیت باند مرکزی اندازه‌گیری می‌شود [۲].



شکل ۲: سلول خلاء شیشه‌ای و اپتیک‌های بسته علمی PSI. ابعاد داخلی سلول شیشه‌ای ۲۱cm است. ابزار شتاب را در جهت z و تصویربرداری چرخشی را روی صفحه x-y اندازه می‌گیرند. [۲]

### ۲-۱-۲- پایدارسازی بخار فلزات قلیایی به کمک نانوذرات طلا

روشی که دانشمندان برای پایدار کردن چگالی بخار فلز قلیایی ابداع کرده‌اند، استفاده از نانوذرات طلا است. دانشمندان با پوشاندن دیواره داخلی ظروف به‌وسیله‌ی نانوذرات طلا که ۳۰۰ هزار برابر کوچک‌تر از قطر یک سنجاق هستند، یک روش هوشمندانه برای کنترل بخار طراحی کرده‌اند. وقتی نور سبز لیزر به نانوذرات طلا تابیده می‌شود، آن‌ها نور را به سرعت جذب کرده و به گرما تبدیل می‌کنند، که باعث می‌شود بخار گرم شده و هزار برابر سریع‌تر از روش‌های دیگر، درون ظرف پخش شود. این فرآیند به شدت، تجدیدپذیر است؛ علاوه بر این، دانشمندان دریافتند پوشش جدید نانوذرات طلا، حالت‌های کوانتومی اتم‌های فلز قلیایی را حفظ می‌کند.

نتایج این پژوهش در سردسازی اتمی، ساعت‌های اتمی و طیف‌سنجی با وضوح بالا، قابل استفاده است. پوشش نانوذرات طلا، کنترل بیرونی و سریع چگالی بخار و عمق اپتیکی مربوطه را امکان‌پذیر می‌کند [۳].

### ۲-۲- اتم‌های ریدبرگ<sup>۵</sup>

اتم‌های ریدبرگ (اتم‌هایی در بالاترین حالات الکترونی برانگیخته)، حسگرهای کوانتومی مهمی برای میدان‌های الکتریکی هستند. در یک تصویر کلاسیکی، الکترون با تقید کمتر در یک مدار برانگیخته بالا، به راحتی توسط میدان الکتریکی، جابه‌جا می‌شود. در یک تصویر کوانتومی، حالات حرکتی آن با گذارهای دو قطبی الکتریکی قوی جفت می‌شود و جابه‌جایی‌های قوی استارک<sup>۶</sup> را تجربه می‌کند. تهیه و خواندن حالات، از طریق طیف‌سنجی و برانگیختگی لیزر، ممکن است.

یکی از برجسته‌ترین کاربردهای اتم‌های ریدبرگ در خلا، استفاده از آن‌ها به‌عنوان آشکارسازهای تک‌فوتون برای فوتون‌های ریزموج در یک کاواک کرایونیک در یک سری آزمایش‌هایی است که در جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۲ مشهور شدند. این حساسیت به‌تازگی بهبود داده شده با به‌کارگیری شرودینگر که حالات را به سطح  $30 \text{ nV/m}/\sqrt{\text{Hz}}$  ساده است. به‌تازگی حالات ریدبرگ در سلول‌های

بخار اتمی، قابل دسترس شده‌اند. این حسگرها برای حس کردن میدان‌های الکتریکی ضعیف، بیشتر در محدوده فرکانسی گیگاهرتز به کار گرفته شده‌اند [۱].

### ۲-۲-۱- به دام انداختن اتم‌های ریدبرگ به روش هولوگرافیکی

باردو<sup>۶</sup> و همکارانش یک روش هولوگرافیکی را ثابت کرده‌اند، که می‌تواند اتم‌های منفرد ریدبرگ را در الگوی نوری سه‌بعدی در مکانی با دقت میکرومتر، که مورد نیاز کاربردهای اطلاعات کوانتومی است، نگه دارند. قبل از این، محدودسازی سه‌بعدی تنها با دقت میلی‌متر و با استفاده از میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی قابل دستیابی بود. روش کار به این صورت بود، که آن‌ها کار خود را با یک اتم منفرد روبیدیم خنثی که با استفاده از انبرک‌های نوری استاندارد به دام انداخته بودند، شروع کردند و سپس با غیرفعال کردن انبرک‌ها، اتم را به حالت ریدبرگ برانگیخته کردند، سپس بلافاصله اتم را در مرکز یک الگوی سه‌بعدی از شدت نور به دام انداختند. نتیجه این می‌شود که، الگوی سه‌بعدی نور با پراش یک اشعه‌ی لیزر منتشر شده از یک مدولاتور نوری فضایی ایجاد می‌شود، که تداخل امواج، یک محل تاریک به وجود می‌آورد. آن‌ها دریافتند که می‌توانند یک اتم را به مدت ۲۲۸ میکروثانیه در دمای اتاق، در حالت برانگیخته‌ی ریدبرگ نگه دارند. در این مدت، آن‌ها از ریزامواج برای جابه‌جایی اتم بین دو سطح ریدبرگ استفاده کردند. همچنین برهمکنش‌های بین اتم‌های ریدبرگ را با وادار کردن اتم‌های موجود در تله‌های مجاور به جابه‌جایی حالت‌ها ثابت کردند. این برهمکنش‌ها برای ایجاد گیت‌های منطقی کوانتومی ضروری هستند [۴].

### ۲-۲-۲- حسگر تراهرتز

فیزیکدانان کوانتومی به حسگری کوانتومی به‌عنوان روشی جذاب برای دستیابی به نواحی طیفی و آشکارسازی فوتون‌ها (بسته‌های ریز تشکیل دهنده نور) که به‌طور عموم به لحاظ تکنیکی چالش برانگیز هستند، تکیه می‌کنند. آن‌ها می‌توانند اطلاعات نمونه را در نواحی طیفی مورد علاقه جمع‌آوری کرده و جزئیات آن را از طریق همبستگی‌های دو فوتون و با استفاده از آشکارسازهای بسیار حساس، به یک گستره طیفی دیگر منتقل کنند. این کار به‌ویژه برای آشکارسازی تابش تراهرتز بدون آشکارسازهای نیمه‌رسانا، که در آن فیزیکدانان باید به جای آن از طرح‌های آشکارسازی همدوس یا بولومترهای سرد شده به روش کرایونیک استفاده کنند، مفید است. در این مقاله، کوتاس و همکارانش فوتون‌های تراهرتز (ایدلر) را توسط تبدیل پایین پارامتریک خود به خودی (SPDC)<sup>۷</sup> و با استفاده از فوتون‌های پمپ در ۶۶۰ نانومتر تولید کردند، تا فوتون‌های سیگنال در طول موجی در حدود ۶۶۱ نانومتر (بسیار نزدیک به طیف طول موج پمپ) را تولید کنند. انرژی اندک فوتون‌های ایدلر در گستره تراهرتز، سهم قابل توجهی از افت و خیزهای حرارتی را دریافت کردند تا در حالت گرمایی قرار گیرند.

دانشمندان از یک لیزر حالت جامد فرکانس دو برابر شده با طول موج ۶۶۰ نانومتر به‌عنوان منبع پمپ کننده استفاده کرده و این فوتون‌ها را با استفاده از یک توری براگ حجمی (VBG)<sup>۹</sup> با تداخل سنج جفت کردند. آن‌ها یک بلور PPLN<sup>۱۰</sup> (لیتیوم نیوبات با قطبش تناوبی) و تناوب قطبش را به‌عنوان محیط غیرخطی انتخاب کردند، تا فوتون‌های مرئی (سیگنال) و فوتون‌های ایدلر متناظر، در ناحیه تراهرتز را تولید کنند. محققان، یک شیشه با پوشش ITO<sup>۱۱</sup> را به‌منظور تفکیک فوتون‌های ایدلر از فوتون‌های پمپ و سیگنال، در پشت بلور قرار دادند؛ سپس به‌طور مستقیم تابش پمپ و سیگنال را با استفاده از یک آینه مقعر به داخل بلور متمرکز کردند. از آنجا که ضریب شکست

لیتیوم نیوبات (LiNbO<sub>3</sub>) در گستره فرکانسی تراهرتز منجر به یک زاویه پراکندگی بزرگ پرتوهای ایدلر می‌شود، آن‌ها با استفاده از یک آینه سهموی، این پرتوها را جمع‌آوری کرده و تابش ایدلر را از یک آینه تخت که روی یک پایه خطی پیزوالکتریک قرار داشت، منعکس کردند. آن‌ها پس از دو بار عبور از بلور، باریک‌های پمپ و سیگنال را جمع‌آوری کرده و فوتون‌های پمپ را با استفاده از سه توری براگ حجمی، فیلتر کردند. این گروه از یک دوربین نیمه رسانای فلز-اکسید مکمل علمی (sCMOS) سردنشده به‌عنوان آشکارساز استفاده کردند.

به این ترتیب، میرکو کوتاس و همکارانش، تداخل کوانتومی در گستره فرکانسی تراهرتز را با انتشار فوتون‌های تراهرتز در فضای آزاد، مشاهده کردند. آن‌ها ظرفیت استفاده از این تکنیک برای تعیین ضخامت نواحی مختلف PTFE را به‌عنوان شاهدهی بر کاربردهای گستره فرکانسی تراهرتز نشان دادند [۵].

### ۲-۲-۳- حسگر میدان الکتریکی باند گسترده

یک حسگر کوانتومی می‌تواند به سربازان در تشخیص سیگنال‌های ارتباطی، در تمام طیف فرکانس رادیویی از ۰ تا ۱۰۰ گیگاهرتز کمک کند. چنین پوشش طیف گسترده‌ای توسط یک آنتن واحد با یک سیستم گیرنده سنتی غیرممکن است، و نیاز به چندین سیستم آنتن، تقویت‌کننده و اجزای دیگر دارد.

در سال ۲۰۱۸ دانشمندان ارتش اولین افراد در جهان بودند که گیرنده کوانتومی را ایجاد کردند، که از اتم‌های بسیار هیجان‌انگیز و فوق‌العاده حساس - معروف به اتم‌های ریدبرگ - برای شناسایی سیگنال‌های ارتباطی استفاده می‌کرد. حسگرهای جدید می‌توانند بسیار کوچک و عملاً غیرقابل تشخیص باشند و مزیت‌های منحصر به فردی را برای سربازان فراهم کنند. حسگرهای مبتنی بر اتم ریدبرگ اخیراً برای کاربردهای سنسجش میدان الکتریکی عمومی از جمله به‌عنوان گیرنده ارتباطات در نظر گرفته شده‌اند. برای ارزیابی کاربردهای بالقوه، دانشمندان ارتش تجزیه و تحلیل حساسیت حسگر ریدبرگ در برابر نوسانات میدان‌های الکتریکی را در طیف عظیمی از فرکانس‌ها از ۰ تا ۱۰۱۲ هرتز انجام دادند. نتایج نشان داد که حسگر ریدبرگ می‌تواند سیگنال‌های قابل اعتماد را در کل طیف تشخیص داده و با سایر فن‌آوری‌های حسگر میدان الکتریکی موجود، مانند کریستال‌های الکترونیکی و الکترونیک غیرفعال آنتن قطبی مقایسه کند.

با استفاده از مکانیک کوانتومی می‌توان کالیبراسیون حسگر و عملکرد نهایی را به میزان بسیار بالایی شناخت که این برای هر حسگری یکسان است. این کار از اولویت‌های نوسازی ارتش در شبکه‌های رایانه‌ای نسل بعدی و از موقعیت امن، هوانوردی و زمان‌بندی پشتیبانی می‌کند، زیرا می‌تواند مفاهیم جدید ارتباطات یا رویکردهای تشخیص سیگنال‌های RF برای جغرافیایی را تحت تاثیر قرار دهد [۶].

### ۲-۳- ساعت‌های اتمی

در نگاه اول، به نظر می‌رسد ساعت‌های اتمی (کیوبیت‌هایی با گذارهایی آنقدر غیرحساس که شکافتگی تراز آن‌ها می‌تواند به‌صورت مطلق در نظر گرفته شده و به‌عنوان یک مرجع فرکانسی به کار گرفته شود) نمی‌توانند به‌عنوان حسگرهای کوانتومی در نظر گرفته شوند، زیرا تعریف آن‌ها، معیار ۴ ذکر شده در تعریف حسگرها را نقض می‌کند. با این حال عملکرد آن‌ها به‌عنوان ساعت، پروتکل‌های یکسانی مانند عملکرد حسگرهای کوانتومی به کار می‌گیرد، تا مدام گذار کیوبیت را با فرکانس یک نوسانگر محلی غیرپایدار مقایسه کند. بنابراین یک ساعت اتمی می‌تواند به‌عنوان یک حسگر کوانتومی که



رانش فاز یک نوسانگر محلی را اندازه‌گیری و پایدار می‌کند، در نظر گرفته شود. پیشرفته‌ترین ساعت‌های اتمی امروزی، گذارهای نوری را در تک‌یون‌ها یا ابرهای اتمی به دام افتاده در یک شبکه نوری به کار می‌گیرند [۱].

### ۲-۳-۱- ساعت اتمی با استفاده از انبرک نوری

نورسیا<sup>۱۲</sup> و همکارانش طرح یک ساعت اتمی نوین را ثابت کرده‌اند، که ترکیبی از عملیات به‌طور تقریبی پیوسته با سیگنال‌های قوی و پایداری بالاست. ویژگی‌هایی که به‌طور همزمان، در هیچ یک از انواع ساعت‌های اتمی فعلی وجود ندارد. این ساعت جدید، از انبرک‌های لیزری برای به‌دام انداختن، کنترل و منزوی کردن اتم‌ها استفاده می‌کند. بستر این ساعت جدید، آرایه‌ای از بیش از ۱۰ اتم استرانسیم است، که به‌صورت جداگانه توسط ۱۰ انبرک نوری محدود شده‌اند. این انبرک‌های نوری توسط اشعه‌ی لیزر مادون قرمز ساخته شده‌اند، که روی یک نقطه کوچک متمرکز می‌شود. امواج رادیویی در ۱۰ فرکانس متفاوت و به‌صورت پی‌درپی به یک منحرف‌کننده‌ی خاص اعمال می‌شوند، تا ۱۰ نقطه‌ی نوری را برای به‌دام انداختن اتم‌های جداگانه بسازند.

تله‌ها، هر چند ثانیه، از یک ابر از پیش سرد شده از اتم‌های دارای همپوشانی با نور انبرک پر می‌شوند و اتم‌های نگه‌داشته‌شده به‌سیله‌ی انبرک‌ها، با یک لیزر پایدار شده به‌وسیله‌ی کاواک بلوری سیلیکونی برانگیخته می‌شوند، جایی که نور در یک فرکانس خاص، به جلو و عقب جهش می‌کند. نور لیزر ساعت به‌صورت عمود بر نور انبرک و در طول یک میدان مغناطیسی اعمال می‌شود. تصویربرداری غیرمخرب نشان می‌دهد که آیا اتم‌ها به درستی کار می‌کنند یا نه، اتم‌ها وقتی در حالت انرژی پایین‌تر باشند، فقط نور تابش می‌کنند یا فلورسانس دارند. ساعت انبرک حتی می‌تواند یک اتم منفرد را به‌سرعت به تله اندازه‌کند که به این معناست که تداخل کمتری وجود دارد و شما سیگنال پایداری را برای زمان طولانی‌تر می‌گیرید. ساعت انبرک کارایی ۹۶٪ را دارا است، زیرا مدت کوتاهی وقفه نیاز دارد تا اتم‌های جدیدی آماده کند [۱۷].

### ۲-۴-۱- اسپین حالت جامد- حسگر مجموعه‌ای

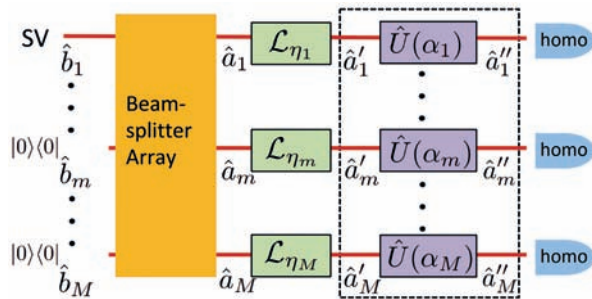
#### ۲-۴-۱-۱- حسگرهای مجموعه‌ای NMR

برخی از نخستین حسگرهای کوانتومی، براساس مجموعه‌های اسپین‌های هسته‌ای ساخته شده‌اند. در این دسته، حسگرهای میدان مغناطیسی، قدرت میدان را از فرکانس لارمور<sup>۱۳</sup> استنتاج می‌کنند، که اسپین‌ها از طریق تعادل گرمایی در یک میدان خارجی، آماده‌سازی می‌شوند. اگرچه حساسیت این دستگاه‌ها (۱۰ pT/√Hz) نسبت به هم‌تایان اتمی آن‌ها زیاد نیست، اما به لطف سادگی و استحکامشان، به‌طور وسیعی در زمین‌شناسی، باستان‌شناسی و ماموریت‌های فضایی استفاده می‌شوند. در پیشرفته‌ترین پیاده‌سازی‌ها، تغییر اسپین هسته‌ای به‌وسیله‌ی یک مغناطیس‌سنج اتمی خوانده می‌شود، در این آزمایشات به حساسیت  $10^{-2}$  rad/s/√Hz - ۵ رسیدند [۱].

#### ۲-۴-۲- حسگر توزیع‌یافته همبستگی کوانتومی

حسگرهای کوانتومی توزیع‌یافته از همبستگی کوانتومی بین چندین حسگر کوانتومی استفاده می‌کنند تا پارامترهای مجهول را با دقتی فراتر از سیستم‌های غیر درهم‌تنیده اندازه‌گیری کنند. در این مقاله از طرحی استفاده می‌شود که در آن درهم‌تنیدگی چندپاره‌ای متغیر- پیوسته به عنوان ابزاری برای افزایش حساسیت کاربرد دارد. در این طرح، یک حالت خلاء از طریق آرایه‌ای از بیم-اسپلیترهای بدون اتلاف بین حسگرهای مختلف شبکه تقسیم می‌شود، که نتیجه آن این است که، خطای rms تخمین پارامتر مورد نظر با نسبت عکس

با تعداد حسگرها مقیاس می‌شود، حدی که آن را حد هایزنبرگ می‌گویند. این در حالی است که در صورتی که بین اجزای شبکه درهم‌تنیدگی وجود نداشته باشد، این خطای تخمین با نسبت عکس مجذور تعداد حسگرها رابطه دارد، حدی که آن را حد استاندارد کوانتومی می‌گویند. در این شبکه، هر چه که اتلاف بیشتر باشد، دقت اندازه‌گیری رو به نزول پیش می‌رود، ولی نکته‌ای که وجود دارد این است که برای مقادیر میانه اتلاف همچنان شرایط برای بهبود خطا وجود دارد. این طرح حسگرهای توزیع یافته می‌تواند برای کالیبره کردن شبکه‌های توزیع کلید کوانتومی متغیر- پیوسته مورد استفاده قرار گیرد و همچنین، برای اندازه‌گیری‌های دمای اتم سرد چند حسگری، و اندازه‌گیری فاز تداخلی توزیع یافته کاربرد دارد (شکل ۳) [۸].



شکل ۳: حسگر توزیع کوانتومی برای اندازه‌گیری جابجایی درجه چهار میدان [۸]

### ۲-۵-۱- مجموعه مرکز خالی از نیتروژن (NV)

اخیرا هیجان زیادی در مورد مجموعه‌های مراکز خالی از نیتروژن (نقص‌های اسپینی الکترونی در الماس که می‌توانند به‌طور نوری آماده‌سازی و خوانده شوند) به‌وجود آمده است. بلورهای الماس با آلایش زیاد، نویدبخش سلول‌های بخار فریزشده‌ی مجموعه‌های اسپین هستند، که ممان مغناطیسی قوی و خوانش نوری کارآمد سلول‌های بخار اتمی را با چگالی‌های بالای اسپین قابل دسترسی در حالت جامد ترکیب می‌کنند. اگرچه کاهش زمان همدوسی، اهمیت این مزایا را تحت تاثیر قرار می‌دهد، اما حساسیت پیش‌بینی‌شده‌ی ژبرسکوپ‌ها ( $10^{-2}$  rad/s/√Hz) یا مغناطیس‌سنج‌های الماس ( $250 \text{ aT}/\sqrt{\text{Hz}/\text{cm}^{-2/3}}$ ) با هم‌تایان اتمی آن‌ها، قابل مقایسه خواهد بود. انتقال چنین پتانسیلی به دستگاه‌های واقعی، به دو دلیل فنی، چالش‌برانگیز است.

اول آشکارسازی کارآمد فلورسانس مجموعه‌های بزرگ NV، دشوار است، در حالی که طرح‌های پراکندگی و جذب، به سادگی پیاده‌سازی نمی‌شوند. دوم اینکه، زمان‌های همدوسی اسپین، ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بار در مجموعه‌های با چگالی بالا کاهش می‌یابند. در نتیجه در حال حاضر، حتی پیشرفته‌ترین دستگاه‌ها با حساسیت چند مرتبه بزرگی بالای حد نظری کار می‌کنند. درحالی‌که حسگری بزرگ مقیاس میدان‌های همگن، یک چالش باقی می‌ماند، مراکز NV در گرادیان میدان مغناطیسی به‌عنوان آنالیزوز طیفی برای سیگنال‌های میکروویو فرکانس بالا در حوزه‌ی تصویربرداری، به‌عنوان پیکسل‌های آشکارساز برای نگاشت ریزبینی میدان‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱].

### ۲-۵-۱-۱- حسگر یکپارچه CMOS بر پایه NV

محققان دانشگاه MIT، برای نخستین‌بار موفق به ساخت حسگر کوانتومی بر پایه الماس روی چیپ سیلیکونی شدند. این پیشرفت، راه را برای ساخت سخت‌افزارهای مقیاس‌پذیر و ارزان قیمت برای

هسیه<sup>۱۷</sup> و همکارانش از ویژگی‌های حسگری ذاتی مراکز خالی از نیتروژن یا به اختصار NV، به منظور توسعه‌ی ابزارهای بهره‌بردارند. به این ترتیب که برای ساخت و توسعه‌ی این حسگر کوانتومی، یک لایه‌ی نازک از مراکز خالی از نیتروژن را داخل یک سلول سندان الماس مهندسی کردند، تا از پدیده‌هایی که داخل محفظه‌ی پرفشار این سلول رخ می‌دهند، تصویربرداری کنند.

آن‌ها در ابتدا یک لایه از حسگرهای مرکز خالی از نیتروژن، به ضخامت چند صد اتم را داخل قیراط الماس یک دهمی ایجاد کردند و سپس قابلیت حسگر NV را برای اندازه‌گیری محفظه‌ی پرفشار سلول سندان الماس بررسی کردند. حسگرهای NV نشان دادند، که مرکز سطح مسطح سندان الماس تحت فشار، شروع به خم شدن می‌کند. آن‌ها این پدیده را در فشار ۲۰ برابر فشار فعلی انجام دادند، که در این فشار، خمیدگی با چشم نیز، قابل رویت است. اما این حسگر کوانتومی خمیدگی بسیار کوچک را حتی در کمترین فشار نیز تشخیص می‌دهد. در یک آزمایش دیگر، وقتی مخلوط متانول و اتانول تحت گذار از فاز مایع به فاز جامد قرار گرفت، سطح الماس از یک کاسه‌ی صاف به یک کاسه‌ی ناصاف، دنداندار و بافت‌دار تبدیل شد. این روش، یک روش به‌طور کامل جدید برای اندازه‌گیری تغییر فاز مواد در فشار بالا می‌باشد و می‌تواند مکمل روش‌های سنتی باشد که از تابش قوی ایکس از یک منبع سنکروترون یا شتاب‌دهنده‌ی حلقوی استفاده می‌کنند [۱۰].

#### ۲-۶- اسپین حالت جامد- حسگر تک‌اسپین

خواندن تک‌اسپین‌ها<sup>۱۸</sup> در حالت جامد (نقطه عطفی در مسیر تحقق کامپیوترهای کوانتومی) با هر دو طرح نوری و الکتریکی، محقق شده است. خوانش الکتریکی با آلاینده‌های فسفر در سیلیکون و نقاط کوانتومی نیمه‌رسانای به‌طور الکتروستاتیکی تعریف شده، ثابت شده است.

خوانش نوری با تک‌مولکول‌های آلی، نقاط کوانتومی فعال نوری و مراکز نقص در مواد بلوری شامل الماس و کاربید سیلیکون و همچنین آشکارسازی مکانیکی تک‌نقص‌های پارامغناطیسی در سیلیکا و رصد بی‌درنگ نوسانات چنداسپینی ثابت شده است. در میان تمام اسپین‌های حالت جامد، مراکز NV در الماس، بیشترین توجه را برای اهداف حسگری به سمت خود جلب کرده‌اند. این امر تا حدودی به دلیل آشکارسازی نوری راحت در دمای اتاق و تا حدودی به دلیل پایداری آن‌ها در بلورهای بسیار کوچک و نانو ساختارهاست [۱].

#### ۲-۶-۱- جای خالی اتم به عنوان بیت کوانتومی

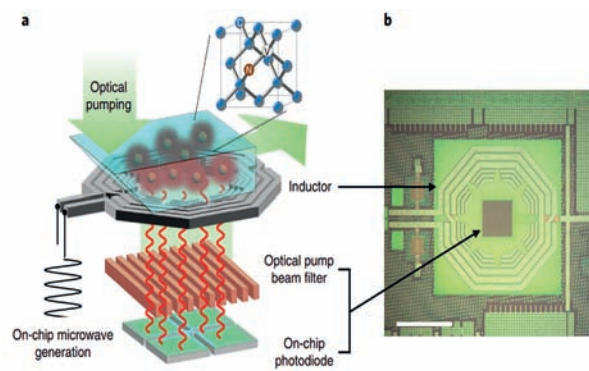
گاتسکل و همکارانش، برای نخستین بار موفق به اثبات مراکز اسپین در یک بلور نیتريد بور شده‌اند. این مراکز می‌توانند حتی در دمای اتاق نیز به‌عنوان بیت‌های کوانتومی عمل کنند.

روش کار به اینصورت بود، که آن‌ها نقص ویژه‌ای (یک اتم بور جافتاده) را در شبکه بلور لایه‌ای نیتريد بور یافتند که یک ممان دوقطبی مغناطیسی نشان می‌دهد، که با عنوان یک اسپین نیز شناخته می‌شود. به علاوه، این نقص می‌تواند نور را جذب و گسیل نماید و از این‌رو مرکز رنگ نیز نامیده می‌شود. به منظور بررسی دقیق خواص مغناطیسی-اپتیکی این گسیل‌کننده‌ی کوانتومی، یک روش تجربی جدیدی معرفی کردند، که در آن از ترکیب یک میدان مغناطیسی ایستا و یک میدان مغناطیسی فرکانس بالا استفاده می‌شود، که اگر فرکانس میدان مغناطیسی متناوب را تغییر دهید، در یک نقطه، به‌طور دقیق به فرکانس اسپین می‌رسید و لومینسانس نوری به شدت تغییر می‌کند. محققان، این مراکز را در سیستم بلوری دوبعدی کشف کرده‌اند که پیش‌تر تنها به صورت نظری پیش‌بینی

محاسبات، حسگری و ارتباطات کوانتومی هموار می‌سازد. مراکز جای خالی نیتروژن (NV)، نقص‌هایی با الکترون هستند که می‌توانند به‌وسیله نور و ماکروویو دستکاری شوند. در پاسخ، آن‌ها فوتون‌های رنگی که حاوی اطلاعات کوانتومی درباره میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی اطراف هستند را منتشر می‌کنند، که می‌تواند برای کاربردهایی از قبیل حسگرهای پزشکی، تصویربرداری عصبی، تشخیص اشیاء و سایر کاربردهای سنجشی استفاده شوند. حسگرهای کوانتومی بر پایه NV سنتی به دلیل بزرگی، گران قیمت بودن و اجزای گسسته، مقیاس پذیری و کارایی محدودی دارند. در این بررسی محققان توانستند تمامی اجزای بزرگ شامل: مولد ماکروویو، فیلتر و آشکارساز نوری را روی یک بسته‌بندی مقیاس میلی‌متر با استفاده از روش‌های سنتی ساخت نیمه‌هادی ادغام کنند (شکل ۴).

مراکز NV در اصل یک اتم با هسته و الکترون‌های اطراف آن هستند که دارای خواص فوتولومینسانس می‌باشند، به این معنی که می‌توانند فوتون‌های رنگی جذب و منتشر کنند. حرکت ماکروویو در اطراف مراکز می‌تواند حالات مثبت، منفی و خنثی را به‌وجود بیاورد که باعث تغییر اسپین الکترون‌های خودش می‌شود. سپس آن تعداد زیادی فوتون قرمز وابسته به اسپین منتشر می‌کند.

تعداد فوتون‌های منتشر شده در تعامل با میدان مغناطیسی اطراف با روش رزونانس مغناطیسی آشکارسازی نوری (ODMR)<sup>۱۵</sup> اندازه‌گیری می‌شود. این تعامل اطلاعات قابل اندازه‌گیری بیشتری درباره میدان می‌دهد.



شکل ۴: سیستم حسگر کوانتومی یکپارچه CMOS [۹]

مراکز NV در صفحه الماس در منطقه حسگری روی چیپ قرار گرفته‌اند. لیزر پمپی سبزی کوچکی مراکز NV را تحریک می‌کند، درحالی‌که یک نانو سیم در نزدیکی مراکز NV قرار گرفته در پاسخ به جریان باعث جابه‌جایی ماکروویو می‌شود. در واقع نور و ماکروویو با هم، باعث انتشار فوتون‌های قرمز می‌شوند.

در زیر مراکز NV، یک دیود نوری برای حذف نویز و اندازه‌گیری فوتون‌ها طراحی شده است. بین الماس و دیود نوری یک توری فلزی به عنوان فیلتر قرار دارد، که فوتون‌های لیزر سبزی را جذب می‌کند و به فوتون‌های قرمز اجازه عبور و رسیدن به دیود نوری را می‌دهد. در نهایت دستگاه ODMR تغییرات فرکانس رزونانس فوتون‌های قرمز که حاوی اطلاعاتی درباره محیط هستند را اندازه‌گیری می‌کند [۹].

#### ۲-۵-۲- حسگر فشار و مغناطیس

توسعه‌ی مواد الکترونیکی و نوری جدید با کارایی بالا به اندازه‌گیری چگونگی تغییر ویژگی‌های ماده از قبیل مغناطیس و سختی، تحت شرایط حدی نیاز دارد. سلول‌های سندان الماس<sup>۱۶</sup> امکان بازتولید چنین شرایطی را در آزمایشگاه فراهم می‌کنند.

شده بود.

متکی هستند، با تداخل سنج‌های نوری، ارتباط نزدیک تری دارند تا حسگرهای اسپینی [۱].

## ۲-۸- کیوبیت‌های ذرات بنیادی

ذرات بنیادی خیلی قبل‌تر از توسعه‌ی کیوبیت‌های حالت جامد و اتمی، به‌عنوان حسگرهای کوانتومی به‌کار گرفته شده‌اند. این حقیقت به نوعی متناقض، به‌دلیل آماده‌سازی و خوانش سرراست و همچنین قرارگیری هدفمند آن‌ها در نمونه‌های مربوطه است.

## ۲-۸-۱- فوتون‌ها

طبق قوانین کوانتومی وقتی جسمی ارتعاش می‌کند، ارتعاش‌ها نه تنها باید به شکل موج، بلکه باید به شکل ذرات هم رفتار کنند، یعنی واحدهای منفرد انرژی که به‌عنوان فوتون‌ها شناخته می‌شوند، ارتعاش کنند. دانشمندان برای نخستین بار توانستند یک تک فوتون را در ماده‌ی معمولی در دمای اتاق، ساخته و اندازه‌گیری کنند. فوتون‌ها یا ذرات منفرد ارتعاش که با مکانیک کوانتومی توصیف می‌شوند، با گرما همراه‌اند.

پژوهشگران، برای اینکه بفهمند فوتون می‌تواند با یک فوتون منفرد برهمکنش کند، پالسی از فوتون‌ها را به درون ماده شلیک می‌کردند. وقتی این اتفاق می‌افتد، فوتون در فرآیندی که پراکندگی رامان نامیده می‌شود، باید در یک انرژی متفاوت با آنچه از طریق برهمکنش با فوتون به آن منتقل شده، به بیرون پرتاب شود. به این ترتیب، آن‌ها می‌توانستند فوتون‌های منفرد را در دمای مافوق سرد و مواد به دقت مهندسی شده، آشکار کنند.

در این پروژه، الماس مورد آزمایش گرفت. در الماس، فوتون‌ها به‌صورت طبیعی در فرکانس‌های بالا، یعنی در ده‌ها تراهرتز عمل می‌کنند. این فرکانس‌ها آنقدر بالاست که در دمای اتاق، انرژی تک فوتون از انرژی گرمایی محیط بالاتر است. وقتی این بلور الماس در دمای اتاق قرار می‌گیرد، حرکت فوتون حتی وجود ندارد، زیرا در دمای اتاق، انرژی لازم برای برانگیختن هیچ چیزی وجود ندارد.

بنابراین آن‌ها سعی کردند تا درون این مخلوط فوتون‌ها (که به لحاظ ارتعاشی، یک مخلوط آرام است)، تنها یک فوتون را برانگیخته کنند. آن‌ها پالس‌های لیزر با فرکانس بالا، شامل ۱۰۰ میلیون فوتون در هر پالس را به درون الماس فرستادند. در چنین موقعیتی، شانس این وجود داشت که یکی از آن‌ها بر همکنش کرده و یک فوتون بازتاب کند، سپس فرکانس کاهش یافته‌ی فوتون شرکت‌کننده در برخورد را اندازه‌گیری کردند، که در واقع تایید می‌کرد، آن به درستی به یک فوتون برخورد کرده است. اما آن‌ها به کمک این کار نمی‌توانستند تشخیص دهند چند فوتون در این فرآیند برانگیخته شده است.

آن‌ها برای کشف تعداد فوتون‌های برانگیخته شده، پالس دوم لیزر را به درون الماس فرستادند. برای هر فوتون برانگیخته شده به‌وسیله‌ی پالس اول، این پالس دوم می‌تواند فوتون برانگیخته شده را به آسایش برساند (از حالت برانگیخته به حالت با انرژی کمتر برود) و انرژی را به‌صورت یک فوتون جدید پراکنش دفع کند. اگر در ابتدا فقط یک فوتون برانگیخته شده بود، سپس یک فوتون جدید با فرکانس بالا باید ساخته می‌شد. برای تایید این عمل، یک شیشه‌ی نیمه شفاف را در مسیر خروج فوتون پراکنش قرار گرفت و دو آشکارساز در هر طرف شیشه قرار داده شد. فوتون‌ها شکافته نمی‌شوند، پس اگر چند فوتون، برانگیخته و سپس آسایش یابند، فوتون‌های حاصل باید از میان شیشه عبور کنند و به‌صورت تصادفی در هر دو آشکارساز پراکنده شوند.

اگر فقط یک آشکارساز سیگنال بدهد، که به معنای آشکار شدن یک تک فوتون است، آنگاه با اطمینان می‌توان گفت که آن فوتون با یک

آن‌ها توانستند قطبش اسپین، یعنی همسویی ممان مغناطیسی نقص تحت برانگیختگی نوری را حتی در دمای اتاق، ثابت کنند. شناسایی مرکز اسپینی در نیتريد بور، به‌صورت نوری یا الکتریکی قابل همسوسازی، دستکاری و پیرو آن قابل بازخوانی باشند به واسطه‌ی آن که چنین مرکزی دارای اسپین است و قادر به جذب و گسیل نور نیز می‌باشد، یک بیت کوانتومی است که در حسگری کوانتومی و اطلاعات کوانتومی قابل استفاده می‌باشد، فناوری نوبری جدید نیز می‌تواند با این فناوری کار کند [۱۱].

## ۲-۶-۲- جفت‌شدگی سیستم‌های کوانتومی دور از هم به‌وسیله حلقه لیزری

محققان موفق شدند برای نخستین بار، یک جفت‌شدگی قوی میان سیستم‌های کوانتومی دور از یکدیگر ایجاد کنند. در این روش، یک حلقه‌ی لیزر، سیستم‌ها را به یکدیگر متصل کرده و امکان تبادل اطلاعات به‌طور تقریبی بدون اتلاف؛ و برهمکنش قوی میان آن‌ها را فراهم می‌کند. این روش جدید، امکانات زیادی را در فناوری شبکه‌های کوانتومی و همچنین حسگرهای کوانتومی به‌دست می‌دهد.

گروهی از فیزیکدانان، برای نخستین بار موفق به ایجاد جفت‌شدگی کوانتومی قوی میان دو سیستم با فاصله‌ی زیاد و در محیط دمای اتاق شده‌اند. محققان در آزمایش خود، از نور لیزر به منظور جفت کردن ارتعاشات یک پوسته‌ی نازک ۱۰۰ نانومتری با حرکت اسپین اتم‌ها در فاصله‌ی بیش از یک متر استفاده کردند. در نتیجه، هر ارتعاش پوسته، اسپین اتم‌های در حال حرکت را تعیین می‌کند و برعکس.

نور بعد از قرار گرفتن بین دو سیستم و رفت و برگشت، مانند یک فتر مکانیکی که بین اتم‌ها و پوسته، کشیده شده، عمل می‌کند و نیرو را بین آن دو منتقل می‌کند. در این حلقه لیزری، ویژگی‌های نور می‌تواند به‌گونه‌ای کنترل شود، که هیچ اطلاعاتی راجع به حرکت دو سیستم از دست نرود و وارد محیط نشود. در این صورت تضمین شود که برهمکنش مکانیک کوانتومی مختل نمی‌شود. جفت کردن سیستم‌های کوانتومی با نور، بسیار انعطاف‌پذیر و گسترده است، می‌توان اشعه‌ی لیزر را بین دو سیستم کنترل کرد که تولید انواع مختلفی از برهمکنش‌ها را که به‌عنوان مثال برای حسگرهای کوانتومی مفید هستند، امکان‌پذیر می‌کند [۱۲].

## ۲-۷- دستگاه‌های تداخلی کوانتومی ابررسانا

دستگاه‌های تداخل کوانتومی ابررسانا یا SQUIDها، یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال، حساس‌ترین نوع حسگرهای مغناطیسی‌اند. تداخل سنج‌های رسانای ابررسانا میدان‌های مغناطیسی با حساسیت  $10 \text{ aT}/\sqrt{\text{Hz}}$  را اندازه‌گیری می‌کنند.

مکانیزم حسگری آن‌ها بر پایه‌ی فاز بوهم-آهارونو<sup>۱۹</sup> که بر روی تابع موج ابررسانا به‌وسیله میدان مغناطیسی احاطه‌شده تاثیر می‌گذارد و توسط مدار مناسب از اتصالات فاز حساس جوزفسون خوانده می‌شود. SQUIDها برای پردازش سیگنال‌ها از DC تا رنج‌های بالای GHz به کار برده شده‌اند، که حد بالا با فرکانس جوزفسون<sup>۲۰</sup> تعیین شده است. از دید تجاری، SQUIDها می‌توانند به‌عنوان پیشرفته‌ترین نوع حسگر کوانتومی و با کاربردهایی از تشخیص مواد در فیزیک حالت جامد گرفته تا سیستم‌های مگنتوانسفالوگرافی بالینی برای اندازه‌گیری میدان‌های کوچک سرگردان جریان‌های الکتریکی در مغز، به شمار آیند. همزمان با توسعه دستگاه‌های SQUID ریزبینی، کوچک‌سازی منجر به تولد SQUIDهای نانو در زیر مقیاس میکرون و با کاربردهای ممکن در تصویربرداری گرمایی، جریان و مغناطیسی شده است. از آنجایی که SQUIDها به جای همدوسی زمانی به همدوسی فضایی

تک فوتون بر همکنش کرده است. در پایان توانستند یک تک کوانتوم از ارتعاش را ساخته و آشکار کنند [۱۳].

## ۲-۸-۲- نوترون‌ها

پژوهشگران موسسه پائول شرر (PSI)، خاصیتی از نوترون را بسیار دقیق‌تر از گذشته اندازه‌گیری کرده‌اند. آن‌ها در این فرآیند دریافتند که این ذره، یک ممان دوقطبی الکتریکی بسیار کوچک‌تر از آنچه پیش از این فرض می‌شد، دارد.

انفجار بزرگ، هم ماده و هم پادماده را در عالم ایجاد نمود، اما از آنجا که این دو یکدیگر را نابود می‌کنند، باید ماده‌ای اضافی وجود داشته باشد که تا به امروز باقی‌مانده است. دلیل این مقدار مازاد ماده، یکی از بزرگ‌ترین معماهای فیزیک و نجوم است. پژوهشگران امیدوارند به کمک نوترون‌ها که اجزای بدون بار سازنده اتم‌ها هستند، سرنخی برای این پدیده بنیادی پیدا کنند. فرضیه این است: اگر نوترون یک ممان دوقطبی الکتریکی به اختصار (nEDM) با یک مقدار غیر صفر قابل اندازه‌گیری داشته باشد، این حقیقت می‌تواند ناشی از همان اصل فیزیکی باشد که مقدار اضافی ماده را پس انفجار بزرگ توضیح می‌دهد.

مدت‌هاست که معلوم شده نوترون یک قطب‌نمای مغناطیسی است و با یک میدان مغناطیسی برهمکنش می‌کند یا به اصطلاح تخصصی: دارای یک ممان دوقطبی مغناطیسی است. به علاوه اگر نوترون دارای یک ممان دوقطبی الکتریکی نیز باشد، مقدار آن بسیار کمتر از ممان دوقطبی مغناطیسی آن است و بنابراین اندازه‌گیری آن، بسیار سخت‌تر است. بنابراین محققان PSI مجبور بودند مسافت‌های بزرگی را انتخاب کنند تا میدان مغناطیسی محلی را در طول اندازه‌گیری، کاملاً ثابت نگه دارند.

همچنین لازم بود شمار نوترون‌های مشاهده شده، به اندازه‌ی کافی زیاد باشد تا شانس اندازه‌گیری nEDM<sup>۱۱</sup> فراهم شود که نوترون‌های به اصطلاح مافوق سرد، یعنی نوترون‌هایی با حرکت نسبتاً آهسته، اندازه‌گیری شدند. هر ۳۰۰ ثانیه، یک دسته‌ی با طول عمر ۸ ثانیه با بیش از ۱۰ هزار نوترون به محل آزمایش هدایت و بررسی شدند. پژوهشگران در مجموع ۵۰ هزار از این دسته‌ها را اندازه‌گیری نمودند. محققان داده‌های اندازه‌گیری را در طی ۲ سال جمع‌آوری نموده‌اند، آن‌ها را در دو گروه به دقت ارزیابی کرده‌اند و این گونه نتیجه‌ای دقیق‌تر از گذشته به دست آورده‌اند. نتیجه‌ی کنونی آن‌ها مقداری برای nEDM بدست می‌دهد، که برای اندازه‌گیری توسط ابزارهای کنونی، بسیار کوچک است؛ مقداری که بسیار به صفر نزدیک است. در نتیجه این یافته، احتمال اینکه نوترون به توضیح مقدار اضافی ماده کمک کند را کم می‌نماید، اما این فرض را به طور کامل کنار نمی‌گذارد [۱۴].

## ۲-۹-۲- حسگرهای اپتیکی

### ۲-۹-۲-۱- حسگرهای آشکارسازی نانوذرات

یکی از کاربردهای اساسی علم نورشناسی، حسگر اپتیکی است. حسگرهای اپتیکی در زمینه‌ی علم نجوم، محیط‌زیست، صنعت و تشخیص‌های پزشکی، نقش اساسی دارند.

تلاش‌های جدید بر نوع خاصی از دستگاه‌های به دام‌انداز نور، به نام تشدیدکننده‌های ریزحلقه<sup>۲۲</sup> تمرکز دارند؛ این دستگاه‌ها برهمکنش بین نور و مولکول را برای آشکارسازی، افزایش می‌دهند. با این حال، فیزیک بنیادی این دستگاه‌ها، حساسیت آن‌ها را محدود می‌کند. ژانگ<sup>۲۳</sup> و همکارانش، یک نوع حسگر جدید پیشنهاد دادند، که این نوع حسگرهای ریزحلقه‌ی پیشرفته، مبتنی بر مفهوم اصلی سطوح استثنایی هستند، که از نقاط استثنایی تشکیل شده‌اند. یک سیستم

فیزیکی که یک نقطه استثنایی را نشان می‌دهد، بسیار شکننده است. به عبارت دیگر، هر گونه اختلال کوچکی، رفتار آن را به طور چشمگیری تغییر خواهد داد. این ویژگی، سیستم را به سیگنال‌های کوچک، بسیار حساس می‌کند. این دستگاه‌ها نسبت به خطاهای اجتناب‌ناپذیر هنگام ساخت و تغییرات ناخواسته محیطی، بسیار حساس هستند. در نمونه‌های آزمایشگاهی پیشین، حساسیت حسگرهای اپتیکی مستلزم استفاده از ترفندهای هوشمندانه‌ای بود. در حالی که محققان به بهبود طراحی حسگرهای ریزحلقه ادامه می‌دهند، امیدوارند مشاهدات به‌ظاهر کوچک اپتیکی از طریق بهبود این دستگاه‌ها، اثرات قابل توجهی داشته باشند [۱۵].

## ۲-۹-۲-۲- حسگر بونی آشکارساز فوتون

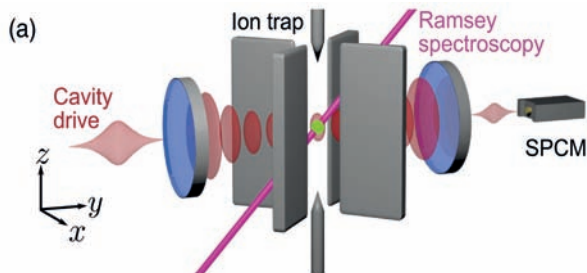
زمانی که یک آشکارساز فوتون، موج ورودی نور را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند، خود فوتون از بین می‌رود. لی<sup>۲۴</sup> و همکارانش توانستند نور را از طریق یک حسگر کوانتومی به‌طور غیرمخرب اندازه‌گیری کنند. این کشف امکان مطالعه‌ی ویژگی‌های کوانتومی نور را نیز ممکن می‌سازد. این پروژه شامل ایجاد واسطه‌هایی است، که امکان انتقال اطلاعات کوانتومی را از ماده به نور و بالعکس فراهم می‌سازند. در این تحقیق اتم کلسیم یونیزه شده به‌عنوان حسگر کوانتومی برای استخراج اطلاعات فوتون‌های حفره‌ای بدون تخریب آن‌ها در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که این یون بین دو آیینه توخالی قرار داده شده تا نور لیزر مرئی را هدایت کند. این یون تأثیر ضعیفی روی نور دارد.

از طریق طیف‌سنجی رمزی<sup>۲۵</sup> از یون‌ها تغییر فاز و کاهش میزان حالات یون که هر دو ناشی از تعامل یون با میدان حفره است اندازه‌گیری می‌شود. تغییر فاز متوسط با میانگین تعداد فوتون حفره به دلیل اثر استارک متناسب است. فوتون‌های خروجی از سوراخ توسط ماژول شمارش تک فوتون (SPCM)<sup>۲۶</sup> شمارش می‌شوند (شکل ۵).

بازسازی توزیع عدد فوتون حفره‌ای از این اندازه‌گیری‌ها امکان تعیین میانگین و عرض توزیع را می‌دهد، بدین ترتیب می‌توان بین حالات با آمار فوتون منسجم و آمار مخلوط حرارتی مختلف تفاوت قائل شد. اندازه‌گیری‌های کوانتومی این یون این امکان را می‌دهد در مورد تعداد ذرات نور داخل محفظه، پیش‌بینی‌هایی انجام شود، که نتیجه‌ی این پژوهش یک حسگر کوانتومی برای ذرات نور شناخته می‌شود. یکی از کاربردهای این روش جدید می‌تواند تولید میدان‌های نوری با طراحی ویژه باشد [۱۶].

## ۲-۹-۲-۳- حسگرهای مبتنی بر نانوسیم

حسگرهای کوانتومی مبتنی بر نانوسیم‌های نیمه‌هادی، می‌توانند ذرات تک نور را با وضوح، سرعت و کارایی بالا در محدوده طول موجی بی‌ظیری، از فرابنفش تا مادون قرمز نزدیک تشخیص دهند. همچنین



شکل ۵: تجهیزات آزمایش: تک یون به دام افتاده بین دو آیینه که به وسیله نور لیزر هدایت می‌شود. به وسیله طیف‌سنجی رمزی تغییر فاز اندازه‌گیری شده و توسط شمارش‌گر تعداد فوتون خروجی شمرده می‌شود [۱۶].

این فن آوری به طور قابل توجهی توانایی بهبود ارتباطات کوانتومی و قابلیت سنجش از راه دور را دارا می باشد. این حسگر برای تشخیص نور بسیار کارآمد خواهد بود و در کاربردهایی مانند رادار کوانتومی، نظارت و عملیات شبانه، که تعداد کمی از ذرات نور به دستگاه باز می گردند، شما را قادر می سازد هر تک فوتون که وارد می شود را شناسایی نمایید.

گیبسون<sup>۲۷</sup> و همکارانش، آرایه ای از نانوسیم های مخروطی ایجاد کردند که فوتون های ورودی را به جریان الکتریکی تبدیل می کنند که می توان آن را تقویت و شناسایی نمود. در این دستگاه از نانوسیم های ایندیم فسفید (InP) استفاده می شود. برای مثال تغییر مواد به ایندیم گالیم آرسنیک (InGaAs) می تواند پهنای باند را با حفظ عملکرد به سمت طول موج های مخابراتی گسترش دهد. با توجه به کیفیت مواد، تعداد نانوسیم ها، بهینه سازی شکل و ترتیب نانوسیم ها، آرایه نانوسیم نیمه هادی با سرعت، تفکیک پذیری زمانی و کارایی زیاد به دست می آید. این حسگر در حالی که در دمای اتاق عمل می کند، می تواند طیف گسترده ای از نور را با بازده زیاد و تفکیک پذیری زمانی بالا تشخیص دهد. حتی می توان طیف جذبی را نیز با مواد مختلف گسترش داد.

سنجش از راه دور، تصویربرداری با سرعت بالا از فضا، دستیابی به تصاویر سه بعدی با وضوح زیاد، ارتباطات کوانتومی و تشخیص اکسیژن تک برای پایش مقدار دارو در درمان سرطان، همه از جمله کاربردهای آشکارسازی قوی تک فوتونی است که این حسگر کوانتومی جدید می تواند فراهم نماید [۱۷].

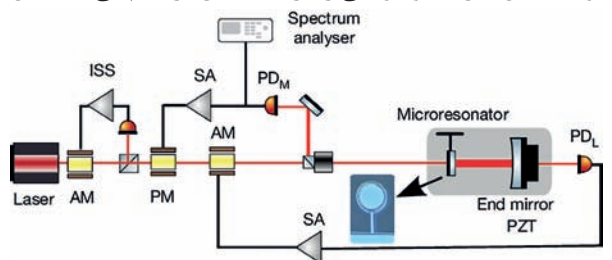
#### ۲-۹-۴- بهبود حساسیت آشکارساز امواج گرانشی

مکانیک کوانتومی، به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، محدودیتی بنیادی در دقت اندازه گیری های پیوسته ایجاد می کند و به عبارتی عمل برگشتی باعث افزایش عدم قطعیت در متغیرهای مزدوج می شود. ابزارهای آشکارسازی امواج گرانشی، تداخل سنج ها هستند، که از نور لیزر برای مقایسه تفاوت تغییر طول دو بازوی عمود برهم خود هنگام عبور امواج گرانشی استفاده می کنند.

نویز کوانتومی حدی است که مکانیک کوانتومی در اندازه گیری مکان ایجاد می کند و شامل نویز شمارش فوتون و نویز فشار تابشی است. به تازگی توماس کوربیت و تیم تحقیقاتی او، برای اولین بار موفق به اندازه گیری بدون تشدید نویز فشار تابش کوانتومی در باند صوتی و در فرکانس های مربوط به آشکارسازهای امواج گرانشی شده اند.

نتایج این پژوهش می تواند به توسعه ی روش هایی برای بهبود حساسیت آشکارسازهای امواج گرانشی از طریق ساخت و توسعه ی تکنیک هایی برای افزایش بی دقتی ها در اندازه گیری که به آن عمل برگشتی<sup>۲۸</sup> گفته می شود، کمک کند، بدین ترتیب احتمال آشکارسازی امواج گرانشی افزایش می یابد.

محققان دستگاه هایی فیزیکی اختراع کرده اند که امکان مشاهده (و شنیدن) اثرات کوانتومی را در دمای اتاق فراهم می کنند. این



شکل ۶: شماتیکی از تجهیزات آزمایش [۱۸]

دستگاه ها، شامل مدل های مینیاتوری آشکارسازهایی مانند لیگو یا تداخل سنج لیزری امواج گرانشی است. یک پرتو لیزر به سمت یکی از این آینه های معلق، هدایت شده و زمانی که این پرتو منعکس می شود، فشار تابش افت و خیزی آن برای خم کردن ساختار پایه ای آن، به اندازه ای است که باعث ارتعاش لایه ی آینه ای آن و سپس موجب ایجاد نویز شود (شکل ۶) [۱۸].

#### ۲-۹-۵- الگوریتم اندازه گیری نوری چند پرتویی

به پیشینه رساندن حساسیت ابزارهای اندازه گیری برای تمام حوزه های علم و فناوری، بسیار مهم است. فناوری کوانتومی راه حلی را در این زمینه ارائه داده که دقت را تا حد بنیادی هایزنبرگ افزایش می دهد و در این راه، از اصول اساسی مکانیک کوانتومی بهره می برد. محققان در این پژوهش تازه، سنجش کوانتومی را با اپتیک خطی تلفیق کردند. آن ها طرح اپتیکی را ارائه دادند، که روش تخمین فاز مبتنی بر تبدیل فوریه را اجرا می کند. این روش در قلب بسیاری از الگوریتم های کوانتومی، از جمله پروتکل های اندازه گیری با دقت بالا قرار دارد. آرایش خاص تعداد بسیار زیادی از عناصر نوری خطی، کسب اطلاعات در مورد زوایای هندسی، موقعیت، سرعت و همچنین پارامترهای دیگر اشیای فیزیکی را ممکن می سازد. اندازه گیری شامل کدگذاری کمیت دلخواه در فازهای اپتیکی است که پس از آن مستقیماً تعیین می شوند. این پژوهش نشان داد که اپتیک خطی، یک بستر مقرون به صرفه و مؤثر برای اجرای اندازه گیری ها و محاسبات کوانتومی در مقیاس متوسط است [۱۹].

#### ۲-۹-۶- توسعه تداخل سنج نوری دقیق

یک تداخل سنج اتمی، نیروها و انرژی های بسیار کوچک را اندازه گیری می کند. برای این منظور، در ابتدا باریکه ای از اتم ها را به دوشاخه جدا می کند و سپس به منظور شکل دهی یک الگوی تداخلی، آن ها را باز ترکیب می کند. این الگو، هنگامی تغییر می کند که یک نیرو به صورت متفاوت روی دوشاخه اتمی عمل می کند. محققان قبل از باز ترکیب دوشاخه می توانند دقت یک تداخل سنج را با شتاب دادن اتم های یک شاخه نسبت به شاخه دیگر افزایش دهند. به هر حال، در عمل، فوتون های استفاده شده جهت شتاب دادن اتم ها، عدم قطعیتی به فاز اتم ها وارد می کند که در عوض، دقت تداخل سنج را کاهش می دهد. محققان، روشی برای انتقال مؤثر تکانه فوتونی به اتم ها ثابت کردند که این عدم قطعیت را کمینه می کند.

این گروه در آزمایش های خود، اتم های ایتربیم را در یک شبکه نوری که توسط تابش دو لیزر سبز به اتم ها ایجاد شده بود، نگه داشتند. آن ها در حالی که به طور همزمان فرکانس لیزرهای به دام اندازی را تغییر می دادند، اتم ها را درون شبکه نوری نگه داشتند. این کار موجب می شود تا فوتون ها تکانه خود را به اتم ها انتقال دهند. محققان با تکرار این فرآیند توانستند به هر اتم، به اندازه تکانه چهل فوتون انتقال دهند. آن ها دریافتند که وقتی دامنه امواج ایستا در عمق به اصطلاح جادویی باشد، در اثر انتقال تکانه فوتون ها به اتم ها، فاز اتم ها تغییر نمی کند. شرط عمق جادویی فقط هنگامی وجود داشت که دو لیزر به دام اندازی با اعمال فرکانسی خاص، در یک شدت و انحراف مشخص از یکدیگر تنظیم شده بودند. محققان می گویند که طراحی تداخل سنجی خاص آن ها می تواند اندازه گیری ثابت های ساختار ظریف (آزمونی برای نظریه الکترو دینامیک کوانتومی) را حدود شانزده برابر بهبود ببخشد [۲۰].

#### ۲-۹-۷- تصویربرداری با وضوح مولکولی

دانشمندان به تازگی، یک روش تداخل سنجی جایگزینی تک مولکولی برای ریزنگاری فلورسانسی با وضوح بالا توسعه داده اند، که می تواند

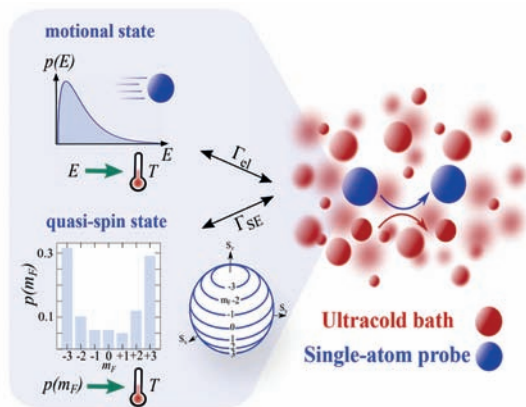
مقیاس مولکولی افزایش دهد. محققان همچنین از فناوری ROSE برای تحلیل نانو ساختارهای سلولی استفاده کردند [۲۱].

### ۱۰-۲-۱- کاوشگر کوانتومی تک اتمی

دما یکی از کمیت‌های فیزیکی است که به‌طور گسترده مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. در این آزمایش، دمای گاز فوق سرد روبیدیم (Rb) را با استفاده از حالات کوانتیده اسپینی یک اتم سزیم (Cs) غوطه‌ور در گاز، به‌طور دقیق اندازه‌گیری کرده‌اند.

بوتون<sup>۳</sup> و همکاری‌اش، برای دستیابی به این هدف، از یک کاوشگر (یک سیستم فیزیکی دیگر که وابستگی دما و خواص فیزیکی آن درک شده) استفاده می‌کنند. اگر کاوشگر به مدت زمان کافی با سیستم در تماس باشد، آنگاه یک تبادل انرژی اتفاق خواهد افتاد که این امر باعث به تعادل رسیدن کاوشگر با دمای سیستم خواهد شد. این تعادل، امکان استنتاج دمای سیستم را از طریق تغییر همزمان برخی از خواص کالیبره شده کاوشگر، مانند ارتفاع ستون مایع در یک لوله باریک، مقاومت الکتریکی یک عنصر رسانا و یا ضریب شکست در یک محیط، فراهم می‌کند. هدف نهایی دماسنجی، کوچک کردن دماسنج‌ها به منظور اندازه‌گیری دماهای دور از دسترس سیستم‌های بسیار کوچک و سرد می‌باشد.

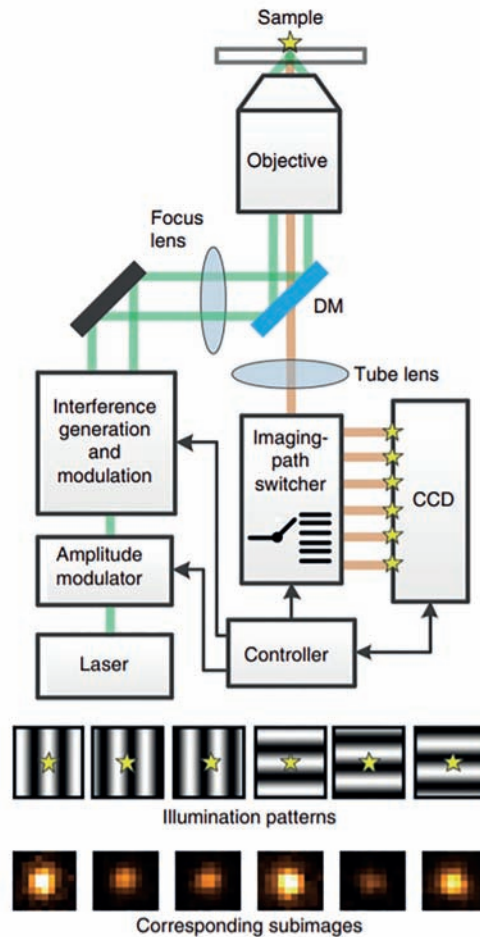
سیستم تجربی، یک ابر به دام افتاده متشکل از حدود ده هزار اتم روبیدیم است. اتم‌ها تا دماهای بین ۲۰۰ تا هزار نانوکلوین، جایی که رفتار گاز، کلاسیکی است، سرد شدند. دمای چنین گازی با اندازه‌گیری‌های زمان‌گریز و از طریق پردازش توزیع سرعت اتم‌ها در ابر، به دقت قابل اندازه‌گیری است. بنابراین این سیستم به‌عنوان یک بستر آزمونی قابل سنجش برای یک دماسنج فوق سرد عمل می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸: کاوش کوانتومی تک اتمی یک گاز فوق سرد [۲۲]

محققان به منظور استفاده از اتم‌های سزیم برای تعیین دمای ابر روبیدیم، از برخوردهای تبادل اسپین استفاده کردند که در آن، کوانتاهای تکانه زاویه‌ای بین اتم‌های روبیدیم و سزیم مبادله می‌شود. در یک نوع از برخورد، موسوم به برخورد گرماگیر، اتم روبیدیم به یک حالت انرژی بالاتر و اتم سزیم به یک حالت انرژی پایین‌تر منتقل می‌شود. این فرایند به اندازه  $\Delta E/2$  انرژی اضافه نیاز دارد که با حرکت اتم‌های روبیدیم تامین می‌شود. وقوع این برخوردها به در دسترس بودن انرژی جنبشی و در نتیجه دمای ابر روبیدیم بستگی دارد. گسترش توزیع جمعیت حالت اسپینی اتم‌های سزیم ناشی از این برخوردها، اطلاعات دمای گاز را رمزگذاری می‌کند. بنابراین، این نتیجه قاطع، نشان می‌دهد که دماسنجی می‌تواند با استفاده از یک

دقت جایگزیدی را در مقایسه با روش‌های متعارف برازش مرکزوار به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. این روش جدید، به اختصار ROSE<sup>۲۹</sup> نامیده می‌شود. فناوری ROSE برای برانگیختگی مولکول‌های فلوروسنت، از حاشیه‌های تداخل فاز و شش جهت مختلف استفاده می‌کند. این سیستم، مکان یک مولکول فلوروسانس را از طریق شدت الگوهای برانگیختگی مربوط به یک حاشیه تداخلی تعیین می‌کند. (شکل ۷)



شکل ۷: اساس کار ROSE یک پرتو لیزر تحریک شده به دو بخش تقسیم می‌شود تا یک حاشیه تداخل در صفحه نمونه ایجاد شود. شدت و فاز حاشیه تداخلی مدوله شده تا به الگوهای مختلف نورپردازی در طول تصویربرداری تغییر یابد. در مسیر تصویربرداری سیگنال فلوروسنت به نواحی مختلف دستگاه جفت‌شدگی بار (CCD) تغییر می‌یابد و با الگوی نورپردازی همگام می‌شود. بنابراین ۶ تصویر پایین یک زمان نوردهی بدست می‌آیند. [۲۱]

محققان برای تایید عملکرد فناوری ROSE، سه توری شبکه‌ای مختلف از ساختارهای اوربگامی DNA با نقاط شبکه‌ای به فاصله‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ نانومتری طراحی کردند. درحالی‌که هر دو فناوری متعارف برازش مرکزوار و روش ROSE قادر به بررسی ساختار ۲۰ نانومتری با مقدار فوتون یکسانی هستند، فناوری ROSE می‌تواند به تنهایی، ساختاری با فاصله شبکه‌ای ۱۰ نانومتری را نیز بررسی کند. آن‌ها نشان دادند که فناوری ROSE می‌تواند یک ساختار ۵ نانومتری با وضوح حدود ۳ نانومتر در یک میدان دید بسیار بزرگ، حدود ۲۵ در ۲۵ میکرومتر مربع، را بررسی کند. این نتایج نشان می‌دهد که فناوری ROSE می‌تواند قدرت ریزنگاری جایگزیدی تک‌مولکولی (SMLM)<sup>۳۰</sup> را به

کاووشگر کوانتومی تک‌اتمی و بدون نیاز به پردازش دقیق مدل، انجام شود. آن‌ها توانستند دمای سیستم را تنها پس از ۳۵۰ میلی ثانیه از برهمکنش استخراج کنند [۲۲].

### ۲-۱۰-۲- دماسنجی در چگال بوز-اینشتین

مهبودی<sup>۳۲</sup> و همکارانش توانستند دماسنجی طراحی کنند که دما را تا یک نانو کلوین در یک چگال بوز-اینشتین اندازه‌گیری کنند بدون اینکه نمونه تخریب شود، این دماسنج در حقیقت تحلیلی از حالت کوانتومی ناخالصی است که با چگال بوز-اینشتین (BEC)<sup>۳۳</sup> تعامل داشته است. ایده این آزمایش براساس مدل بوز-پولارون است، به این ترتیب که هنگامی که ناخالصی وارد BEC می‌شود با آن برهمکنش می‌کند، در نتیجه این برهمکنش ناخالصی، اطلاعاتی از BEC بدست می‌دهد، زیرا بسته به خصوصیات آن حالت کوانتومی ناخالصی تغییر می‌کند.

سرانجام با اندازه‌گیری ناخالصی می‌توان اطلاعاتی از خصوصیات BEC مثل دما را فاش نمود و از آنجا که ذره ناخالصی نسبت به BEC کوچک است، اندازه‌گیری آن BEC را تخریب نمی‌کند. از محدودیت‌های این سیستم اندازه‌گیری این است که، مبنای نظری این سیستم اندازه‌گیری دما، تحت شرایط خاصی صحیح است. به طور خاص برابری مدل بوز-پولارون با مدل حرکت براونی تنها در شرایطی که ذره ناخالصی، افت و خیزهای کوچک دارد برقرار است. این بدین معناست که ذره ناخالصی محدود به حرکت در همسایگی خیلی نزدیک مرکز دام است. علاوه بر این، دمای گاز باید کمتر از مقداری خاص باشد تا بتوان از تقریب BEC استفاده کرد [۲۳].

### ۲-۱۰-۳- توسعه تابش سنج با کمترین میزان نویز

محققان یک تابش سنج (بولومتر) فوق حساس، یک نوع آشکارساز تابش حرارتی ساخته‌اند. این آشکارساز تابشی جدید که از ترکیب پالادیم و طلا ساخته شده است، اندازه‌گیری قدرت تابش الکترومغناطیسی را آسان‌تر می‌کند. این آشکارساز تابشی جدید بسیار حساس است و میزان نویز آن (میزان تغییر یک سیگنال حول مقدار صحیح) تنها یک‌دهم شدت نویز سایر تابش‌سنج‌هاست. این تابش‌سنج همچنین صد برابر از آشکارسازهای پیشین تابشی کم نویز، سریع‌تر است.

اساس کار یک تابش‌سنج، اندازه‌گیری اثر گرمایی تابش است. وقتی یک تابش‌سنج، گرم می‌شود، مشخصات الکتریکی آن تغییر می‌کند که می‌تواند با دقت بالا اندازه‌گیری شود. هرچه تابش سنج کوچک‌تر باشد، برای گرم کردن آن به تابش کمتری نیاز است. از آنجا که نانو بولومترها حساسیت بسیار بالایی دارند، می‌توانند به راحتی سطح تابش اضافی در کرایوستات را اندازه‌گیری کنند تا تابش را از طریق محافظت بهتر کاهش دهند. می‌توان از تابش‌سنج برای خواندن مقدار بیت‌های کوانتومی یا کیوبیت‌ها نیز استفاده کرد. اما بدین منظور، لازم است سرعت عملکرد بولومتر، بیشتر شود. در این پژوهش، تقویت‌کننده‌های ریزموج نیز توسعه یافتند. وظیفه آن‌ها تقویت سیگنال است؛ اما آن‌ها باعث اضافه شدن نویز نیز می‌شوند. تقویت‌کننده ریزموج ابررسانا که توسط محققان توسعه پیدا کرده، برای کاهش نویز تابش‌سنج در مقایسه با بهترین تقویت‌کننده تجاری، موفق بوده است [۲۴].

کلیه آزمایشات انجام شده در زمینه حسگرهای کوانتومی در جدول (۱) نشان داده شده است.

### ۳- کاربردهای حسگر کوانتومی

در این بخش به برخی از کاربردهای حسگرهای کوانتومی و نحوه استفاده از آن‌ها در زندگی امروزی پرداخته می‌شود.

### ۳-۱- نقشه‌برداری زیر زمین

دانشمندان زیادی که در حال کار بر روی حسگرهای کوانتومی هستند، کمپانی‌های زیادی را برای تجاری کردن فناوری خود تاسیس نموده‌اند، اما تعداد کمی از آن‌ها، محصولاتی واقعی در بازار دارند. یکی از این کمپانی‌ها، موکوانس<sup>۳۴</sup> در فرانسه است.

دانشمندان روی گرانش‌سنج‌های ساخته‌شده از تداخل‌سنج‌های اتم که از ویژگی کوانتومی دوگانگی موج-ذره بهره می‌برند، تمرکز کرده‌اند. گرانش‌سنج‌ها به دانشمندان اجازه می‌دهند تا با ثبت افت و خیزهای گرانشی زمان و فضا، تغییرات چگالی را در زیر زمین نقشه‌برداری کنند. گرانش‌سنج کوانتومی موکوانس برخلاف هم‌ارز کلاسیکی‌اش، به نگهداری کم نیاز داشته یا هرگز به نگهداری نیاز ندارد و بنابراین می‌تواند مانند یک گرانش‌سنج نسبی و بدون تغییر نتایج، به‌طور مداوم کار کند. این دستگاه از استوانه‌ای با ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و یک جعبه‌ی بزرگ‌تر برای لیزرها و صنایع الکترونیکی تشکیل شده، از دستگاه‌های کوانتومی قبلی، کوچکتر بوده و غیرمخصصان نیز می‌توانند با آن کار کنند.

بانگز<sup>۳۵</sup> و همکارانش در دانشگاه بیرمنگام در حال ساخت یک نوع حسگر گرانشی برای بازار خاص مهندسی معدن هستند. این شیب‌سنج گرانش، از دو ابر اتمی تحت تاثیر همان ارتعاشات خارجی اما در ارتفاعات متفاوتی استفاده می‌کند. کم کردن سیگنال یک ابر از سیگنال ابر دیگر، نویز را حذف می‌کند و گرادیان گرانش را بدست می‌دهد. اگرچه این دستگاه، لزوماً به گرانش، نسبت به جرم‌های روی یک فنر، حساس‌تر نخواهد بود، اما باید بسیار سریع‌تر عمل کند. این اندازه‌گیری‌های سریع‌تر می‌تواند زمان پیمایش را تا ۹۹٪ کاهش داده و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی را به شدت کم کند. همچنین این افزایش سرعت می‌تواند بازار جهانی پیمایش گرانش در مهندسی معدن را از ۱۰ تا ۲۰ میلیون دلار کنونی به چندصد میلیون در سال تبدیل کند [۱].

### ۳-۲- نورهای الماسی

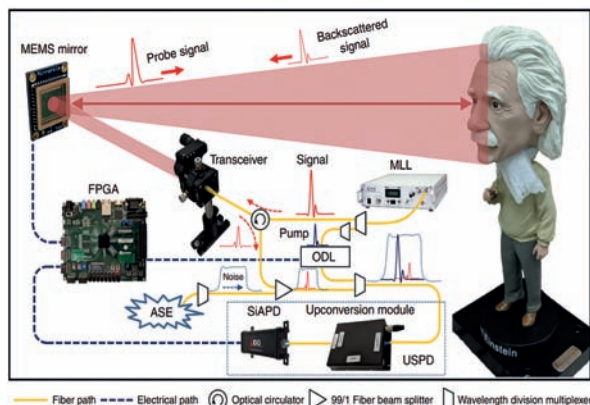
مراکز NV وقتی با نور سبیز برانگیخته شوند، می‌توانند نور قرمز را تابش کنند، اما احتمال رخداد چنین پدیده‌ای، به حالات اسپینی الکترون‌های آن‌ها بستگی دارد. با فرار دادن حالات اسپینی در یک برهم نهی، فقط ریزموج‌های با فرکانس مناسب می‌توانند شدت تابش را تغییر دهند. مهم‌تر از همه، این حالت کوانتومی به لطف شبکه سخت الماس که مراکز NV را از ارتعاشات می‌پوشاند، می‌تواند بیشتر از یک میلی‌ثانیه در دمای اتاق دوام بیاورد.

چند شرکت استارت‌آپی به دنبال تجاری‌سازی فناوری NV در حوزه‌هایی مانند بیوپزشکی هستند. شرکت بوش، غول آلمانی مهندسی نیز در حال ساخت یک نمونه اولیه حسگر NV برای رصد شارژ کردن و پیشگیری از تجاوز جریان در باتری‌های خودرو است. همچنین شرکت الکترونیکی فرانسوی تالس<sup>۳۶</sup>، به دنبال اعمال گرادیان‌های میدان‌های مغناطیسی در طول بلورهای الماس NV است تا اجزای فرکانس را در طیف‌های ریزموج نامعلوم شناسایی کند. طبق اظهارات مدیر گروه فیزیک کوانتومی شرکت تالس، اپراتورهای شبکه G5 می‌توانند از این فناوری استفاده کنند. همچنین محققان شرکت جنگ‌افزاری لاکهید مارتین<sup>۳۷</sup> با موانعی در تجاری‌سازی یک دستگاه ناوبری جدید مواجه هستند. این دستگاه مبتنی بر NV، با کمک ناهنجاری‌های کوچک میدان مغناطیسی زمین که پیش‌تر نقشه‌برداری شده‌اند، ناوبری می‌کند [۲۵].

### ۳-۳- تصویربرداری سه‌بعدی مقاوم در برابر نویز

رهین<sup>۳۸</sup> و همکارانش، یک سیستم تصویربرداری سه‌بعدی ایجاد

نسبت به نویز پس زمینه است.



شکل ۹: تجهیزات آزمایشی تصویربرداری تک فوتون ۳ بعدی مقاوم در برابر نویز [۲۶]

این رویکرد مبتنی بر سخت افزار می تواند استفاده از لیدار را در تنظیمات نویزی که امکان پس پردازش وجود ندارد، تسهیل کند و همچنین می تواند با رویکردهای کاهش نویز مبتنی بر نرم افزار نیز ترکیب شود تا حتی نتایج بهتری بدست دهد. کاهش نویز به روش

کردند، که از خواص کوانتومی نور برای تولید تصاویری ۴۰ هزار برابر واضح تر از فناوری های فعلی استفاده می کنند. این پژوهش می تواند باعث بهبود آشکارسازی و حسگری لیدار، سامانه های نقشه برداری ماهواره ای، ارتباطات اعماق فضا و تصویربرداری پزشکی از شبکیه چشم انسان شود. این فناوری، اولین اثبات واقعی کاهش نویز تک فوتون با استفاده از روشی موسوم به طبقه بندی حالت پارامتری کوانتومی (QPMS<sup>۳۹</sup>) است که نخستین بار توسط یوپینگ هوانگ پیشنهاد شده است.

برخلاف اغلب ابزارهای فیلترکننده نویز که برای تمیز کردن تصاویر نویزی، متکی بر پس پردازش مبتنی بر نرم افزار هستند، QPMS برای تولید تصاویری به طور نمایی تمیزتر در سطح خود حسگر، نشانه های کوانتومی نور را از طریق اپتیک غیرخطی نامتعارف بررسی می کند (شکل ۹).

پژوهش حاضر، یک مشکل چنددهه ای لیدار را حل می کند. اگرچه آشکارسازهای نوری مورد استفاده در این سیستم ها، به اندازه کافی حساس هستند تا تصاویر دقیقی از تنها چند فوتون ایجاد کنند، اما تفکیک بخش های بازتابی نور لیزر از نور روشن تر پس زمینه، مانند نور خورشید، کار دشواری است. چالش حسگرهای حساس، حساس بودن

جدول ۱: آزمایشات تجربی حسگرهای کوانتومی [۱]

Implementation	Qubit(s)	Measured quantity(ies)	Typical frequency	Initialization	Readout	Type <sup>a</sup>
<b>Neutral atoms</b>						
Atomic vapor	Atomic spin	Magnetic field, Rotation, Time/Frequency	DC-10 GHz	Optical	Optical	II-III
Cold clouds	Atomic spin	Magnetic field, Acceleration, Time/Frequency	DC-10 GHz	Optical	Optical	II-III
<b>Trapped ion(s)</b>						
	Long-lived electronic state	Time/Frequency	THz	Optical	Optical	II-III
	Vibrational mode	Rotation		Optical	Optical	II
		Electric field, Force	MHz	Optical	Optical	II
<b>Rydberg atoms</b>						
	Rydberg states	Electric field	DC, GHz	Optical	Optical	II-III
<b>Solid state spins (ensembles)</b>						
NMR sensors	Nuclear spins	Magnetic field	DC	Thermal	Pick-up coil	II
NV <sup>b</sup> center ensembles	Electron spins	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
<b>Solid state spins (single spins)</b>						
P donor in Si	Electron spin	Magnetic field	DC-GHz	Thermal	Electrical	II
Semiconductor quantum dots	Electron spin	Magnetic field, Electric field	DC-GHz	Electrical, Optical	Electrical, Optical	I-II
Single NV <sup>b</sup> center	Electron spin	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
<b>Superconducting circuits</b>						
SQUID <sup>c</sup>	Supercurrent	Magnetic field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	I-II
Flux qubit	Circulating currents	Magnetic field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	II
Charge qubit	Charge eigenstates	Electric field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	II
<b>Elementary particles</b>						
Muon	Muonic spin	Magnetic field	DC	Radioactive decay	Radioactive decay	II
Neutron	Nuclear spin	Magnetic field, Phonon density, Gravity	DC	Bragg scattering	Bragg scattering	II



QPMS، لیدارها را قادر می‌سازد تا برای ایجاد تصاویر سه‌بعدی دقیق در محدوده‌های بیش از ۳۰ کیلومتر به کار روند. این فناوری همچنین می‌تواند برای ارتباطات اعماق فضا، جایی که تابش خیره‌کننده خورشید می‌تواند پالس‌های از راه دور لیزر را از بین برد، مورد استفاده قرار گیرد. سیستم تصویربرداری استیونز با استفاده از تصویربرداری تک فوتون بدون نویز، به محققان کمک خواهد کرد بتوانند تصاویر واضح و دقیقی از شبکه‌های چشم انسان با استفاده از باریک‌ها نامرئی و ضعیف نور لیزر بدست آورند که آسیبی به بافت‌های حساس چشم نرسانند [۲۶].

### ۳-۴- رادار کوانتومی

یک سیستم رادار برای پیدا کردن مکان یک شی، فاصله و جهتی که شی در آن قرار دارد را شناسایی می‌کند. سیستم برای انجام این کار، امواج رادیویی را ارسال کرده و سپس امواجی که از جسم بازمی‌گردند را اندازه‌گیری می‌کند. اکنون، محققانی روشی آرایه کرده‌اند که از فوتون‌های درهم‌تنیده به عنوان کاوشگرهای رادار استفاده می‌کند. محققان برای توسعه طرح خود، روش پیشنهادی یک بعدی (1D) قبلی را به روش سه‌بعدی (3D) بسط دادند. آن‌ها تمام درجات آزادی فضایی فوتون‌های درهم‌تنیده را محاسبه کردند و نحوه انتشار سیگنال رادار از شی هدف به گیرنده را تحلیل کردند. آن‌ها دریافتند که برای کاوشگرهای رادار با N فوتون درهم‌تنیده، ناحیه‌ی سه‌بعدی موقعیت‌های ممکن یک شی،  $N^{3/2}$  در مقایسه با یک طرح رادار کلاسیکی با استفاده از همان تعداد فوتون مستقل، باریک شده است. این روش، محدودیت‌هایی از جمله حساسیت بالا به نویز دارد [۲۷].

### ۳-۵- تصویربرداری از مغز

حسگرهای کوانتومی همچنین توانایی تصویربرداری از داخل مغز را دارند. مایع داخل جمجمه، به دلیل اینکه رسانای الکتریکی است، سیگنال‌های الکتروانسفالوگراف (EEG)، که یک فناوری تصویربرداری رایج است را از بین می‌برد. این یک مشکل اساسی در هنگام تشخیص و درک اختلالاتی نظیر جنون و زوال عقلی است که شامل ساختارهای مغزی عمیق است. حسگرهای کوانتومی از توسعه مغناطوسفالوگراف (MEG): اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله گردش جریان از طریق مجامع عصبی در مغز پشتیبانی می‌کند و نشان می‌دهد که مغز چگونه شبکه‌های عصبی را در بازه زمانی میلی‌ثانیه، به‌عنوان بخشی از فرآیند پشتیبانی تشکیل می‌دهد و حل می‌کند. با استفاده از حسگرهای کوانتومی این کار را می‌توان در حالیکه سوژه

حرکت می‌کند، برخلاف ابزارهای فعلی انجام داد. میدان مغناطیسی مغز هنگام ریتم آلفا 0.1 IPT می‌باشد. مگنومتر را در نزدیکی سر بیمار قرار می‌دهند که در نوع تک کانالی، با چرخش آن، میدان مغناطیسی تمام نقاط اندازه‌گیری می‌شود. در نوع چندکانالی، مگنومتر بصورت آرایه‌ای از اسکوئیدها مانند کلاه تمام کاسه سر را پوشش می‌دهد، بدون حرکت می‌توان شار مغناطیسی به‌صورت سیگنال قابل اندازه‌گیری، ثبت شود (شکل ۱۰).

MEG در نقشه‌برداری سطحی و بررسی ماهیت لحظه‌ای تحلیل سیگنال‌ها در مغز در عصب‌شناسی، درد و مکان‌یابی مراکز آسیب و تخلیه حملات صرع کاربرد دارد. به این ترتیب چنین نوآوری‌هایی می‌تواند از تشخیص و نظارت بر سایر شرایط مانند اختلالات کم‌توجهی و بیش‌فعالی حمایت کند [۲۸].

### ۳-۶- میکروسکوپ نقطه کوانتومی برای اندازه‌گیری پتانسیل تک اتم‌ها

یک روش جدید میکروسکوپی نقطه کوانتومی می‌تواند پتانسیل الکتریکی یک نمونه را با دقت اتمی اندازه بگیرد، که کاربردهای بالقوه‌ای برای ساخت تراشه و تشخیص ملکول‌های زیستی دارد. در روش تصویربرداری جدیدی که محققان ابداع کردند، یک نقطه کوانتومی به نوک یک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) متصل شد، تا به‌عنوان یک آشکارگر تصویربرداری بدون تماس عمل کند. نقطه کوانتومی به اندازه‌ای کوچک بود که الکترون‌های نوک AFM می‌توانستند به شیوه‌ای کنترل شده به آن متصل شوند. حسگر نقطه کوانتومی و پوشش الکتروستاتیک نوک و سطح، تصویربرداری از مقیاس‌های طولی حتی در سطح تک‌اتم‌ها را امکان‌پذیر کرد.

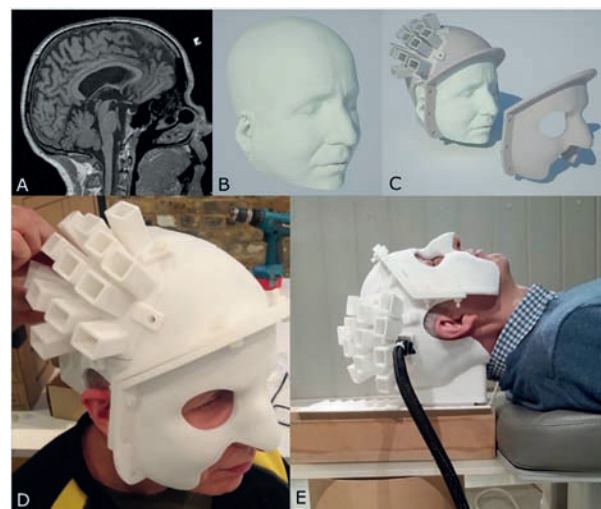
تمام عناصر یک نمونه، میدان‌های الکتریکی تولید می‌کنند که نقطه کوانتومی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و می‌تواند اندازه‌گیری شوند. نوک میکروسکوپ به‌عنوان یک محافظ عمل نموده و میدان‌های مخرب نواحی دورتر نمونه را تعدیل می‌کند. تاثیر میدان‌های الکتریکی محافظت‌شده، به‌طور نمایی کاهش می‌یابد و نقطه کوانتومی فقط ناحیه‌ی اطراف را آشکارسازی می‌کند. بنابراین وضوح این میکروسکوپ بسیار بالاتر از وضوحی است که از یک آشکارگر نقطه‌ای ایده‌آل انتظار می‌رود.

محققان برای امکان اندازه‌گیری سطح نمونه، یک کنترل‌کننده را توسعه دادند که به اتوماتیک کردن توالی تکراری تصویربرداری نمونه کمک کرد. با استفاده از کنترل‌کننده‌ی این میکروسکوپ می‌توان به‌سادگی، کل سطح را اسکن کرد. درحالی‌که تصویربرداری از یک ملکول، ۵ تا ۶ ساعت زمان می‌برد، اکنون می‌توان نمونه‌ای با صدها ملکول را تنها در یک ساعت، تصویربرداری کرد [۲۹].

### ۴- تجاری‌سازی حسگرهای کوانتومی

یکی از موارد مهمی که باید در زمینه تجاری‌سازی این تکنولوژی مدنظر قرار داد، توجه به زنجیره عملیات مورد نیاز برای آن است. استفاده از ابزارهایی در ساخت حسگرهای کوانتومی که نسبت به ادوات فعلی با دقت مشابه دارای قیمت کمتر و سایز بسیار کوچکتر باشد. لذا می‌توان این انتظار را داشت که بسیاری از محدودیت‌های آرایه به بازار را در زمینه‌های مختلفی همچون ژئوفیزیک و مسیریابی برطرف نماید.

لیزرها: لیزرها از جمله ادوات ضروری مورد نیاز جهت ساخت در مقیاس نانو می‌باشند. استفاده از لیزرهای تجمیعی نیمه‌هادی که دارای ۱٪ هزینه ۰/۱٪ سایز سیستم‌های لیزر صنعتی برای اهداف تداخل‌سنجی اتمی است، می‌تواند گزینه جایگزین مناسبی باشند.



شکل ۱۰: طراحی و ساخت قالب سر برای تصویربرداری از مغز [۲۸]

جهت کاربردهای ژئوفیزیک و دفاعی وجود دارند. از طرفی همچنان پتانسیل کوچک‌سازی و کاهش قیمت برای این دست حسگرها وجود دارد. دو حوزه‌ای که می‌توان هدف‌گذاری این جهش تکنولوژیکی را روی آن‌ها قرار داد، شامل حسگرهای جاذبه مطلق که در زمینه اندازه‌گیری تعاریف فیزیکی مرسوم کاربرد دارند و دیگری حسگرهای جاذبه آرایه‌ای یا متغیر که جهت عملیات در اعماق زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فناوری بر مبنای تداخل‌سنجی سقوط آزاد اتمی خواهد بود، که در حال حاضر از جمله دقیق‌ترین روش‌های موجود است. در نهایت این دورنما منجر به تولید حسگرهای جاذبه با قابلیت تصویربرداری و حساسیت nano-g می‌شود.

**حسگرهای مغناطیسی:** امروزه حسگرهای مغناطیسی در رنج اندازه میکرو تا ماکرو می‌توانند کاربردهای زیادی داشته باشند. به‌طورمثال یکی از تحقیقات جالب در این زمینه ارتقای میکروسکوپ مغناطیسی اتمی سرد با تصویربرداری یک بعدی در مقیاس میلی‌متری و با رزولوشن میکرونی با قابلیت آنالیز استروبو اسکوپ پیوندهای دینامیکی و همچنین مغناطیس‌سنجی تغییرات آرایه‌های یونی در مقیاس میلی‌متر تا سانتی‌متر بدون نویز می‌باشد که می‌تواند جایگاه خوبی در بازار فعلی پیدا کند. همچنین در ابعاد بزرگتر از سانتی‌متر، حسگرهای مغناطیسی با اتم‌های حرارتی در میکرومحفظه می‌توانند به‌خوبی با افزاره‌های تداخل‌سنج کوانتومی ابرهادی از لحاظ حساسیت رقابت کنند که منجر به کاهش هزینه و صدمات زیست‌محیطی می‌شود.

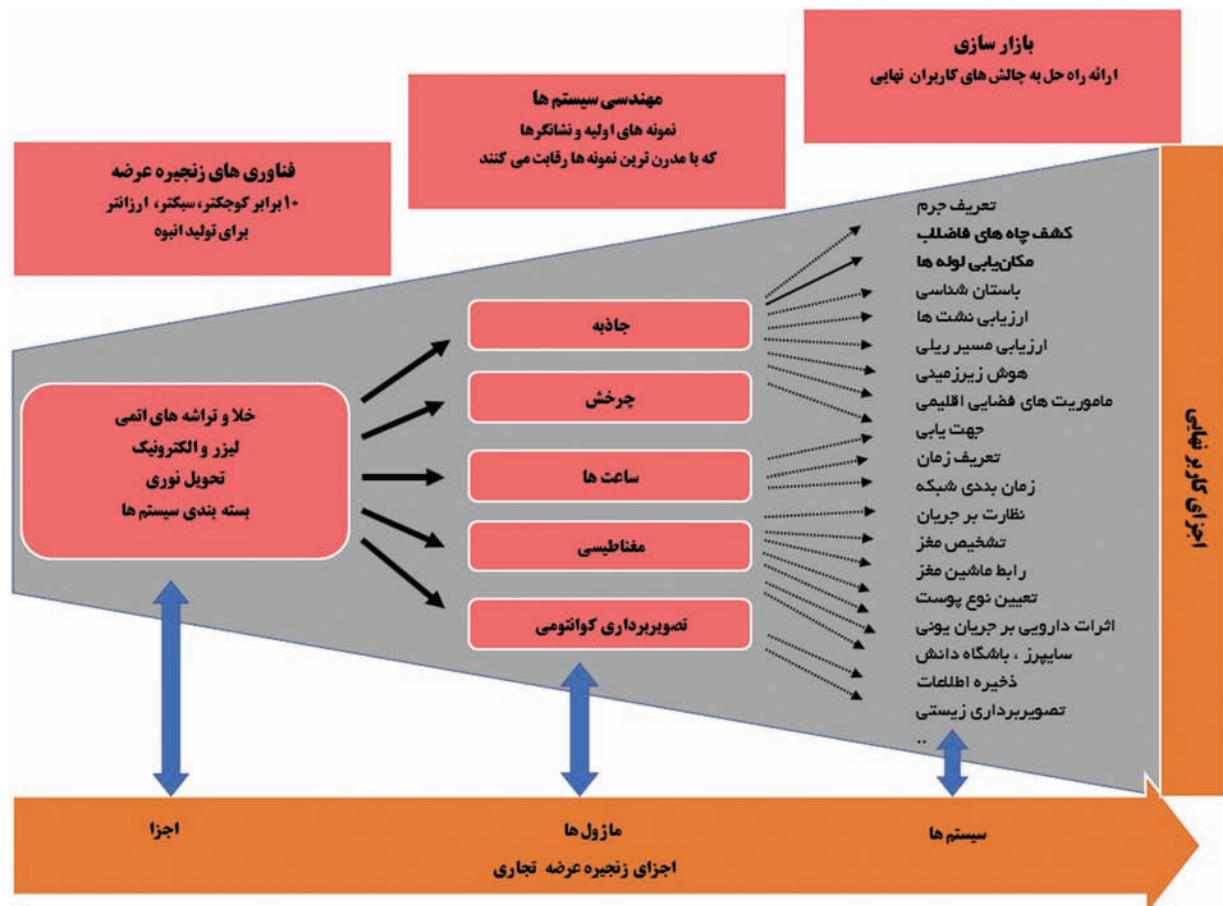
**حسگرهای دورانی:** در حال حاضر نمونه حسگر اتمی سرد صنعتی

نوع دیگری از لیزرها با عنوان لیزرهای تیلورد<sup>۴۰</sup> شناخته می‌شوند، که در زمینه حسگرهای کوانتومی کاربرد دارند. این دست لیزرها براساس تکنولوژی وسل<sup>۴۱</sup> می‌باشد که در حال حاضر می‌تواند با توجه به ویژگی‌هایی چون کوچک بودن، صلبیت، پایداری و انعطاف‌پذیری طیف جایگزین سیستم‌های توان بالای صنعتی شوند. همچنین نوع دیگر از لیزرهای مناسب جهت استفاده لیزرهای همگرای فمتوثانیه هستند.

**بسته‌بندی اتمی:** این قسمت فضایی را جهت استفاده از اتم‌ها و یون‌ها به‌عنوان اجزای پروب دستگاه فراهم می‌آورد، که شامل ایجاد خلا و میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌شود. یکی از ترندهای مناسب در این زمینه استفاده از چیپ‌های آرایه یونی می‌باشد، که می‌تواند بر محدودیت تک‌یونی در مغناطیس‌سنجی و ساعت‌ها غلبه نماید. محفظه‌های خلا بدون پمپ با استفاده از ارتقای تکنولوژی خلا اتمی سرد قابل تولید با هزینه پایین و تعداد بالا می‌باشد.

**بسته‌بندی سیستمی:** تبدیل اجزای مختلف حسگر به یک سیستم مستقل و یکپارچه مستلزم یک عملیات مهندسی پیچیده است. علاوه بر تکنولوژی‌های موجود فعلی، استفاده از پرینترهای سه بعدی در مقیاس کوچک و شیلدهای مغناطیسی می‌توانند گزینه‌های بهینه‌ای باشند. جهت نمونه‌سازی برای حسگرهای مختلف، نیاز به مهارت‌ها و فرآیندهای به‌خصوصی است. در ادامه ویژگی حسگرهای مختلف تجاری‌سازی شده از نظر ساخت، بهینه‌سازی و بهبود عملکرد مورد بررسی قرار می‌گیرند.

**حسگرهای جاذبه:** در این حوزه، حسگرهای کوچک با کارایی بالا



شکل ۱۱: سلسله مراتب و تجهیزات کلیدی برای تجاری‌سازی حسگرهای کوانتومی [۳۰]

جهت اندازه‌گیری‌های دورانی در بازار یافت نمی‌شود. برای غلبه بر چالش موجود در زمینه حسگرهای دورانی سرد، می‌توان از تکنیک‌های پالسی بهره گرفت و از آن‌ها جهت ساخت ژيروسکوپ‌های اتمی سرد کوچک بهره برد. البته به موازات این طرح، باید راهکارهای کوچک‌سازی تجهیزات هم مورد بررسی قرار گیرد. ضمن اینکه می‌توان در صورت نیاز از روش‌های جایگزینی چون تکنولوژی موجبرهای برپایه مایکروویو برای حسگرهای دورانی استفاده نمود.

**ساعت‌های اتمی:** ساعت‌های اتمی برپایه اتم‌های داغ پیش از این به‌صورت تجاری عرضه شده‌اند و در زمینه شبکه‌های ارتباطی، جهت یابی و تحقیقات آزمایشگاهی کاربرد دارد.

در صورت مدنظر قرار دادن ارتقای نسل جدید ساعت‌ها بر مبنای تکنولوژی اتمی سرد دو مسیر قابل تصور است. مورد اول ساعت مایکروویو اتمی سرد کوچک با حساسیت<sup>۱۳-۱۰</sup> براساس تکنولوژی شبکه‌ای تک‌پرتویی است، که منجر به بهبود شرایط از لحاظ هزینه، سایز و پایداری نسبت به مدل‌های موجود می‌شود. مورد دوم، ساعت نوری با حساسیت<sup>۱۶-۱۰</sup> در یک طراحی قابل حمل بر مبنای عنصر استرانسیوم در شبکه نوری است.

**تصویربرداری کوانتومی:** در این حوزه ارتقای منابع نور کوانتومی کوچک منجر به فشرده شدن مد چندفضایی می‌شود، که خود می‌تواند سطح نویز را جهت تصویربرداری به شدت کاهش دهد. در نهایت در صورت عملکرد مثبت و نداشتن دورنما در راستای ارایه ادوات ساخته شده بر مبنای تکنولوژی کوانتومی می‌توان بازاری در حدود ۱ میلیارد در سال را پیش بینی کرد، که مهم‌ترین حوزه‌های مورد استفاده شامل مهندسی عمران جهت کاوش‌های زیرزمینی و همچنین کاربردهای پزشکی می‌باشد [۳۰].

## ۵- چشم‌انداز حسگرهای کوانتومی

حسگری کوانتومی، برخلاف تاریخچه‌ی غنی‌اش در طیف‌سنجی اتمی و تداخل‌سنجی کلاسیکی، یک حوزه‌ی هیجان‌انگیز جدید و تازه است، که در حاشیه‌ی حوزه‌ی اصلی مهندسی کوانتومی، به سرعت در حال رشد است. حسگری کوانتومی برخلاف سایر حوزه‌ها، بخش‌های مختلف علم و فناوری را برای ایجاد فرصت‌ها و کاربردهای بنیادی جدید متحد کرده است.

در حالی که تاکنون بسیاری از آزمایش‌ها از حسگرهای تک‌کیوبیت استفاده کرده‌اند، کشف راهبردهای پیاده‌سازی حسگرهای چندکیوبیتی درهم‌تنیده با قابلیت‌های بهبودیافته و حساسیت بالاتر، شروع شده است. یکی از بزرگ‌ترین جذابیت‌های حسگرهای کوانتومی، پتانسیل فوری آن‌ها برای کاربردهای عملی است. این پتانسیل، تا حدودی به دلیل محدوده‌ی عظیم پیاده‌سازی‌های حسگرهای کشف‌شده (آغاز شده با سیستم‌های اسپین حالت جامد و اتمی و در ادامه با درجات آزادی ارتعاشی و الکترونی از مقیاس اتمی تا ماکرو) است. در حقیقت، حسگرهای کوانتومی مبتنی بر مغناطیس‌سنج‌های SQUID و بخارهای اتمی، در حال حاضر مورد استفاده روزمره بوده به‌عنوان حساس‌ترین آشکارسازهای میدان مغناطیسی که در حال حاضر در دسترس هستند، شناخته می‌شوند. به همین ترتیب، ساعت‌های اتمی، به استاندارد اصلی برای زمان‌سنجی و تولید فرکانس تبدیل شده‌اند مراکز NV در الماس به دلیل اندازه کوچکشان، به‌شدت در حال تسخیر بسیاری از کاربردهای تصویربرداری مقیاس نانو هستند.

با ظهور حسگرهای جدید و پیاده‌سازی‌های بالغ‌تر، محدوده کاربردها همچنان توسعه خواهد یافت. با در نظر گرفتن اثری که

مغناطیس‌سنج‌های کوانتومی و ساعت‌های اتمی در قلمروی خاص خود داشتند، می‌توان انتظار داشت که حسگرهای کوانتومی به بیشتر فناوری‌های قرن بیست‌ویکم نفوذ کرده و جای خود را هم در دستگاه‌های سطح بالا و هم مصرف‌کننده باز کنند. دسترس‌پذیری مواد بهتر و کنترل دقیق‌تر، پیشرفت حسگرهای کوانتومی را کنترل می‌کند. حسگری کوانتومی به طور همزمان، از پژوهش‌های فناوری کوانتومی، به ویژه در محاسبات کوانتومی که بسیاری از مفاهیم بنیادی توسعه یافته‌اند، بهره خواهد برد. از طرفی، حسگری کوانتومی، به منبع مهمی برای فناوری‌های کوانتومی تبدیل خواهد شد که به‌ویژه از طریق طیف‌سنجی و اهمدوسی، دید بهتری را از محیط کیوبیت‌ها بدست می‌دهد [۱].

## ۶- نتیجه‌گیری

حسگرهای کوانتومی از حالت‌های کوانتومی برای حسگری استفاده می‌کنند. آن‌ها بر این واقعیت استوارند که حالت‌های کوانتومی به نوبت بسیار حساس هستند، که این بدان معنی است که، آن‌ها همچنین توانایی تبدیل به ابزار اندازه‌گیری فوق‌العاده حساس را دارند.

دستگاه‌های اندازه‌گیری که از خواص کوانتومی بهره می‌برند، مانند ساعت‌های اتمی و یا تصویربرداری رزونانس مغناطیسی که برای تشخیص پزشکی به کار برده می‌شود مدت‌هاست که پیرامون ما وجود داشته‌اند، اما آنچه که به عنوان ابزار جدید در نظر گرفته می‌شوند، سیستم‌های کوانتومی جداگانه، مانند اتم‌ها و فوتون‌ها، به‌طور فزاینده‌ای به عنوان کاوشگرهای اندازه‌گیری استفاده می‌شوند و از درهم‌تنیدگی و دستکاری حالت‌های کوانتومی برای افزایش حساسیت استفاده می‌کنند.

درک بهتر و اهمدوسی در یک پیاده‌سازی خاص یک سیستم کوانتومی می‌تواند به اتخاذ راهبردهایی برای محافظت از کیوبیت کمک کرده و توسعه‌ی مواد و مهندسی را هدایت نماید. همچنین مرز بین شبیه‌سازی کوانتومی و حسگری کوانتومی، در حال تبدیل شدن به زمین حاصلخیزی برای شبیه‌سازی و آشکارسازی پدیده‌های فیزیک چندزده‌ای است. در نهایت، حسگری کوانتومی، پتانسیل لازم برای تغییر بنیادی قابلیت‌های اندازه‌گیری، امکان حساسیت و دقت بالاتر را داراست.

یک چالش رایج در سنجش کوانتومی تعارض بین جداسازی حالت‌های کوانتومی حساس از اختلالات بیرونی است، در حالی که در عین حال قادر به دستکاری حالت‌های کوانتومی و قرار دادن آن‌ها در برابر مقدار فیزیکی است که باید اندازه‌گیری شود. از لحاظ تئوری، حسگرهای کوانتومی از مزیت اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق‌تر نسبت به حسگرهای معمولی برخوردار هستند. اما برای اینکه از نظر تجاری جذاب‌تر شوند، این مزیت را باید در عمل با قیمت مناسب تحقق بخشید.

## پی‌نوشت‌ها

- 1 quantum sensing
- 2 quantum entanglement
- 3 quantum sensors
- 4 DiVincenzo
- 5 Rydberg
- 6 Stark
- 7 Barredo
- 8 Spontaneous parametric down-conversion
- 9 volume Bragg grating

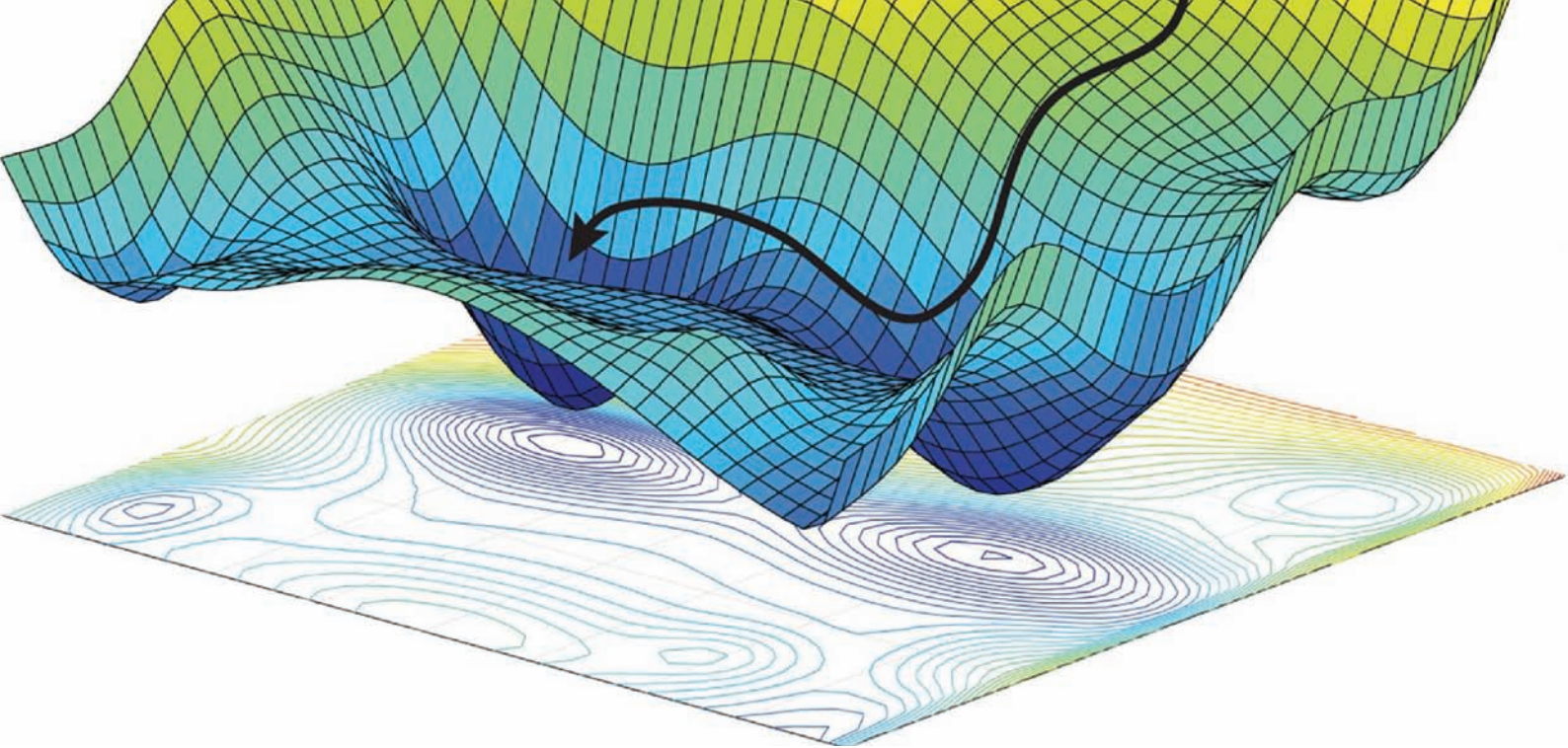
- vol. 366, no. 6471, pp. 1349–1354, 2019.
- [11] A. Gottscholl et al., "Initialization and read-out of intrinsic spin defects in a van der Waals crystal at room temperature," *Nat. Mater.*, 2020.
- [12] T. M. Karg, B. Gouraud, C. T. Ngai, G.-L. Schmid, K. Hammerer, and P. Treutlein, "Light-mediated strong coupling between a mechanical oscillator and atomic spins 1 meter apart," *Science* (80-. ), p. eabb0328, 2020.
- [13] S. T. Velez, K. Seibold, N. Kipfer, M. D. Anderson, V. Sudhir, and C. Galland, "Preparation and Decay of a Single Quantum of Vibration at Ambient Conditions," *Phys. Rev. X*, vol. 9, no. 4, p. 41007, 2019.
- [14] C. Abel et al., "Measurement of the Permanent Electric Dipole Moment of the Neutron," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, no. 8, p. 81803, 2020.
- [15] Q. Zhong, J. Ren, M. Khajavikhan, D. N. Christodoulides, K. Özdemir, and R. El-Ganainy, "Sensing with Exceptional Surfaces in Order to Combine Sensitivity with Robustness," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 15, p. 153902, 2019.
- [16] M. Lee et al., "Ion-Based Quantum Sensor for Optical Cavity Photon Numbers," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 15, p. 153603, 2019.
- [17] S. J. Gibson et al., "Tapered InP nanowire arrays for efficient broadband high-speed single-photon detection," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 14, no. 5, pp. 473–479, 2019.
- [18] J. Cripe et al., "Measurement of quantum back action in the audio band at room temperature," *Nature*, vol. 568, no. 7752, pp. 364–367, 2019.
- [19] V. V. Zemlyanov et al., "Phase estimation algorithm for the multibeam optical metrology," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [20] K. E. McAlpine, D. Gochnauer, and S. Gupta, "Excited-band Bloch oscillations for precision atom interferometry," *Phys. Rev. A*, vol. 101, no. 2, p. 23614, 2020.
- [21] L. Gu et al., "Molecular resolution imaging by repetitive optical selective exposure," *Nat. Methods*, vol. 16, no. 11, pp. 1114–1118, 2019.
- [22] Q. Bouton et al., "Single-Atom Quantum Probes for Ultracold Gases Boosted by Nonequilibrium Spin Dynamics," *Phys. Rev. X*, vol. 10, no. 1, p. 11018, 2020.
- [23] M. Mehboudi, A. Lampo, C. Charalambous, L. A. Correa, M. Á. García-March, and M. Lewenstein, "Using Polarons for sub-nK Quantum Nondemolition Thermometry in a Bose-Einstein Condensate," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 3, pp. 3–7, 2019.
- [24] R. Kokkonen et al., "Nanobolometer with ultralow noise equivalent power," *Commun. Phys.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [25] E. Cartlidge, "Quantum Sensors: A Revolution in the Offing?" *Opt. Photonics News*, vol. 30, no. 9, p. 24, 2019.
- [26] P. Rehain et al., "Noise-tolerant single photon sensitive three-dimensional imager," *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, 2020.
- [27] L. Maccone and C. Ren, "Quantum Radar," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, no. 20, p. 200503, 2020.
- [28] E. Boto et al., "A new generation of magnetoencephalography: Room temperature measurements using optically-pumped magnetometers," *Neuroimage*, vol. 149, no. January, pp. 404–414, 2017.
- [29] C. Wagner et al., "Quantitative imaging of electric surface potentials with single-atom sensitivity," *Nat. Mater.*, vol. 18, no. 8, pp. 853–859, 2019.
- [30] K. Bongs et al., "The UK National Quantum Technologies Hub in sensors and metrology (Keynote Paper)," *Quantum Opt.*, vol. 9900, no. June, p. 990009, 2016.

\*\*\*

- 10 periodically poled lithium niobite  
 11 indium tin oxide  
 12 Norcia  
 13 Larmor  
 14 Nitrogen-Vacancy  
 15 optically detected magnetic resonance  
 16 Diamond anvil cell  
 17 Hsieh  
 18 Gottscholl  
 19 Aharonov-Bohm  
 20 Josephson  
 21 neutron electric dipole moment  
 22 micro ring  
 23 Zhong  
 24 Lee  
 25 Ramsey spectroscopy  
 26 single-photon-counting module  
 27 Gibson  
 28 back action  
 29 repetitive optical selective exposure  
 30 single-molecule localization microscopy  
 31 Bouton  
 32 Mehboudi  
 33 Bose-Einstein condensate  
 34 Muquans  
 35 Bongs  
 36 Thales  
 37 Lockheed Martin  
 38 Rehain  
 39 quantum parametric mode sorting  
 40 tailored  
 41 VECSEL

## مراجع

- [1] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, "Quantum sensing," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 89, no. 3, pp. 1–45, 2017.
- [2] Y. J. Chen et al., "Single-Source Multi-axis Cold-Atom Interferometer in a Centimeter-Scale Cell," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 12, no. 1, p. 1, 2019.
- [3] K. R. Rusimova et al., "Atomic dispensers for thermoplasmonic control of alkali vapor pressure in quantum optical applications," *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [4] D. Barredo et al., "Three-Dimensional Trapping of Individual Rydberg Atoms in Ponderomotive Bottle Beam Traps," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, no. 2, 2020.
- [5] M. Kutas, B. Haase, P. Bickert, F. Riexinger, D. Molter, and G. von Freymann, "Terahertz quantum sensing," *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 11, 2020.
- [6] D. H. Meyer, Z. A. Castillo, K. C. Cox, and P. D. Kunz, "Assessment of Rydberg atoms for wideband electric field sensing," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 53, no. 3, 2020.
- [7] M. A. Norcia, A. W. Young, W. J. Eckner, E. Oelker, J. Ye, and A. M. Kaufman, "Seconds-scale coherence on an optical clock transition in a tweezer array," *Science* (80-. ), vol. 366, no. 6461, pp. 93–97, 2019.
- [8] Q. Zhuang, Z. Zhang, and J. H. Shapiro, "Distributed quantum sensing using continuous-variable multipartite entanglement," *Phys. Rev. A*, vol. 97, no. 3, pp. 1–7, 2018.
- [9] D. Kim, M. I. Ibrahim, C. Foy, M. E. Trusheim, R. Han, and D. R. Englund, "A CMOS-integrated quantum sensor based on nitrogen-vacancy centres," *Nat. Electron.*, vol. 2, no. 7, pp. 284–289, 2019.
- [10] S. Hsieh et al., "Imaging stress and magnetism at high pressures using a nanoscale quantum sensor," *Science* (80-.),



مقاله علمی-ترویجی

## الگوریتم‌های فراکاوشی جدید

علی کارساز / عضو هیئت‌علمی موسسه آموزش عالی خراسان / a.karsaz@khorasan.ac.ir

محبوبه قاسمی / موسسه آموزش عالی خراسان / m.ghasemi@khorasan.ac.ir

### چکیده

پیچیدگی مدل‌های ریاضی، افزایش نمایی زمان حل بسیاری از روش‌ها، عدم دسترسی به اطلاعات گرادیان و همگرایی به بهینه محلی، از جمله مشکلاتی هستند که الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک در حل مسایل پیچیده با آن‌ها مواجه هستند. به‌منظور رفع این مشکلات از الگوریتم‌های فراکاوشی به‌طور گسترده برای حل مسایل پیچیده و چند متغیره استفاده می‌شود. انتخاب بهترین و مناسب‌ترین الگوریتم به دلیل تنوع بالای آن‌ها کاری دشوار است. در پژوهش‌های گذشته برخی از این روش‌ها جمع‌بندی شده‌اند ولی به دلیل انتشار بیش از اندازه این الگوریتم‌ها در سال‌های اخیر، مقاله‌ای مشخصی که تمامی این روش‌ها را بیان و مقایسه نماید وجود ندارد. در این مقاله مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی از سال ۲۰۱۲ تاکنون معرفی شده است. در بخش‌های مجزا برای هر الگوریتم، تاریخچه، منبع الهام، تابع هدف و تعداد پارامترهای تنظیم آن بیان شده است. سپس با استفاده از چندین نظریه، این الگوریتم‌ها دسته‌بندی و مقایسه شده‌اند. با توجه به نوع کاربرد هر الگوریتم در مسایل مهندسی، نمی‌توان الگوریتم واحدی را به‌عنوان بهترین روش معرفی نمود با این وجود الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)، یکی از الگوریتم‌های با تعداد ارجاع بالا در سال‌های اخیر می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراکاوشی، تکامل، بهینه‌سازی ازدحام موجودات.

## New Metaheuristic Algorithms

Ali Karsaz/ Khorasan Institute of Higher Education/ a.karsaz@khorasan.ac.ir

Mahboobe Ghasemi/ Khorasan Institute of Higher Education/ m.ghasemi@khorasan.ac.ir

### Abstract

The complexity of mathematical models, exponential growth of the solution time for many methods, lack of access to gradient information and optimal local convergence are some of the problems that optimal classical algorithms face in solving complex problems. In order to eliminate these drawbacks, metaheuristic algorithms are widely used to solve complex and multivariate problems. Choosing the best and most suitable algorithm is difficult due to their high diversity. In previous studies, some of these methods have been summarized, but due to overpublicize of these methods in recent years, there is no specific article to describe and compare all of these methods. In this paper, the most important metaheuristic optimization

algorithms are introduced from 2012 till now. In separate sections for each algorithm, the history, source of inspiration, objective function and number of its setting parameters are stated. These algorithms are then categorized and compared using several theories. Due to the type of application of each algorithm in engineering problems, it is not possible to introduce a single algorithm as the best methodology, but the Gray Wolf Optimization (GWO) algorithm is one of the algorithms with a high number of citations in recent years.

**Keywords:** Optimization, Metaheuristic algorithms, Evolution, Particle swarm optimization.

## ۱- مقدمه

بهینه‌سازی، عمل به‌دست آوردن بهترین نتیجه تحت یک شرایط مشخص است. در مسایل مهندسی با مواردی مانند حداقل کردن هزینه، کوتاه‌ترین طول، بیشترین استقامت، بهترین ساختار و ... برخورد می‌شود که نیاز به مدل‌سازی ریاضی با ساختار یک مساله بهینه‌سازی و حل آن با روش‌های مناسب است. روش‌های بهینه‌سازی متنوعی به‌تناسب نوع مدل‌سازی مساله مانند خطی یا غیرخطی، مقید یا نامقید، پیوسته یا گسسته و ... معرفی شده‌اند.

به‌طور کلی، روش‌های موجود برای بهینه‌سازی به دو دسته کلی روش‌های کلاسیک (ریاضی) و الگوریتم‌های فراکاوشی تقسیم می‌شوند:

- به مفاهیم به نسبت ساده تکیه می‌کنند.
- به اطلاعات مشتق تابع هدف نیازی ندارند.
- با عملگرهای خاص خود قادر به فرار از بهینه محلی و کشف بهینه کلی هستند.

- در بیشتر مسایل موجود در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

انتخاب الگوریتمی مناسب برای مسایل مختلف دارای اهمیت زیادی می‌باشد و ممکن است محققان برای انتخاب آن، زمان زیادی را صرف نمایند. هدف از این تحقیق جمع‌بندی الگوریتم‌های کاربردی با بیشترین ارجاع در سال‌های اخیر می‌باشد. آقای شریف‌زاده و امجدی در سال ۹۳ تعدادی از این روش‌ها را از سال ۱۹۶۶ تا ۲۰۱۲ گردآوری کرده‌اند و این تحقیق به معرفی سایر روش‌ها از سال ۲۰۱۲ به بعد می‌پردازد [۱].

در بخش دوم، حدود ۳۰ الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی معرفی شده است و همچنین سال انتشار، اولین مقاله‌ی بیان‌کننده، تعداد پارامترهای تنظیم، منبع الهام و برتری هر کدام از این روش‌ها نسبت به سایر روش‌ها بررسی شده است. در بخش سوم، جمع‌بندی و مقایسه این روش‌ها بیان شده است و در آخر به بحث و نتیجه‌گیری درباره‌ی این روش‌ها پرداخته شده است.

## ۲. بررسی الگوریتم‌های فراکاوشی

الگوریتم‌های فراکاوشی یا فراتکاملی یا فرااکتشافی نوعی از الگوریتم‌های تصادفی هستند که برای یافتن پاسخ بهینه به کار می‌روند. رده‌های گوناگونی از این نوع الگوریتم‌ها در دهه‌های اخیر توسعه یافته است که همه این‌ها زیرمجموعه الگوریتم فراکاوشی می‌باشند. معیارهای مختلفی می‌تواند برای طبقه‌بندی الگوریتم‌های فراکاوشی استفاده شود:

- الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت (در مقابل الگوریتم‌های مبتنی بر یک جواب): مانند الگوریتم جستجوی جغد و الگوریتم انفجار معدن
- الگوریتم‌های الهام گرفته‌شده از طبیعت: مانند جستجوی کلونی و بروس، الگوریتم بویایی کوسه، بهینه‌سازی نهنگ

- الگوریتم‌های حافظه‌دار (در مقابل الگوریتم‌های بدون حافظه): مانند الگوریتم کلونی امپراتور و جستجوی کلاغ‌ها
- الگوریتم‌های قطعی در مقابل الگوریتم‌های احتمالی
- الگوریتم‌های دارای ساختار همسایگی متغیر در برابر ساختار همسایگی واحد [۳]

در ادامه تعدادی از این الگوریتم‌ها از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۹ معرفی و بررسی شده است:

### ۲-۱- الگوریتم کلونی پنگوئن‌های امپراتور (EPC)

در مرجع [۴] یک الگوریتم جدید فراکاوشی مبتنی بر رفتار پنگوئن‌های امپراتور در مستعمرات خود پیشنهاد شده است. این الگوریتم مبتنی بر ازدحام موجودات و الهام گرفته از طبیعت می‌باشد که توسط تابش گرمای بدن پنگوئن‌ها و حرکت مارپیچی آن‌ها در مستعمره خود کنترل می‌شود. در مقاله [۴] الگوریتم پیشنهادی با هشت الگوریتم شناخته‌شده (GWO و GA، ICA، PSO، ABC، DE، HS، IWO) در ده تابع محک استاندارد مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌های آماری ایمان دیوبین پورت و فرایدمن، نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در هشت تابع بهتر از سایر الگوریتم‌های شناخته‌شده است و تنها در دو تابع الگوریتم GWO عملکرد بهتری نسبت به این الگوریتم دارد. الگوریتم EPC یک الگوریتم حافظه‌دار می‌باشد و برای حل مسایل چند متغیره مناسب است.

### ۲-۲- الگوریتم سنجاک (DA)

الگوریتم سنجاک در دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت مبتنی بر ازدحام موجودات قرار می‌گیرد که ایده آن از رفتار سنجاک‌ها در شکار طعمه الهام گرفته شده است و دارای پنج پارامتر کنترلی شامل: انسجام، اتحاد، جداسازی، جذب (افراد نسبت به منابع غذایی) و حواس‌پرتی (دشمنان بیرون) از افراد درون گروه، می‌باشد. در مرجع [۳] علاوه بر الگوریتم DA، الگوریتم سنجاک با باینری و الگوریتم سنجاک چند هدفه را نیز معرفی کرده است. نتایج نشان داده‌اند که این روش کارایی بیشتری نسبت به الگوریتم‌های GA و PSO دارد.

### ۲-۳- الگوریتم جستجوی جغد (OSA)

الگوریتم جستجوی جغد یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است که برای حل مشکلات بهینه‌سازی جهانی طراحی شده است. OSA یک روش مبتنی بر جمعیت است که بر اساس مکانیزم شکار کردن جغدها در تاریکی مدل‌سازی شده است. در مرجع [۵] نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که OSA نتایج امیدوارکننده‌ای را نسبت به شش الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی دیگر ارائه می‌دهد.

### ۲-۴- الگوریتم ریشه رونده (RRA)

یکی از جدیدترین الگوریتم‌های تکاملی که اخیراً معرفی شده است الگوریتم فراکاوشی بهینه‌سازی ریشه رونده می‌باشد که از ساقه‌های رونده و ریشه‌های بعضی از گیاهان در طبیعت الهام گرفته شده است.



شکل ۲: نحوه به دام افتادن مورچه‌ها توسط شیر مورچه [۱۰]

#### ۲-۸- الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه (ALO)

این الگوریتم از نحوه‌ی خاص شکار مورچه‌ها توسط شیر مورچه الهام گرفته است. شیر مورچه تله‌ی خود را به صورت گودال مخروطی شکل می‌سازد و به محض اینکه از حضور مورچه در تله آگاه می‌شود؛ دانه‌های ماسه را به طرف لبه‌ی گودال پرتاب می‌کند و در نهایت مورچه را شکار می‌کند [۱۰].

الگوریتم ALO به عنوان یک تابع سه متغیره می‌باشد که به صورت معادله ۱ تعریف می‌شود که در آن A یک تابع است که راه‌حل‌های تصادفی اولیه را تولید می‌کند (معادله ۲)، تابع B دست‌کاری جمعیت اولیه‌ای است (معادله ۳) که توسط تابع A ارایه‌شده و تابع C زمانی که معیار پایانی راضی کننده است، مقدار درست را برمی‌گرداند (معادله ۴).

$$(۱) ALO(A, B, C)$$

$$(۲) \phi \xrightarrow{A} \{M_{Ant}, M_{OA}, M_{Antlion}, M_{OAL}\}$$

$$(۳) \{M_{Ant}, M_{Antlion}\} \xrightarrow{B} \{M_{Ant}, M_{Antlion}\}$$

$$(۴) \{M_{Ant}, M_{Antlion}\} \xrightarrow{C} \{true, false\}$$

که در آن  $M_{Ant}$  ماتریس موقعیت مورچه‌ها، شامل موقعیت شیر مورچه‌ها،  $M_{OA}$  مورچه‌های شکار شده و  $M_{OAL}$  شیر مورچه‌های شکار کننده می‌باشند. یکی از موارد کاربرد این الگوریتم در انتخاب حسگر مناسب برای ربات‌های زیرسطحی هوشمند می‌باشد.

#### ۲-۹- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO<sup>[۱۱]</sup>)

آقای میر جلیلی نویسنده و مبتکر الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری و الگوریتم‌های ALO، SSA، WOA، MVO، SCA، RRA و ALO که در این مقاله بیان شده‌اند می‌باشند. الگوریتم گرگ خاکستری، یک الگوریتم فراکاوشی الهام گرفته از طبیعت است که اساس آن بر پایه‌ی ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ‌ها در زمان شکار می‌باشد. الگوریتم GWO فرایند ساده‌ای را در تنظیمات دارد و به راحتی قابلیت تعمیم به مسایل با ابعاد بزرگ را دارا می‌باشد. در پیاده‌سازی این پروژه، چهار نوع از گرگ‌های خاکستری مانند آلفا، بتا، دلتا و امگا برای شبیه‌سازی سلسله مراتب رهبری استفاده شده است که در آن سه گام اصلی از شکار، جستجو برای طعمه، محاصره طعمه و حمله به طعمه، اجرا می‌شوند. این الگوریتم تنها دارای دو پارامتر تنظیم می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که الگوریتم گرگ خاکستری عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم PSO داشته است [۱۱].

#### ۲-۱۰- الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA<sup>[۱۲]</sup>)

این الگوریتم با الهام از رفتار اجتماعی ملخ‌ها و نحوه تأثیرپذیری هر ملخ از محیط پیرامونش طراحی شده است. در این الگوریتم

این الگوریتم سرعت همگرایی و دقت بالایی در حل مسایل و دستیابی به نقطه بهینه سراسری دارد. در مرجع [۶] پس از مقایسه این روش با چند الگوریتم فراکاوشی دیگر و دستیابی به نتایج مطلوب، از این الگوریتم برای حل یک مساله مجهول در حوزه کنترل مقاوم استفاده شده است.

#### ۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی اتم (ASO)

الگوریتم ASO با ایجاد مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی، بهینه‌سازی را آغاز می‌کند. اتم‌ها موقعیت و سرعت خود را در هر تکرار به روز می‌کنند. شتاب اتم‌ها از دو بخش تشکیل شده است. یکی نیروی متقابل ایجادشده توسط پتانسیل لنارد- جونز است و دیگری نیروی محدود است که تفاوت موقعیت وزن بین هر اتم و بهترین اتم است. الگوریتم تا زمانی که متغیر توقف به مقدار نهایی خود برسد به روزرسانی می‌گردد. در نهایت، موقعیت و ارزش بهترین اتم به عنوان پاسخ در هر تکرار بازگردانده می‌شود. الگوریتم ASO تنها دو پارامتر تنظیم دارد که در بین الگوریتم‌های فراکاوشی یک مزیت محسوب می‌شود. الگوریتم پیشنهادی با پنج الگوریتم بهینه‌سازی دیگر (GA، PSO، SA، GSA و WDO) در ۳۷ تابع محک استاندارد و مساله واقعی تخمین پارامترهای هیدروژنولویکی مقایسه شده است. نتایج آزمون آماری ویلکاکسون نشان می‌دهند که این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری دارد [۱۷].

#### ۲-۶- الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ یا وال (WOA)



شکل ۱: روش شکار ویژه نهنگ کوهان‌دار [۸]

ساختار این الگوریتم از شیوه شکار حباب خالص وال‌ها الهام گرفته است. نهنگ کوهان‌دار ترجیح می‌دهد تا گروهی از کرپل‌ها یا ماهیان کوچک که نزدیک به سطح آب هستند را شکار کند که در آن حباب‌های متمایز همراه یک دایره یا مسیر ۹ وجهی توسط نهنگ ایجاد شده است. (شکل ۱) مدل ریاضی الگوریتم WOA که مبتنی بر روش تغذیه حباب خالص است؛ شامل مراحل محاصره طعمه، مانور تغذیه حباب خالص به صورت مارپیچی و به دام انداختن شکار می‌باشد [۸].

#### ۲-۷- الگوریتم بهینه‌سازی بویایی کوسه (SSO)

این الگوریتم بر اساس توانایی کوسه، به عنوان یک شکارچی برتر در طبیعت، برای یافتن طعمه طراحی و مدل‌سازی شده است که از حس بویایی کوسه و حرکت آن به سمت منبع بو الهام گرفته است. در مرجع [۹] مدل ریاضی رفتارهای مختلف کوسه برای جستجو طعمه در دریا بیان شده است. برای نشان دادن کارایی این روش در حل مسایل مهندسی واقعی، از این روش برای بهینه‌سازی کنترل فرکانس بار در سیستم‌های برق استفاده شده است. نتایج به دست آمده اعتبار الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی را تأیید می‌کند [۹].

به روزرسانی موقعیت هر ملخ به فاصله هر ملخ از تمام جمعیت ملخ‌ها در نسل جاری و موقعیت بهترین ملخ وابسته است. از ویژگی‌های این الگوریتم می‌توان به سادگی و دارا بودن فقط یک پارامتر تنظیم، ارجاع کرد. نتایج حاصل از توابع هدف گوناگون حاکی از عملکرد مطلوب الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه است [۱۲].

#### ۲-۱۱- الگوریتم گرده‌افشانی گل‌ها (FPA<sup>۲۴</sup>)

این الگوریتم از نحوه‌ی گرده‌افشانی گل‌ها الهام گرفته است. برخی گل‌ها و حشرات با یک مشارکت بسیار حرفه‌ای گرده‌افشانی را انجام می‌دهند. به‌عنوان مثال، برخی از گل‌ها فقط می‌توانند به یک‌گونه خاص حشرات برای گرده‌افشانی موفق جذب شوند.

در مرجع [۱۳] مقادیر بهینه‌سازی الگوریتم FPA، الگوریتم GA و الگوریتم PSO بر روی ده تابع محک استاندارد (روزنبرگ، رسترینگ، اکلی و ...) و یک مساله مهندسی واقعی (طراحی مخازن تحت‌فشار) به‌دست‌آمده است.

#### ۲-۱۲- الگوریتم جستجوی کلاغ‌ها (CSA<sup>۲۵</sup>)

کلاغ‌ها می‌توانند از ابزارها استفاده کنند، با روش‌های پیچیده‌ای ارتباط برقرار کنند و مکان‌های مخفی غذا خود را تا چند ماه بعد به یادآورند. آن‌ها مکان‌هایی را که پرندگان دیگر غذای خود را پنهان می‌کنند، مشاهده می‌کنند و زمانی که صاحب آن محل را ترک می‌کند، آن‌ها را سرقت می‌کنند [۱۴].

این الگوریتم بر روی چند تابع محک آزمایش‌شده و سپس بر روی شش مساله واقعی (طراحی خرپا سه‌پایه، طراحی مخازن تحت‌فشار، طراحی کشش / فشرده‌سازی فنر، طراحی پرتو جوشکاری، طراحی چرخ قطار و طراحی فنر بلویل) پیاده‌سازی شده است. نتایج الگوریتم در هر کدام از این مسایل با تعداد متفاوتی از الگوریتم‌های فراکاوشی دیگر مقایسه شده است.

#### ۲-۱۳- الگوریتم بهینه‌سازی شیر (LOA<sup>۲۶</sup>)

در این مقاله، یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت معرفی شده است. سبک زندگی خاص شیرها و ویژگی‌های هم‌کاری آن‌ها انگیزه اصلی برای توسعه این الگوریتم بهینه‌سازی بوده است. در مرجع [۱۵] این الگوریتم و شش الگوریتم فراکاوشی دیگر (BBO<sup>۲۷</sup>، HuS<sup>۲۸</sup>، JWO، GSA، WWO<sup>۲۹</sup> و BA<sup>۳۰</sup>) بر روی ۳۰ تابع محک استاندارد اعمال شده است و نتایج حاکی از برتری این روش نسبت به شش روش دیگر می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی شیر برای بهینه‌سازی مسایلی مانند: کنترل سیستم‌های قدرت، پخش بار اقتصادی بهینه در سیستم‌های قدرت و بهینه‌سازی پارامترهای پرداخت کردن سطوح حاصل از روش رولر برنیشینگ در مقالات استفاده شده است.

#### ۲-۱۴- الگوریتم بهینه‌سازی پروانه (ABO<sup>۳۱</sup>)

در مرجع [۱۶]، یک الگوریتم جدید الهام گرفته از طبیعت با عنوان الگوریتم بهینه‌سازی پروانه ارایه‌شده است که از رفتار جستجوی غذا و زادوولد پروانه‌ها برای حل مسایل بهینه‌سازی جهانی تقلید می‌کند. این چارچوب عمدتاً بر مبنای استراتژی تغذیه پروانه‌ها است که از حس بویایی برای تعیین موقعیت شهد یا زادوولد استفاده می‌کنند. الگوریتم ABO و چهار الگوریتم دیگر بر روی ۲۲ تابع محک استاندارد (تابع توان، تابع مجموع مربعات و ...) اعمال شده است. به منظور بررسی عملکرد این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌ها از دو روش تحلیل آماری برای مقایسه نتایج استفاده شده است.

#### ۲-۱۵- الگوریتم جستجوی سنجاب (SSA<sup>۳۲</sup>)

این الگوریتم یک روش الهام گرفته از طبیعت می‌باشد که از شیوه خاص پرواز سنجاب‌های جنوبی و روش حرکت آن‌ها معروف به گلایدینگ (بدون نیرو پرواز کردن) تقلید

می‌کند. این الگوریتم با شش الگوریتم دیگر (FF<sup>۳۳</sup>، GA، BA، PSO، MVO و KH<sup>۳۴</sup>) از لحاظ دقت بهینه‌سازی و میزان همگرایی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم جستجوی سنجاب پاسخ‌های دقیق‌تر را با سرعت همگرایی بالاتر در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها ارایه می‌دهد. از این الگوریتم در طراحی کنترل‌کننده دو درجه آزادی تناسبی - انتگرال‌گیر برای کنترل دما HFE استفاده شده است [۱۷].

#### ۲-۱۶- الگوریتم بهینه‌سازی کریل (KH)

الگوریتم بهینه‌سازی کریل، یک الگوریتم بهینه‌سازی بیولوژیکی است که از رفتار اجتماعی گروهی کریل‌ها برای حل مسایل بهینه‌سازی سراسری تقلید می‌کند.

حداقل فاصله هر کریل از غذا و از بالاترین تراکم دسته کریل‌ها به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. موقعیت وابسته به زمان هر کریل توسط سه عامل اصلی بیان شده است:

۱- حرکت ناشی از حضور افراد دیگر. ۲- جستجوی غذا. ۳- انتشار تصادفی.

برای ارزیابی این روش با سایر روش‌ها ده تابع با ابعاد بالا و ده تابع با ابعاد کم از میان توابع محک استاندارد انتخاب‌شده‌اند از طرفی چهار نوع مختلف از این الگوریتم با پارامترهای مختلف نیز در این مقایسه قرار گرفته است که کارآمدترین روش در انتها معرفی شده است [۱۸].

#### ۲-۱۷- الگوریتم مگس میوه (FFOA<sup>۳۵</sup>)

الگوریتم مگس میوه یک روش مکاشفه‌ای جدید مبتنی بر رفتار غذاییابی مگس میوه است. مگس میوه نسبت به سایر حشرات دیگر دارای حس بویایی و بینایی قوی‌تری می‌باشد، به‌طوری‌که می‌تواند بوی انواع میوه‌ها را در هوا تشخیص دهد. این حشره پس از استنشاق بوی میوه و بعد از این‌که به موقعیت میوه نزدیک شد، می‌تواند با استفاده از حس بینایی خود و همکاری با سایرین موقعیت دقیق میوه را بیابد [۱۹].

در مقالات مختلف برای حل مسایل بهینه‌سازی مانند مساله فروشنده دوره‌گرد و پخش بار اقتصادی در شبکه قدرت از این روش استفاده شده است.

#### ۲-۱۸- الگوریتم انفجار معدن (MBA<sup>۳۶</sup>)

الگوریتم انفجار معدن در سال ۲۰۱۲، به‌منظور کاهش تعداد پارامترهای تابع هزینه و مقدار نهایی تابع هدف، نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی شده است. مفاهیم اساسی و ایده‌هایی که این روش را پایه‌گذاری می‌کنند، از انفجار بمب‌های معدن در دنیای واقعی الهام گرفته شده است. انفجار از مراحل اصلی عملیات معدن کاری بوده و هدف آن خردشدگی و جابجایی مطلوب توده سنگ می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم انفجار خرج ویژه است و مقدار آن بستگی به عوامل زیادی داشته که از بین عوامل تأثیرگذار، می‌توان به مشخصه‌های الگوی حفاری و انفجار اشاره نمود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که این الگوریتم نیاز به تعداد پارامتر کمتر و در اغلب موارد نتایج بهتر در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های در نظر گرفته‌شده دارد [۲۰].

این الگوریتم بیشتر برای حل مسایل بهینه‌سازی مقید مانند طراحی سازه‌های خرپا با متغیرهای گسسته، طراحی سیستم‌های توزیع آب، تعیین مقدار و جایابی بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع شعاعی و ... مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۲-۱۹- الگوریتم پژواک صدای دلفین (DE<sup>۳۷</sup>)

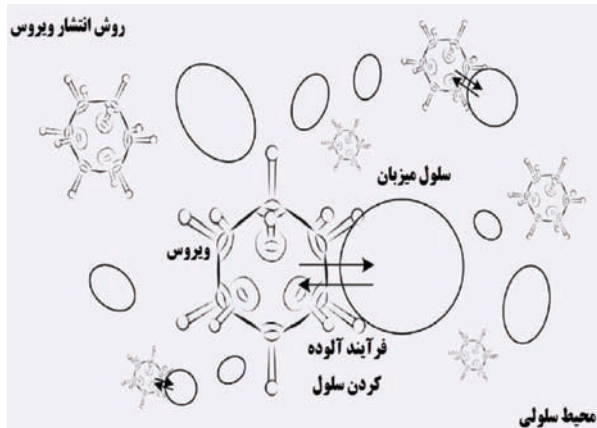
بررسی‌ها نشان داده‌اند که دلفین‌ها می‌توانند در ذهن خود برای صداها گوناگون، تجسم‌های گوناگونی پدیدآورند به‌گونه‌ای که هر



برتری این الگوریتم نسبت به سایر مطالعات در این دسته از مسایل است.

## ۲-۲۲- الگوریتم جستجوی کلونی ویروس (VCS<sup>۵۰</sup>)

- الگوریتم جستجوی کلنی ویروس شامل سه مرحله می‌شود:
۱. مرحله گام‌های تصادفی گاوسی برای انتشار ویروس‌ها.
  ۲. عمل CMA-ES برای آلوده کردن سلول‌های میزبان.
  ۳. استراتژی تکامل برای پاسخ ایمنی (شکل ۴).



شکل ۴: روش انتشار ویروس در محیط سلولی [۲۴]

به‌طور خلاصه، VCS از پنج قانون ساده برای طراحی الگوریتم استفاده می‌کند.

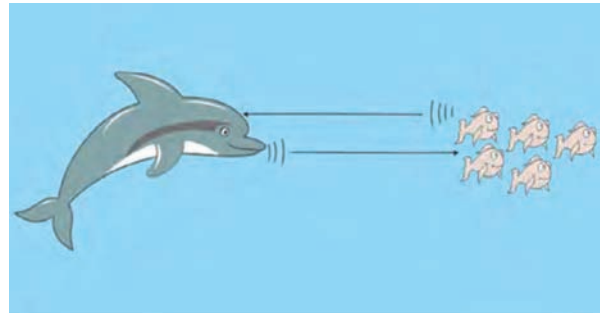
- ۱- دو گروه مختلف: کلنی ویروس و کلونی سلول میزبان، در VCS استفاده می‌شود.
- ۲- هر ویروس در فرآیند انتشار یک ویروس تصادفی جدید ایجاد می‌کند.
- ۳- هر ویروس یک سلول میزبان را آلوده می‌کند.
- ۴- تولیدمثل هر ویروس بر اساس تخریب سلول میزبان برای به دست آوردن مواد مغذی است.
- ۵- با توجه به حفاظت از سیستم ایمنی میزبان، تنها برخی از ویروس‌ها در هر نسل باقی می‌ماند و بقیه ویروس‌ها برای زنده ماندن تکامل یافته‌اند [۲۴].

این الگوریتم بر روی ۳۰ تابع تست بهینه‌سازی مقید و نامقید پیاده‌سازی و با نه الگوریتم دیگر مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده برابری یا عملکرد بهتر این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌باشد. از طرفی این الگوریتم بر روی مسایل مهندسی واقعی (طراحی مخازن تحت فشار، طراحی کشش/ فشرده‌سازی فنر و طراحی پرتو جوشکاری) نیز آزمایش شده است.

## ۲-۲۳- بهینه‌ساز Multi-Verse (MVO<sup>۵۱</sup>)

مرجع [۲۵] یک الگوریتم الهام گرفته از طبیعت جدید به نام بهینه‌ساز Multi-Verse (MVO) را پیشنهاد می‌کند. الهام اصلی این الگوریتم بر اساس سه مفهوم در کیهان‌شناسی است: سفید چاله، سیاه‌چاله و کرم‌چاله. مدل‌های ریاضی این سه مفهوم به ترتیب برای انجام اکتشاف، بهره‌برداری و جستجوی محلی طراحی شده‌اند. الگوریتم MVO برای نخستین بار در ۱۹ مساله چالش‌برانگیز استفاده شده است، سپس به پنج مساله مهندسی واقعی (طراحی خرپا سه پایه، طراحی چرخ قطار، طراحی مخازن تحت فشار، پرتو جوشکاری و طراحی سازه کنسولی) برای تأیید عملکرد آن اعمال شد. الگوریتم MVO با چهار الگوریتم شناخته‌شده مقایسه شده است: بهینه‌ساز گرگ خاکستری، بهینه‌ساز ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی گرانشی. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم‌های موجود در آزمایش بهتر است. نتایج مطالعات بر روی مسایل واقعی نیز نشان‌دهنده کارایی الگوریتم MVO در حل مسایل

صدا در ذهنشان بیان‌گر و برابر با یک شی باشد. در هنگام بهره‌گیری از پژواک یابی، دلفین‌ها اغلب صدای برگشتی از یک جانور یا اشیای اطراف را در ذهن خود تحلیل کرده و هر صدای برگشتی را مترادف با یک شی تعریف می‌کنند. این «دیدن از طریق شنیدن» نشان می‌دهد که چگونه دلفین‌های با توانایی دید بسیار پایین می‌توانند در مغز خود جهان را شناسایی کنند.



شکل ۳: نحوه تشخیص طعمه توسط دلفین [۲۱]

در مرجع [۲۱] الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر مکان‌یابی پژواک صدای دلفین طراحی شده است. با توجه به مثال‌های واقعی مانند بهینه‌سازی وزن سازه‌های ۷۲ و ۵۸۲ قطعه‌ای در خرپاها که در این مقاله بیان شده‌اند، نتایج نشان داده است که الگوریتم DE نرخ همگرایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌های فراشناختی (مانند GA، ACO<sup>۳۸</sup>، PSO، BB-BC<sup>۳۹</sup>، ICA، HSA<sup>۴۰</sup>، HPSACO<sup>۴۱</sup> و CSS<sup>۴۲</sup>) دارد.

## ۲-۲۰- الگوریتم جستجوی صاعقه (LSA<sup>۴۳</sup>)

این الگوریتم بر اساس پدیده طبیعی رعدوبرق و مکانیزم انتشار رعد پیشگام<sup>۴۴</sup> با استفاده از مفهوم ذرات سریع (ذکرشده به‌عنوان پرتابه) طراحی شده است. سه نوع پرتابه برای تشکیل گروه رهبری نشان داده شده است. به معنای دیگر پرتابه‌ها نشان‌دهنده مقدار اولیه جمعیت هستند.

یک مطالعه گسترده بر روی ۲۳ تابع محک و مساله فروشنده دوره‌گرد جهت مقایسه این الگوریتم با پنج روش شناخته‌شده دیگر (HSA<sup>۴۸</sup>، PSO، FFA<sup>۴۷</sup>، BSA<sup>۴۶</sup>، DSA<sup>۴۵</sup>) انجام شده است. نتیجه نشان می‌دهد که LSA به‌طور کلی نتایج بهتر در مقایسه با سایر روش‌های آزمایش شده با نرخ همگرایی بالا ارائه می‌دهد [۲۲].

این روش در مقالات مختلفی به‌منظور حل مسایلی همچون جایابی منابع تولید پراکنده، طراحی توربین بادی و طراحی کنترل‌کننده فازی مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲-۲۱- الگوریتم جلبک مصنوعی (AAA<sup>۴۹</sup>)

در مرجع [۲۳] الگوریتم بهینه‌سازی جلبک مصنوعی، الهام گرفته‌شده از رفتارهای زندگی ریز جلبک‌ها، گونه‌های فتوسنتزی، معرفی می‌شود. این الگوریتم بر اساس فرآیند تکاملی، فرآیند تطبیق و حرکت ریز جلبک‌ها طراحی شده است [۲۳].

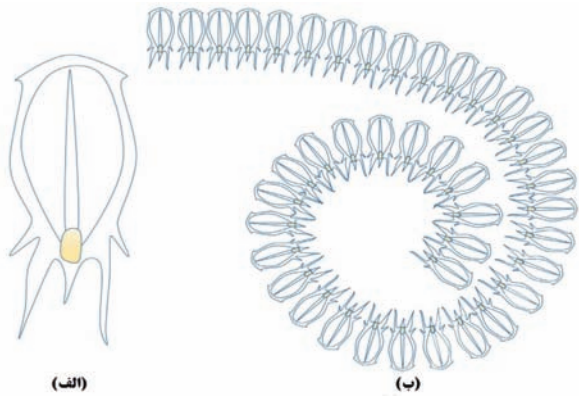
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم AAA، از ۲۴ تابع محک استاندارد در سه بعد که مجموعاً ۷۲ آزمایش می‌باشد، استفاده شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی این الگوریتم بر روی ۷۲ آزمایش با پنج الگوریتم شناخته‌شده دیگر مقایسه شده است. همچنین، به جهت اعتبار سنجی بیشتر، AAA بر روی مساله طراحی مخازن تحت فشار نیز اعمال و با نتایج موجود در تحقیقات قبلی با استفاده از آزمون ویلکاکسون مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی توابع محک و مسایل مهندسی نیز نشان‌دهنده

با فضاهای جستجو ناشناخته است.

#### ۲-۲۴- الگوریتم ازدحام سالپ (SSA<sup>۵۲</sup>)

فرم بدن یک سالپ در شکل (۵) قسمت الف نمایش داده شده است. در عمق اقیانوس سالپها یک ازدحام به نام زنجیره سالپ تشکیل می‌دهند. (شکل ۵ قسمت ب) علت اصلی تشکیل این زنجیره‌ها برای مسیریابی و یافتن آذوقه می‌باشد. سالپ‌های دنبال کننده به دنبال سردسته می‌باشند و سالپ سردسته به سمت منبع غذایی حرکت می‌کند. اگر منبع غذایی با پاسخ بهینه کلی تعویض شود به صورت خودکار زنجیر سالپها به سمت بهینه کلی حرکت خواهد کرد.

این الگوریتم به تخمین بهینه کلی توسط قراردادی چندین سالپ با موقعیت اتفاقی می‌پردازد، سپس سازگاری هر سالپ محاسبه می‌شود، سالپ با بهترین سازگاری کشف شده و موقعیت بهترین سالپ به متغیر F به عنوان منبع غذایی اختصاص می‌یابد تا توسط زنجیر سالپ تعقیب شود. در صورت خروج هر سالپ از فضای جستجو. به مرزهای تعیین شده بازگردانده می‌شود. تمام گام‌های بالا به غیر از گام جایگذاری اولیه تا زمان ارضای شرایط توقف تکرار می‌شود. در مرجع [۲۶] این روش با چهار روش دیگر (GSA، HS، FPA، PSO) مقایسه شده است و نتایج نشان دهنده برتری این روش نسبت به چهار روش دیگر می‌باشد.



شکل ۵: (الف) سالپ، (ب) زنجیره سالپها [۲۶]

انتقال گرما و تبادل حرارت بین آن‌ها اتفاق می‌افتد. دمای جدید جسم به عنوان موقعیت بعدی در فضای جستجو محسوب می‌شود. عملکرد این الگوریتم، همراه با چهار الگوریتم دیگر (DE، GWO، PSO و GSA) در ۱۳ تابع محک استاندارد و چهار مساله مکانیکی (طراحی پرتو جوشکاری، طراحی کشش/ فشرده سازی فنر، طراحی سازه کنسولی و طراحی مخازن تحت فشار) مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲۸]. نتایج نشان می‌دهند که این الگوریتم نسبت به سایر روش‌ها در دستیابی به جستجوی سراسری و همگرایی سریع برتری دارد.

#### ۲-۲۷- بهینه‌ساز گفتار خالدار (SHO<sup>۵۶</sup>)

ایده اصلی این الگوریتم از رفتار اجتماعی گفتار خالدار و رابطه‌ی بین آن‌ها گرفته شده است. سه مرحله اساسی SHO شامل: جستجوی شکار، احاطه کردن طعمه و حمله به طعمه می‌باشد و برای هر سه مرحله، مدل ریاضی تعریف شده است. الگوریتم پیشنهادی و هشت الگوریتم فرااکوشی (GA، GSA، SCA، MVO، MFO، PSO، GWO و HS) بر روی ۲۹ تابع تست استاندارد، پنج مساله واقعی و یک مساله مهندسی اعمال شده است. از روش آنالیز واریانس‌ها برای مقایسه مقادیر به دست آمده از این توابع استفاده شده است که نتیجه نشان دهنده ۹۵ درصد کارایی بهتر الگوریتم SHO نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌باشد. با وجود اینکه الگوریتم SHO دارای ۵ پارامتر تنظیم می‌باشد و سایر الگوریتم‌ها دارای ۳ یا ۴ پارامتر تنظیم می‌باشند، ولی نتایج کلی نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی مسایل بهتر از سایر الگوریتم‌های یاد شده می‌باشد [۲۹].

#### ۲-۲۸- الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO<sup>۵۷</sup>)

الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس با الهام از شیوه‌های متفاوت حمله شاهین هریس (جستجوی طعمه، غافلگیری طعمه با حمله ناگهانی) طراحی شده است. این الگوریتم با الگوریتم‌های MBA، SSA، GOA، MVO، DEDS<sup>۵۸</sup>، Tsa، Ray and Sain، PSO-DE، MFO<sup>۵۹</sup> و CS<sup>۶۰</sup> در ۲۹ تابع معیار ریاضی و همچنین شش مساله مهندسی شناخته شده (طراحی خرپا سه پایه، کشش و فشرده سازی فنر، مخازن تحت فشار، پرتو جوشکاری، دیسک و صفحه چندلایه ترمز و کلاچ و ...) مقایسه شده است و نتایج نشان داده‌اند که این الگوریتم کارایی بالایی در مقایسه با آن‌ها دارد [۳۰].

#### ۲-۲۹- الگوریتم لیگ برتر والیبال (VPL<sup>۶۱</sup>)

این الگوریتم از رقابت و تعامل تیم‌های والیبال در طول فصل و همچنین نحوه مربیگری در روند یک مسابقه والیبال الهام گرفته است. برای حل مشکلات بهینه‌سازی سراسری از این الگوریتم و شرایطی مانند جایگزینی، مربیگری و یادگیری استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی در ۲۳ تابع محک استاندارد و سه مساله طراحی مهندسی (طراحی مخازن تحت فشار، کشش و فشرده سازی فنر و پرتو جوشکاری) با سایر الگوریتم‌های فراشناختی، DE، GA، PSO، SCA، ABC، LCA<sup>۶۲</sup>، FA، HS و SLC<sup>۶۳</sup> با استفاده از آزمون ویلکاکسون مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم VPL از سایر الگوریتم‌ها قوی‌تر می‌باشد و برای حل مسایل با فضای جستجوی پیچیده بسیار مناسب می‌باشد [۳۱].

#### ۲-۳۰- الگوریتم سینوس کسینوس (SCA<sup>۶۴</sup>)

با توجه به استفاده از معادلات سینوس و کسینوس در روند بهینه‌سازی، این الگوریتم به نام الگوریتم سینوس کسینوس (SCA) نامیده شده است.

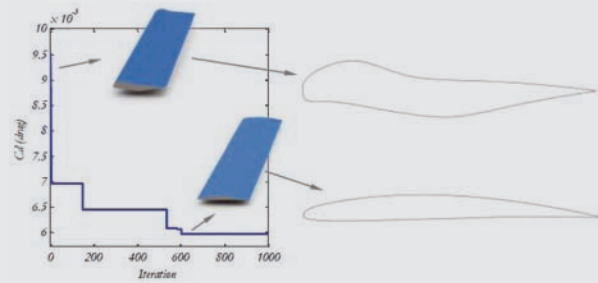
چهار پارامتر اصلی در این الگوریتم  $r_1$ ،  $r_2$ ،  $r_3$  و  $r_4$  هستند. پارامتر  $r_1$  موقعیت مناطق بعدی (جهت حرکت) را تعیین می‌کند. پارامتر

#### ۲-۲۵- الگوریتم بهینه‌سازی جنگل (FOA<sup>۵۴</sup>)

الگوریتم بهینه‌سازی جنگل (FOA)، برای مسایل بهینه‌سازی غیرخطی پیوسته پیشنهاد شده است. ایده تشکیل این الگوریتم از چند درخت در جنگل الهام گرفته شده است که می‌توانند برای چندین دهه زنده بمانند، در حالی که درختان دیگر می‌توانند برای یک دوره محدود زندگی کنند. در FOA، فرآیند بذردهی درختان به گونه‌ای شبیه‌سازی می‌شود که برخی از دانه‌ها در زیر درختان فرومی‌ریزند، در حالی که برخی دیگر در مناطق وسیعی با اعمال طبیعی و حیواناتی که از دانه‌ها یا میوه‌ها تغذیه می‌کنند، توزیع می‌شوند. کاربرد الگوریتم پیشنهادی در برخی از توابع محک، قابلیت خوب خود را در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) نشان می‌دهد [۲۷].

#### ۲-۲۶- الگوریتم بهینه‌سازی تبادل حرارتی (TEO<sup>۵۵</sup>)

در مرجع [۲۸] یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید بر اساس قانون سرمایه‌ش نیوتن ارائه می‌دهد. قانون سرمایه‌ش نیوتن بیان می‌کند که سرعت تغییر دمای جسم به صورت تقریبی با اختلاف دمای جسم و محیط اطرافش متناسب است. در اینجا، هر عامل به عنوان یک شیء خنک کننده در نظر گرفته می‌شود و با اتصال عامل دیگر به محیط،



الگوریتم‌های فراکاوشی با توجه به دیدگاه‌های مختلف افراد از نحوه الهام الگوریتم‌ها بسیار متفاوت است. در جدول (۱) هر الگوریتم به همراه نام فارسی و لاتین، سال انتشار، تعداد ارجاع هر روش در مقالات و منبع الهام آن آورده شده است.

سه دسته‌کلی می‌توان برای این الگوریتم‌ها در نظر گرفت:  
 - روش‌های مبتنی بر تکامل: این روش از قانون تکامل الهام گرفته است. فرایند جستجو با یک جمعیتی که به صورت تصادفی تولید شده است شروع می‌شود که در نسل‌های بعدی این جمعیت تکامل می‌یابد. (مانند الگوریتم GA)  
 - روش‌های مبتنی بر فیزیک: این روش از قوانین فیزیکی موجود پیروی می‌کند. (مانند SA)

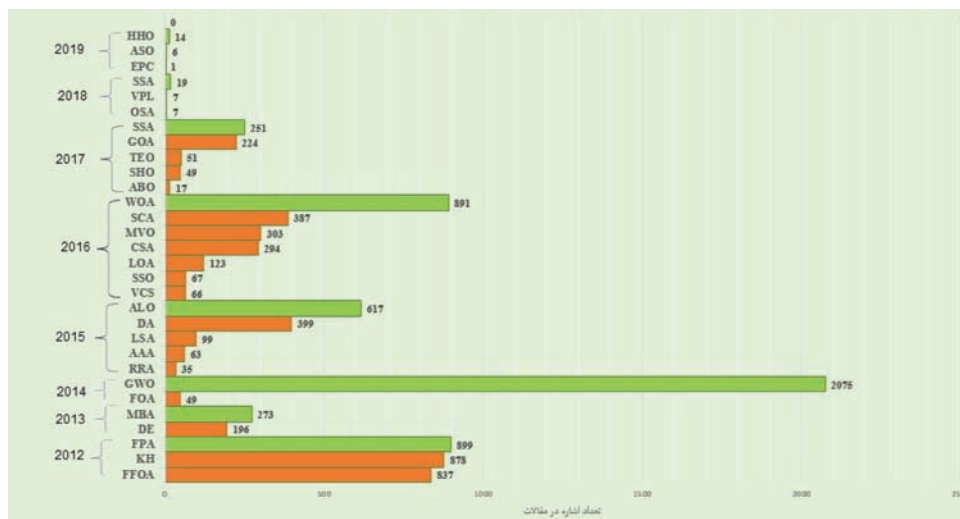
- روش‌های مبتنی بر ازدحام موجودات: مانند الگوریتم PSO در مرجع [۲۹] پنج منبع الهام برای این الگوریتم‌ها بیان کرده است که در شکل ۷ این دسته‌بندی نمایش داده شده است. یکی دیگر از این دسته‌بندی‌ها که در مرجع [۳۱] ذکر شده است؛ شامل چهار دسته می‌باشد:

- الگوریتم‌های تصادفی: از یک پارامتر تصادفی برای رفتارهای غیرقابل پیش‌بینی استفاده می‌کند. مانند الگوریتم‌های  $SHC^{۶۷}$ ,  $ARS^{۶۶}$ ,  $LS^{۶۵}$ .
- الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم‌های  $FEP^{۶۹}$ ,  $DE^{۶۹}$ ,  $EP^{۶۸}$ .
- الگوریتم‌های فیزیکی: محدوده‌ی فرایندهای فیزیکی بسیار وسیع است که می‌تواند مربوط به سیستم‌های دینامیکی پیچیده،

$T_2$  تعیین می‌کند که چقدر حرکت باید به سمت مقصد یا به سمت خارج باشد. پارامتر  $T_3$  وزن‌های تصادفی برای مقصد را به طور تصادفی مشخص می‌کند و در نهایت، پارامتر  $T_4$  به طور مساوی بین پارامترهای معادلات سینوس و کسینوس جابجا می‌شود. بال هواپیما و یا پره توربین‌های باد، ممکن است سطح مقطع‌های متفاوتی در طول خود داشته باشند. این سطح مقطع‌ها، ایرفویل نامیده می‌شوند. در مرجع [۳۲] از این الگوریتم در طراحی مساله مهندسی ایرفویل استفاده شده است. شکل (۶) نمونه اولیه و نهایی ایرفویل را پس از استفاده از این الگوریتم نشان می‌دهد.

### ۳- جمع‌بندی و مقایسه

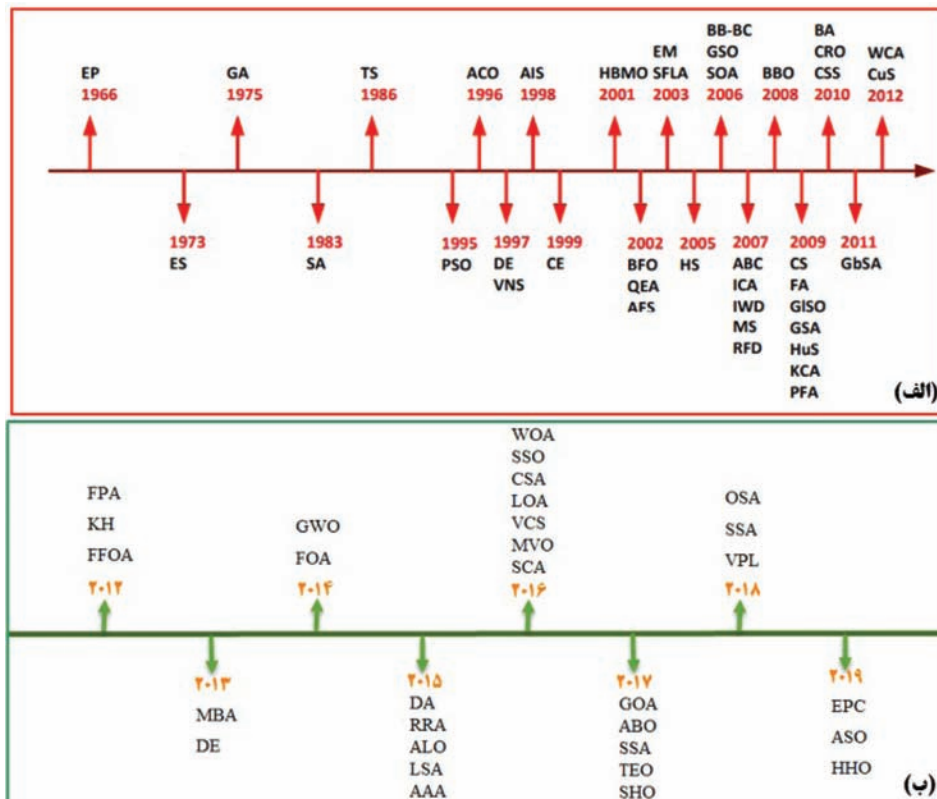
مسایل بهینه‌سازی زیادی وجود دارد که محققان برای یافتن پاسخ مناسب برای آن‌ها، الگوریتم‌های جدیدی طرح کردند یا الگوریتم‌های گذشته را بهبود بخشیده‌اند. در صورتی که مساله دارای فضای جستجوی ناشناخته باشد پاسخ مساله بستگی به انتخاب نقطه اولیه مناسب دارد. در این نوع مسایل فضای جستجو با توجه به افزایش تعداد بُدهای مساله به سرعت افزایش می‌یابد و روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک قادر به حل آن‌ها نمی‌باشند و لذا الگوریتم‌های فراکاوشی برای حل این‌گونه مسایل مناسب می‌باشد. طیف گسترده‌ای از مسایل بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی، دسته‌بندی داده، پردازش تصویر و ویدئو، تنظیم شبکه‌های عصبی، تشخیص الگو و ... با استفاده از این روش‌ها حل شده‌اند.



شکل ۸: مقایسه الگوریتم‌ها با توجه به زمان و تعداد ارجاع

جدول ۱: اطلاعات الگوریتم‌های فراکاوشی از سال ۲۰۱۲

ردیف	نام فارسی الگوریتم	نام لاتین الگوریتم	سال انتشار	حرف اختصار	منبع الهام	تعداد ارجاع منبع
1	کلونی پنگوئن‌های امپراتور	Emperor Penguins Colony	2019	EPC	رفتار پنگوئن امپراتور	1
2	سنجاقک	Dragonfly algorithm	2015	DA	رفتارهای استاتیک و دینامیک ازدحام سنجاقک‌ها	399
3	جستجوی جغد	Owl Search Algorithm	2018	OSA	نحوه شکار جغدها در تاریکی	7
4	ریشه رونده	Runner Root Algorithm	2015	RRA	ساقه‌های رونده و ریشه‌های بعضی از گیاهان در طبیعت	35
5	بهینه‌سازی جستجوی اتم	Atom Search Optimization algorithm	2019	ASO	قانون دینامیک مولکولی	6
6	بهینه‌سازی نهنگ یا وال	Whale optimization algorithm	2016	WOA	رفتار اجتماعی نهنگ کوهان‌دار	891
7	بهینه‌سازی بویایی کوسه	Shark smell optimization	2016	SSO	حس بویایی کوسه برای تشخیص طعمه	67
8	بهینه‌سازی شیر مورچه	Ant lion optimizer	2015	ALO	مکانیزم شکار شیر مورچه‌ها	617
9	بهینه‌سازی گرگ خاکستری	Grey Wolf Optimizer	2014	GWO	ساختار سلسله‌مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ‌ها در زمان شکار	2075
10	بهینه‌سازی ملخ	Grasshopper optimization algorithm	2017	GOA	رفتار گروهی دسته ملخ‌ها	224
11	گرده‌افشانی گل‌ها	Flower pollination algorithm	2012	FPA	نحوه‌ی گرده‌افشانی گل‌ها	899
12	جستجوی کلاغ‌ها	Crow search algorithm	2016	CSA	رفتار هوشمندانه‌ی کلاغ‌ها در پنهان کردن غذا	294
13	بهینه‌سازی شیر	Lion Optimization Algorithm	2016	LOA	سبک زندگی خاص شیرها و ویژگی‌های هم‌کاری آن‌ها	123
14	بهینه‌سازی پروانه	Butterfly-inspired algorithm	2017	ABO	رفتار جستجوی غذا و زادوولد پروانه‌ها	17
15	جستجوی سنجاب	Squirrel search algorithm	2018	SSA	شیوه خاص پرواز سنجاب‌های جنوبی و روش حرکت آن‌ها معروف به گلاپدینگ	19
16	بهینه‌سازی کریل	Krill herd	2012	KH	رفتار اجتماعی گروهی کریل‌ها	878
17	مگس میوه	Fruit fly optimization algorithm	2012	FFOA	رفتار غذایی مگس میوه	837
18	انفجار معدن	Mine blast algorithm	2013	MBA	انفجار بمب‌های معدن	273
19	پژواک صدای دلفین	Dolphin echolocation	2013	DE	مکان‌یابی پژواک صدای دلفین	196
20	جستجوی صاعقه	Lightning search algorithm	2015	LSA	پدیده طبیعی رعدوبرق	99
21	جلبک مصنوعی	Artificial algae algorithm	2015	AAA	رفتارهای زندگی ریز جلبک‌ها	63
22	جستجوی کلونی ویروس	Virus colony search	2016	VCS	روش انتشار و آلوده کردن ویروس‌ها	66
23	بهینه‌ساز Multi-Verse	Multi-verse optimizer	2016	MVO	سه مفهوم در کیهان‌شناسی	303
24	ازدحام سالپ	Salp swarm algorithm	2017	SSA	رفتار زنجیره‌ای و خاص سالپ‌ها برای غذاییابی در اقیانوس	251
25	بهینه‌سازی جنگل	Forest Optimization Algorithm	2014	FOA	چند درخت در جنگل که می‌توانند برای چندین دهه زنده بمانند	49
26	بهینه‌سازی تبادل حرارتی	Thermal exchange optimization	2017	TEO	قانون خنک‌کننده نیوتن	51
27	بهینه‌ساز کفتار خالدار	Spotted hyena optimizer	2017	SHO	رفتار اجتماعی کفتار خالدار و رابطه‌ی بین آن‌ها	49
28	بهینه‌سازی شاهین هریس	Harris hawks optimization	2019	HHO	شیوه‌های متفاوت حمله شاهین هریس	14
29	لیگ برتر والیبال	Volleyball Premier League	2018	VPL	رقابت و تعامل تیم‌های والیبال در طول فصل	7
30	سینوس کسینوس	Sine Cosine Algorithm	2016	SCA	معادلات سینوس و کسینوس	387



شکل ۹: (الف) الگوریتم‌های فراکاوشی تا سال ۲۰۱۲ [۱] (ب) الگوریتم‌های فراکاوشی از سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۱۹

روش‌ها از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۹ نیز در این مقاله به صورت کامل بیان شده‌اند و در شکل (۹) قسمت ب به صورت کلی نام برده شده‌اند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تعدادی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۹ معرفی گردید. شرح عملکرد کلی، پارامترهای اصلی، کاربرد در مسایل واقعی و منبع الهام هر کدام از این روش‌ها به اختصار بیان شده است. تمامی این روش‌ها الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت بوده‌اند و از طریق تولید یک جمعیت تصادفی و تکامل آن برای بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند. در این میان تنها دو الگوریتم کلونی پنگوئن امپراتور و الگوریتم جستجوی کلاغ‌ها جزو الگوریتم‌های حافظه‌دار بودند و سایر الگوریتم‌ها بدون حافظه می‌باشند. در هر سال تعداد مقالات با بیشترین ارجاع آورده شده است یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها با بیشترین ارجاع که در سال ۲۰۱۴ توسط آقای میرجلیلی طرح شده است، الگوریتم گرگ خاکستری با تعداد ارجاع ۲۰۷۵ مرتبه می‌باشد. از طرفی نمی‌توان الگوریتم واحدی را به عنوان الگوریتم برتر معرفی نمود زیرا ویژگی‌های هر الگوریتم با دیگری متفاوت می‌باشد و هر کدام برای دسته‌ی خاصی از مسایل مناسب هستند.

#### ۵- مراجع

- [۱] ح. شریف‌زاده و ن. امجدی، «مروری بر انواع الگوریتم‌های فراکاوشی در بهینه‌سازی»، ۱۳۹۳.
- [2] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849-872, 2019.
- [3] S. Mirjalili, "Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems," *Neural Computing and Applica-*

تالوژی، تعامل بین فرهنگ و تکامل، علوم مختلف (شیمی، فیزیک، ریاضیات) و یا حتی موسیقی باشد. الگوریتم‌های این دسته که در این مقاله اشاره شده است، شامل الگوریتم‌های FPA، RRA، MBA، LSA، FOA می‌باشد.

• الگوریتم‌های مبتنی بر ازدحام موجودات که از ازدحام حیوانات، گله‌ها، جفت‌ها یا هر نوع گروهی دیگر از حیوانات تقلید می‌کنند. الگوریتم‌های بررسی‌شده در این مقاله که در این دسته‌بندی قرار دارند شامل: WOA، DE، KH، DA، FA، LOA، VCS می‌شود.

همان‌طور که گفته شد نمی‌توان یک روش را بهترین روش در حل مسایل پیچیده مهندسی دانست. به‌طور مثال در الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت یا الگوریتم‌های تکاملی که با یک سری جمعیت اولیه تصادفی بهینه‌سازی را آغاز می‌کنند انتخاب پارامترهای شروع بسیار دشوار است و برای هر مساله در صورتی که این پارامترها درست انتخاب شود آن روش برای بهینه‌سازی مناسب خواهد بود در غیر این صورت یا با مشکل گیر کردن در بهینه محلی مواجه می‌شود یا زمان رسیدن به جواب بهینه افزایش می‌یابد.

شکل (۸) الگوریتم‌های مختلف را با توجه به تعداد ارجاع هر کدام از مقالات و زمان انتشار آن‌ها به تفکیک سال نام برده است. در این بین الگوریتم گرده‌افشانی گل در سال ۲۰۱۲، الگوریتم انفجار معدن در سال ۲۰۱۳، الگوریتم گرگ خاکستری در سال ۲۰۱۴، الگوریتم شیر مورچه در سال ۲۰۱۵، الگوریتم نهنگ یا وال در سال ۲۰۱۶، الگوریتم ازدحام سالپ در سال ۲۰۱۷، الگوریتم لیگ برتر والیبال در سال ۲۰۱۸ و الگوریتم قوش هریس در سال ۲۰۱۹ بیشترین تعداد ارجاع در مقالات را طبق اطلاعات گوگل اسکولار دارا بوده‌اند.

برای بررسی روش‌های قبل از سال ۲۰۱۲، مرجع [۱] ۴۰ الگوریتم پرکاربرد را معرفی و مقایسه کرده است (شکل ۹ قسمت الف). سایر

applications," *Advances in Eng Software*, 2017.

[30] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," in *Future Generation Computer Systems*, 2019.

[31] R. Moghdani and K. Salimifard, "Volleyball Premier League Algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 64, pp. 161-185, 2018.

[32] S. Mirjalili, "A Sine Cosine Algorithm for Solving Optimization Problems," *Knowledge-Based Systems*, 2015.

#### ۶- اختصارات

<sup>1</sup> Emperor Penguins Colony  
<sup>2</sup> Genetic Algorithm  
<sup>3</sup> Imperialist Competitive Algorithm  
<sup>4</sup> Particles Swarm Optimization  
<sup>5</sup> Artificial Bee Colony  
<sup>6</sup> Differential Evolution  
<sup>7</sup> Harmony Search  
<sup>8</sup> Invasive Weed Optimization  
<sup>9</sup> Grey Wolf Optimizer  
<sup>10</sup> Dragonfly Algorithm  
<sup>11</sup> BDA  
<sup>12</sup> MODA  
<sup>13</sup> Owl Search Algorithm  
<sup>14</sup> Runner Root Algorithm  
<sup>15</sup> Atom Search Optimization algorithm  
<sup>16</sup> Simulated Annealing  
<sup>17</sup> Gravitational Search Algorithm  
<sup>18</sup> Wind Driven Optimization  
<sup>19</sup> Whale Optimization Algorithm  
<sup>20</sup> Shark Smell Optimization  
<sup>21</sup> Ant Lion Optimizer  
<sup>22</sup> Grey Wolf Optimizer  
<sup>23</sup> Grasshopper Optimization Algorithm  
<sup>24</sup> Flower Pollination Algorithm  
<sup>25</sup> Crow Search Algorithm  
<sup>26</sup> Lion Optimization Algorithm  
<sup>27</sup> Biogeography-Based Optimization  
<sup>28</sup> Hunting Search  
<sup>29</sup> Water Wave Optimization  
<sup>30</sup> Bat Algorithm  
<sup>31</sup> Butterfly Optimization Algorithm  
<sup>32</sup> Squirrel Search Algorithm  
<sup>33</sup> Firefly algorithm  
<sup>34</sup> Krill herd  
<sup>35</sup> Fruit fly optimization algorithm  
<sup>36</sup> Mine blast algorithm  
<sup>37</sup> Dolphin echolocation  
<sup>38</sup> Ant colony optimization  
<sup>39</sup> Big Bang-Big Crunch  
<sup>40</sup> An improved ant colony optimization  
<sup>41</sup> Hybrid algorithm of harmony search, particle swarm and ant colony  
<sup>42</sup> ChargedSystem Search  
<sup>43</sup> Lightning Search Algorithm  
<sup>44</sup> Leader  
<sup>45</sup> Differential search algorithm  
<sup>46</sup> Backtracking search algorithm  
<sup>47</sup> Firefly algorithm  
<sup>48</sup> The Harmony Search algorithm  
<sup>49</sup> Artificial Algae Algorithm  
<sup>50</sup> Virus Colony Search  
<sup>51</sup> Gaussian walks method  
<sup>52</sup> Multi-Verse Optimizer  
<sup>53</sup> Salp Swarm Algorithm  
<sup>54</sup> Forest Optimization Algorithm  
<sup>55</sup> Thermal exchange optimization  
<sup>56</sup> Spotted hyena optimizer  
<sup>57</sup> Harris hawks optimization  
<sup>58</sup> Differential evolution with dynamic stochastic selection optimization  
<sup>59</sup> Moth-flame optimization algorithm  
<sup>60</sup> Cuckoo search algorithm  
<sup>61</sup> Volleyball Premier League  
<sup>62</sup> League Championship Algorithm  
<sup>63</sup> Soccer League Competition  
<sup>64</sup> Sine Cosine Algorithm  
<sup>65</sup> Local Search  
<sup>66</sup> Adaptive Random Search  
<sup>67</sup> Stochastic Hill Climbing  
<sup>68</sup> Evolutionary Programming  
<sup>69</sup> Differential Evolution  
<sup>70</sup> Fast Evolutionary Programming

\*\*\*

tions, vol. 27, pp. 1053-1073, 2016.

[4] S. Harifi, M. Khalilian, S. Ebrahimnejad and J. Mohammadzadeh, "Emperor Penguins Colony: A New Metaheuristic Algorithm for Optimization," *Evolutionary Intelligence*, 2019.

[5] J. Mohita, M. Shubhamb and A. Rani, "Owl search algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm for global optimization," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 34, pp. 1573-1582, 2018.

[6] F. Merrikh Bayat, "The runner-root algorithm: a metaheuristic for solving unimodal and multimodal optimization problems inspired by runners and roots of plants in nature," *Appl. Soft Comput*, 2015.

[7] W. Zhao, L. Wang and Z. Zhang, "A novel atom search optimization for dispersion coefficient estimation in groundwater," *Future Generation Computer Systems*, 2019.

[8] S. Mirjalili and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," *Advances in Eng Soft*, vol. 95, 2016.

[9] O. Abedinia, A. Ghasemi and N. Amjadi, "A new metaheuristic algorithm based on shark smell optimization", *Complexity*, 2016.

[10] S. Mirjalili, "The Ant Lion Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 83, pp. 80-98, 2015.

[11] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Eng Software*, 2014.

[12] S. Saremi, S. Mirjalili and A. Lewis, "Grasshopper Optimization Algorithm: Theory and application," *Advances in Engineering Software*, 2017.

[13] X.-S. Yang, "Flower Pollination Algorithm for Global Optimization," in *International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation*, 2012.

[14] A. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm", *Computers & Structures*, 2016.

[15] M. Yazdani and F. Jolai, "Lion Optimization Algorithm (LOA): A nature-inspired metaheuristic algorithm," *Journal of Computational Design and Engineering*, 2016.

[16] X. Qi, Y. Zhu and H. Zhang, "A new meta-heuristic butterfly-inspired algorithm," *Journal of Computational Science*, vol. 23, pp. 226-239, 2017.

[17] M. Jain, V. Singh and A. Rani, "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm," *Swarm and Evolutionary Computation BASE DATA*, 2018.

[18] A. H. Gandomi and A. H. Alavi, "Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012.

[19] W.-T. Pan, "A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example," *Knowledge-Based Systems*, 2012.

[20] A. Sadollah, A. Bahreininejad, H. Eskandar and M. Hamdi, "Mine blast algorithm: A new population based algorithm for solving constrained," *Applied Soft Computing*, 2013.

[21] A. Kaveh and N. Farhoudi, "A new optimization method: Dolphin echolocation," *Advances in Eng Software*, 2013.

[22] H. Shareef, A. A. Ibrahim and A. H. Mutlag, "Lightning search algorithm," *Applied Soft Computing*, 2015.

[23] S. A. Uymaz, G. Tezel and E. Yel, "Artificial algae algorithm (AAA) for nonlinear global optimization," *Applied Soft Computing*, 2015.

[24] M. D. Li, H. Zhao, X. W. Weng and T. Han, "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search," *Advances in Eng Software*, 2016.

[25] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Hatamlou, "Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization," *Neural Computing and Applications*, 2016.

[26] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris and S. M. Mirjalili, "Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems," *Advances in Eng Software*, 2017.

[27] M. Ghaemi and M.-R. Feizi-Derakhshib, "Forest Optimization Algorithm," *Expert Systems with Applications*, 2014.

[28] A. Kaveh and A. Dadras, "A novel meta-heuristic optimization algorithm: Thermal exchange", *Advances in Eng Software*, 2017.

[29] G. Dhiman and V. Kumar, "Spotted hyena optimizer: A novel bio-inspired based metaheuristic technique for engineering



مقاله علمی-ترویجی

## صرفه جویی انرژی الکتریکی در قطار شهری با استفاده همزمان از ذخیره‌سازهای انرژی و مشخصه سرعت بهینه قطار

■ سعید احمدی/ دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر/ دانشکده منتظری- دانشگاه فنی و حرفه ای استان خراسان رضوی / s-ahmadi@tvu.ac.ir

■ علی دستفان/ دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود / Dastfan@shahroodut.ac.ir

■ محسن اصیلی/ دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود / m.assili@shahroodut.ac.ir

### چکیده

بحران انرژی و آلودگی محیط زیست، دو عامل مهم هستند که باعث شده اند، کاهش مصرف انرژی در حمل و نقل و به خصوص در سامانه‌های قطار شهری مورد توجه بهره برداران و محققین قرار گیرد. بهینه‌سازی مشخصه سرعت می‌تواند با صرفه‌جویی، در کاهش مصرف انرژی مؤثر باشد. استفاده از ذخیره‌سازها نیز می‌تواند با بازیابی انرژی باز تولیدی ترمزی، به افزایش بازده انرژی سیستم کمک کند. در این مقاله از دو راهکار فوق به صورت همزمان استفاده شده است. ابتدا انرژی مصرفی کل و ظرفیت ذخیره ساز ساکن مورد نیاز برای شبکه با قطارهای با مشخصه سرعت عادی تعیین شده است، سپس مقدار انرژی و اندازه ذخیره ساز برای قطارهای با مشخصه سرعت بهینه محاسبه شده است. نشان داده شده است که با استفاده از مشخصه سرعت بهینه، ضمن حصول به کاهش قابل توجه انرژی، ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی ساکن مورد نیاز نیز نسبت به حالت مشخصه سرعت عادی، کاهش پیدا می‌کند. با استفاده از نتایج عملی استخراج شده از خط ۱ قطار شهری مشهد، شبیه‌سازی شبکه واقعی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کاهش قابل توجه انرژی کل ورودی و ظرفیت ذخیره ساز مورد نیاز در حالت مشخصه سرعت بهینه است که می‌تواند هزینه ذخیره‌سازها را نیز به دنبال داشته باشد.

**کلمات کلیدی:** صرفه‌جویی انرژی، قطار شهری، انرژی باز تولیدی ترمزی، مشخصه بهینه سرعت قطار، سامانه ذخیره‌ساز انرژی ساکن، ابرخازن.

## Electric Energy Saving in Urban Railways by Using Energy Storage System and Optimal Speed Profiles Simultaneously

■ Saeed Ahmadi/ Department of Electrical and Computer Engineering/ Faculty of Montazeri/ Khorasan Razavi Branch/ Technical and Vocational University (TVU)/ Mashhad, Iran/ s-ahmadi@tvu.ac.ir

■ Ali Dastfan/ Department of Electrical and Robotic Engineering/ Shahrood University of Technology/ Shahrood, Iran/ Dastfan@shahroodut.ac.ir

■ Mohsen Assili/ Department of Electrical and Robotic Engineering/ Shahrood University of Technology/ Shahrood, Iran/ m.assili@shahroodut.ac.ir

### Abstract

Energy crisis and environmental pollution are two important factors that have caused the operators and

researchers to prioritize the reduction of energy consumption in transportation and especially in urban railway systems. Speed profile optimization could be effective in decreasing energy consumption. The use of energy storage systems (ESSs) can also help to increase energy efficiency by recovering regenerative braking energy. In this paper, the above two measures were used simultaneously. First, the total energy consumption and stationary energy storage capacity was determined for a network consisting of trains with normal speed. Then the amount of energy and ESS size required for trains with optimal speed profiles were calculated. It was shown that by using the optimum speed profiles, while achieving a significant increase in energy saving, the required ESS capacity is also reduced compared to the normal speed profile. By using the practical results extracted from line 1 of Mashhad urban railway, the real network simulation was performed. The simulation results showed a significant reduction in the total input energy and ESS capacity associated with the optimal speed profile mode, which can also lead to lower ESS costs.

**Keywords:** energy saving, urban railway, regenerative braking energy, optimal speed profile, stationary energy storage system, super capacitor.

## ۱- مقدمه

فقط از قابلیت هم‌زمانی شتاب‌گیری و ترمزگیری قطارها استفاده شده است.

در رابطه با استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی نیز مطالعات زیادی انجام شده است که بعضی از آن‌ها مانند [۱۷] به مقایسه انواع روش‌های استفاده از انرژی بازتولیدی و انواع ذخیره‌سازها پرداخته‌اند. در [۱۸] ذخیره‌سازهای ساکن و قابل نصب روی قطار مقایسه شده‌اند. در [۱۹-۲۱] روش‌های کنترلی شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها و تأثیر آن‌ها بر میزان بالا بردن بازده انرژی بررسی شده است و در ضمن بهبود بعضی از پارامترهای کیفیت توان مانند نوسانات ولتاژ و حداکثر توان لحظه‌ای مدنظر قرار داده شده است. تعیین اندازه و محل نصب بهینه ذخیره‌سازهای ساکن در [۲۲-۲۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیقات مربوط به ذخیره‌سازها نیز فقط بالا بردن بازده انرژی سیستم با استفاده از بازبازی انرژی بازتولیدی ترمزی در نظر گرفته شده است و ظرفیت ذخیره‌سازها برای مشخصه سرعت عادی یا مشخصه با حداقل زمان سفر تعیین شده است که هزینه بالای تأمین ذخیره‌ساز را به‌دنبال دارد در حالی که ممکن است به‌ندرت از حداکثر ظرفیت آن استفاده شود.

در تحقیق حاضر با استفاده هم‌زمان از ذخیره‌سازهای انرژی و مشخصه سرعت بهینه، بازده انرژی افزایش داده شده است. به‌عبارت دیگر با ترکیب روش صرفه‌جویی انرژی با بازبازی انرژی بازتولیدی ترمزی، ضمن کاهش بیشتر انرژی مصرفی کل شبکه، ظرفیت ابرخازن مورد استفاده نیز کاهش یافته است. به این منظور ابتدا برای شبکه با مشخصه سرعت عادی، ظرفیت ذخیره‌ساز حساب شده است، سپس مقدار ابرخازن موردنیاز برای شبکه با مشخصه سرعت بهینه محاسبه شده است و نشان داده شده که در حالت اخیر هم ظرفیت ذخیره‌ساز کاهش یافته و هم انرژی دریافتی کل شبکه کم شده است.

## ۲- شبیه‌سازی سیستم قطار شهری

شبکه قطار شهری شامل پست‌ها و خطوط تغذیه و ریل‌ها به‌عنوان شبکه تغذیه‌کننده و قطارها به‌عنوان بارهای الکتریکی است که ذخیره‌سازهای ساکن نیز به‌عنوان تجهیزات تکمیلی با هدف افزایش بازده انرژی به تجهیزات فوق اضافه می‌شوند که مدل‌سازی هر بخش به‌صورت خلاصه بیان می‌شود.

### ۲-۱- مدل‌سازی قطار

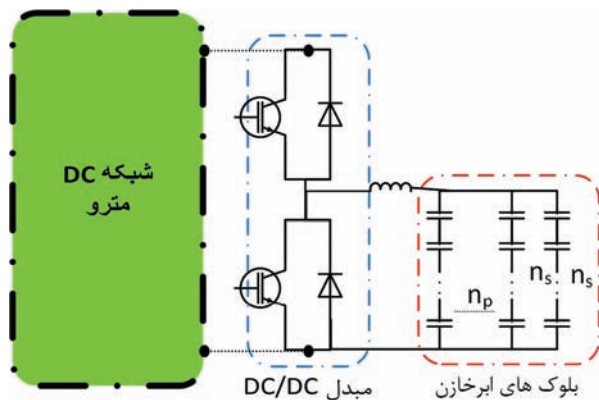
برای مدل‌سازی عملکرد قطار از معادلات مکانیکی حاکم بر آن استفاده می‌شود که طبق رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۸]:

ناوگان حمل‌ونقل ریلی الکتریکی درون‌شهری به دلیل ویژگی‌هایی نظیر ایمنی و بازده انرژی بالا، ظرفیت بالای حمل مسافر، دقت و وقت‌شناسی و کاهش آلودگی محیط‌زیست، روز بروز در حال توسعه است. از طرفی مصرف بالای انرژی یکی از چالش‌های اساسی این سیستم‌ها است که نظر محققین زیادی را به خود جلب کرده است. دو راهکار اساسی برای بالا بردن بازده انرژی در این سیستم‌ها به‌خصوص در قسمت انرژی کششی مربوط به قطارها وجود دارد؛ یکی صرفه‌جویی در انرژی مصرفی است که این موضوع در اغلب تحقیقات گذشته با انجام راهبری مناسب و اقتصادی مترادف شده است. راهکار دوم استفاده مجدد از انرژی بازتولیدی قطارها در زمان ترمزگیری است که می‌تواند با روش‌هایی مانند تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها، استفاده از پست‌های تغذیه با قابلیت برگرداندن انرژی به شبکه بالادستی و استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی انجام شود [۱،۲].

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه صرفه‌جویی انرژی با استفاده از راهبری بهینه قطار انجام شده است. اغلب این مطالعات در راستای بهینه‌سازی مشخصه سرعت سیستم تک‌قطاره انجام شده‌اند. در [۳] از تئوری کنترل بهینه و اصل حداکثر سازی پونت‌ریاگین استفاده شده است. در [۴-۷] از الگوریتم ژنتیک، سرد کردن فلزات، تئوری مورچه‌ها، تئوری تصمیم و سیستم‌های خبره استفاده شده است. در همه تحقیقات فوق، زمان سفر ثابت فرض شده و سعی شده است که با بهینه کردن نقاط تغییر حالت حرکت قطار و استفاده بیشتر از حالت خلاصی، انرژی مصرفی حداقل شود. در [۸-۱۲] سیستم تک‌قطاره با چند هدف جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی نظیر بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات الگوریتم تکاملی سعی شده است که علاوه بر حداقل کردن انرژی مصرفی، زمان سفر نیز حداقل شود. به‌عبارت دیگر جبهه پرتوی انرژی برحسب زمان تعیین شده است. در همه تحقیقات فوق، موضوع انرژی بازتولیدی در نظر گرفته نشده است. در [۱۳، ۱۴] که در زمینه سیستم‌های چند قطاره هستند نیز باز تولید انرژی ترمزی مطرح نشده است. در [۱۵، ۱۶] ضمن بهینه کردن مشخصه سرعت قطار، با تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها سعی شده است که حداکثر استفاده از انرژی بازتولیدی قطارها به عمل آید. در این تحقیقات که اغلب با عنوان بهره‌برداری کارآمد قطارها شناخته می‌شوند، گرچه به موضوع باز تولید انرژی پرداخته شده است، ولی



عمر کاری بالایی باشد که در میان فناوری‌های موجود، ابرخازن‌ها در مجموع مناسب‌ترین گزینه هستند و چون تحقیق حاضر بر روی شبکه از قبل ساخته شده انجام می‌شود، نوع ساکن که از لحاظ نصب و اجرا محدودیت‌های کمتری دارد در نظر گرفته شده است. سامانه ذخیره‌ساز از دو بخش اصلی تشکیل شده است؛ قسمت اول عنصر ذخیره کننده که از نوع ابرخازن است. چون ولتاژ نامی ابرخازن‌ها پایین و حدود ۲،۵ ولت است، به‌طور معمول توسط شرکت‌های سازنده بلوک‌های آماده به‌صورت مجموعه سری از خازن‌ها ساخته می‌شود. حال با توجه به ولتاژ نامی شبکه تعداد مناسبی از این بلوک‌ها با یکدیگر سری می‌شوند و با توجه به توان و انرژی مورد نیاز، تعداد کافی از این زنجیره‌های سری با یکدیگر موازی می‌شوند. بخش دوم مبدل DC/DC است که برای اتصال ذخیره‌ساز به شبکه بکار می‌رود. این مبدل به‌صورت دوطرفه کار می‌کند و هنگام ترمزگیری و افزایش ولتاژ شبکه به‌صورت مبدل کاهنده عمل کرده و انرژی را در خازن‌ها ذخیره می‌کند و در زمان شتاب‌گیری به‌صورت افزایش‌دهنده وارد عمل شده و انرژی را به شبکه برمی‌گرداند تا توسط قطارهای در حال شتاب‌گیری استفاده شود. سامانه ذخیره‌ساز شامل بلوک‌های ابرخازن و مبدل در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: سامانه ذخیره‌ساز ساکن خازنی متصل به شبکه مترو

برای کنترل عملکرد مبدل نیاز به یک سیستم مدیریت توان است که از اهمیت بالایی برخوردار است و همان‌طور که قبلاً اشاره شد مطالعات زیادی در زمینه نحوه کنترل مبدل و در نتیجه حداکثر کردن بازده ذخیره‌ساز انجام شده است. الگوریتم کنترلی مورد استفاده در شبیه‌سازی مشابه روش استفاده شده در [۱۸] است. ضمن اینکه در تغییر وضعیت از شارژ و دشارژ به خاموش یا برعکس که پرس ناگهانی برای جریان خازن‌ها ایجاد می‌شود، برای جلوگیری از کاهش عمر خازن‌ها، محدودیت حداکثر نرخ تغییرات جریان در نظر گرفته شده است. سه حالت کاری شارژ، دشارژ و خاموش، با بازخورد گرفتن از سه پارامتر ولتاژ شبکه، وضعیت شارژ ابرخازن‌ها و جریان لحظه قبل ذخیره‌ساز، تعیین می‌شود. این مجموعه را می‌توان با یک منبع جریان کنترل شونده مدل کرد که در شکل (۳) در شبکه قطار شهری نشان داده شده است.

### ۲-۳- مدل سازی شبکه

سیستم تغذیه به‌طور معمول از نوع DC با ولتاژ ۶۰۰، ۷۵۰، ۱۵۰۰ یا ۳۰۰۰ ولت است که در کشور ما در حال حاضر از سیستم ۷۵۰ ولت استفاده می‌شود. ولتاژ تغذیه از طریق پست‌های کشش توسط ترانسفورماتورهای قدرت از شبکه بالادستی تأمین می‌شود، سپس

$$M \frac{dv}{dt} = F_T(x, v) - R_T(x, v) \quad (1)$$

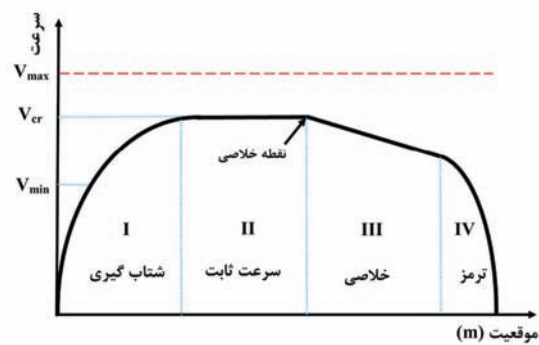
که  $M$  جرم کل قطار و مسافران،  $v$  سرعت لحظه‌ای حرکت قطار،  $F_T$  نیروی کشش قطار و  $R_T$  نیروی مقاوم کل قطار است. با توجه به مشخصه فیزیکی مسیر، مقدار مقاومت قطار معلوم است و برای شتاب معین می‌توان مقدار نیروی کشش مورد نیاز را از روی مشخصه قطار تعیین کرد. مقدار توان الکتریکی مصرفی قطار  $P_{cons}$  در حالت موتوری و توان بازتولید ترمزی  $P_{regen}$  در حالت ژنراتوری با استفاده از روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شود و می‌توان قطار را به‌عنوان یک بار الکتریکی در شبکه مدل‌سازی کرد که علاوه بر مقدار توان، موقعیت آن نیز در هر لحظه از زمان تغییر می‌کند.

$$P_{cons} = \frac{F_T \times v}{\eta} \quad (2)$$

$$P_{regen} = F_T \times v \times \eta \quad (3)$$

که  $\eta$  بازده مجموعه موتور (ژنراتور) الکتریکی، اینورتر و گیربکس است.

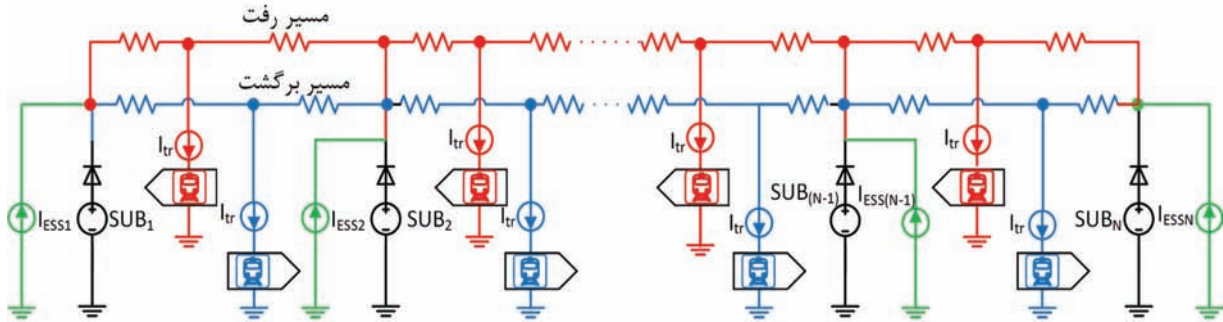
شکل (۱) مشخصه سرعت برحسب مکان نمونه را برای قطار نشان می‌دهد که در حالت کلی می‌تواند شامل ۴ ناحیه کاری شتاب‌گیری، سرعت ثابت، خلاصی و ترمزگیری باشد. برای به‌دست آوردن مشخصه‌های مختلف سرعت برای قطار در این مقاله از دو متغیر تصمیم سرعت ورود به ناحیه سرعت ثابت ( $V_{cr}$ ) و زمان ورود به ناحیه خلاصی ( $t_{cr}$ ) استفاده شده است. محدوده تغییرات  $V_{cr}$  می‌تواند بین  $V_{max}$  (حداکثر سرعت مجاز قطار) و  $V_{min}$  (حداقل سرعتی که مقادیر کمتر آن نارضایتی مسافران را به‌دنبال دارد) باشد. معادلات کامل حرکت قطار و روابط مقاومت قطار و نحوه شبیه‌سازی آن‌ها در [۲۹] آورده شده است.



شکل ۱: مشخصه سرعت برحسب مکان قطار

### ۲-۲- مدل سازی ذخیره‌ساز

در سال‌های اخیر به موضوع استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی جهت بهبود عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی توجه خاصی نشان داده شده است که اهداف اصلی آن، افزایش بازده انرژی، کاهش نوسانات ولتاژ و کاهش دامنه حداکثر جریان پست‌ها است. برای این منظور از هر دو نوع ذخیره‌ساز ساکن و قابل نصب روی قطار استفاده شده است [۲]. ذخیره‌سازهای مورد استفاده به‌طور معمول از نوع باتری، چرخ طیار و ابرخازن‌ها هستند. با توجه به تعداد زیاد و سرعت بالای شتاب و ترمزگیری‌های قطار در طول یک روز، سامانه ذخیره‌ساز باید دارای مشخصه‌های مناسب یعنی چگالی توان، چگالی انرژی و



شکل ۳: مدل شبکه قطار شهری همراه با ذخیره‌سازهای انرژی

توسط سیستم یک‌سوساز که به‌طور معمول نوع دیودی ۱۲ پالسه است، ولتاژ DC موردنیاز فراهم می‌شود. تغذیه قطارها از طریق خطوط خروجی پست‌های فوق و توسط شبکه بالاسری یا ریل سوم انجام می‌شود. در تحلیل شبکه، پست‌ها توسط یک منبع ولتاژ DC همراه با مقاومت داخلی و یک دیود سری مدل می‌شوند و خطوط تغذیه و ریل‌ها توسط مقاومت اهمی مدل می‌شوند. قطارها نیز با منابع جریان مدل می‌شوند که موقعیت آن‌ها نیز در حال تغییر است. در شکل (۳) مدل یک شبکه قطار شهری نمونه همراه با ذخیره‌سازهای ساکن انرژی نشان داده شده است.

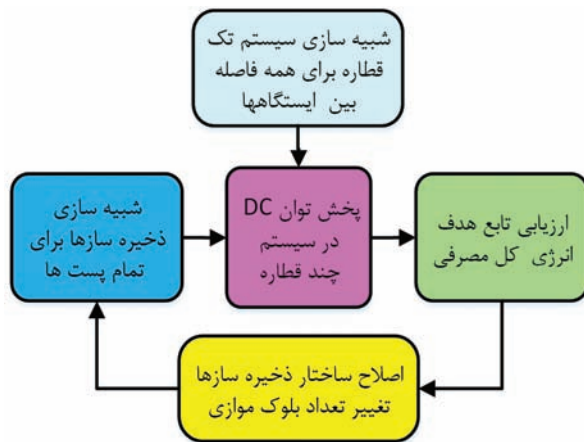
### ۳- الگوریتم پیشنهادی

هدف اصلی این تحقیق کاهش مصرف انرژی الکتریکی است، از این‌رو مساله به‌صورت حداقل‌سازی انرژی کل دریافتی شبکه از پست‌های کشش تعریف می‌شود که در رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$\min E_{in-tot} = \sum_{k=1}^{N_{sub}} \int_0^T V_{sub-k} \cdot I_{sub-k} dt \quad (4)$$

$$s.t. \int_0^T V_{ESS-k} \cdot I_{ESS-k} dt = 0, k = 1, 2, \dots, N_{sub} \quad (5)$$

که  $E_{in-tot}$  انرژی کل دریافتی شبکه در یک دوره تناوب کاری برحسب kWh،  $N_{sub}$  تعداد پست‌های کشش،  $V_{sub-k}$  و  $I_{sub-k}$  به ترتیب ولتاژ و جریان پست  $k$  ام،  $V_{ESS-k}$  و  $I_{ESS-k}$  ولتاژ و جریان ذخیره‌ساز واقع در پست  $k$  ام و  $T$  دوره زمانی که همان فاصله زمانی حرکت قطارها در نظر گرفته شده است. چون حرکت قطارها به‌صورت تناوبی است، مجموع انرژی دریافتی و تحویلی هر بانک خازنی باید در یک دوره تناوب صفر باشد که این موضوع به‌صورت قید رابطه (۵) بیان شده است. ظرفیت بانک خازنی باید طوری انتخاب شود که انرژی کل مصرفی در بازه زمانی مورد نظر حداقل شود. بانک خازنی نیاز به محل مشخصی برای نصب خازن‌ها و تجهیزات وابسته دارد و با توجه به محدودیت فضا، فرض شده که ذخیره‌سازها فقط در ایستگاه‌های دارای پست کشش نصب می‌شود. تعداد بلوک‌های سری  $n_s$  در یک زنجیره بانک خازنی با توجه به ولتاژ نامی شبکه انتخاب می‌شود و ثابت است. پارامتر متغیر  $np$  یعنی تعداد شاخه‌های موازی در هر ذخیره‌ساز است. این تعداد می‌تواند بین صفر و حداکثر مقدار ممکن تغییر کند. اگر برای یک پست  $np=0$  شود یعنی ذخیره‌ساز وجود ندارد. حداکثر مقدار  $np$  در [۲۲] با فرض برگشت‌پذیر بودن پست‌ها با استفاده از بیشترین مقدار لحظه‌ای توان منفی پست‌ها محاسبه شده است. روش فوق به‌دلیل اینکه ممکن است در بعضی موارد توان لحظه‌ای زیاد باشد ولی توان



شکل ۴: فرآیند کاهش انرژی مصرفی کل شبکه

در همه مطالعات قبلی که در زمینه محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازها یا بهینه‌سازی آن‌ها انجام شده‌اند، ظرفیت ذخیره‌سازها برای مشخصه سرعت عادی یا مشخصه با حداقل زمان سفر تعیین شده است که ضمن هزینه بالای خرید و نصب تجهیزات ذخیره‌ساز، ممکن است در خیلی از شرایط از حداکثر ظرفیت آن استفاده نشود. ویژگی بارز این تحقیق این است که با بهینه کردن مشخصه سرعت قطارها بدون هیچ هزینه‌ای، ظرفیت ذخیره‌ساز موردنیاز نیز کاهش یافته است. ضمن اینکه مزایای دیگری مانند کاهش استهلاک قطارها را نیز به همراه دارد. برای رسیدن به این هدف، شبیه‌سازی در ۴ سناریو انجام شده است. ابتدا انرژی کل مصرفی در حالت عادی محاسبه شده و خازن مورد نیاز محاسبه شده است، سپس مقدار خازن مورد نیاز برای شبکه با مشخصه سرعت بهینه به‌دست آمده است. نتایج در بخش

بعد به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند.

#### ۴- تحلیل نتایج شبیه سازی در سیستم مورد مطالعه

##### ۴-۱- سیستم مورد مطالعه

خط ۱ شبکه قطار شهری مشهد به عنوان سیستم مورد نظر برای مطالعه در نظر گرفته شده است که مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است. فاصله زمانی بین حرکت قطارها ۵ دقیقه است و در هر لحظه ۹ قطار در هر طرف خط در حال حرکت هستند.

جدول ۱: مشخصات خط ۱ قطار شهری مشهد

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی شبکه	۷۵۰ V DC
ولتاژ بی باری پست	۸۴۰ V DC
تعداد پست های کشش	۱۱
تعداد ایستگاه مسافری	۲۲
مقاومت اهمی خط بالاسری	۰.۰۳۶ Ω/km
مقاومت اهمی ریل	۰.۰۲۲ Ω/km
طول تقریبی خط (در هر جهت)	۱۹ کیلومتر

در حال حاضر هر قطار شامل ۲ واگن است که مشخصات واگن ها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: مشخصات هر واگن قطار خط ۱ قطار شهری مشهد

پارامتر	مقدار
جرم واگن خالی ( $AW_0$ )	۴۳ تن
حداکثر جرم مسافر ( $AW_3$ )	۱۸.۹ تن
جرم قسمت گردان	۳.۷ تن
بازده مجموعه موتور، اینورتر و گیربکس	۸۶٪
حداکثر شتاب موتوری	۱.۳ m/s <sup>2</sup>
حداکثر شتاب ترمزی	۱.۲ m/s <sup>2</sup>
حداکثر جرک مجاز	۱ m/s <sup>3</sup>
حداکثر مصرف داخلی	۴۲ kW

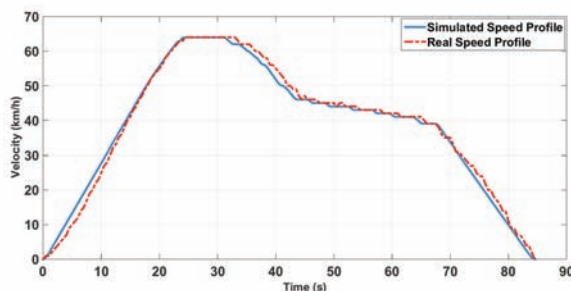
ابرخازن های مورد استفاده در ذخیره سازها ساخت شرکت Maxwell هستند. حداقل ظرفیت هر ذخیره ساز، یک زنجیره با توان نامی kW ۱۸۰ و ولتاژ نامی V DC ۷۵۰ شامل ۶ بلوک سری ابرخازن است که مشخصات فنی هر بلوک ابرخازن در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات هر بلوک ابرخازن مورد استفاده در ذخیره ساز

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	۱۲۵ V
ظرفیت نامی	۶۳ F
حداکثر جریان پیوسته	۲۴۰ A
حداکثر توان پیوسته	۱۸۰ kW
حداکثر انرژی قابل ذخیره	۱۳۷ Wh
تعداد ابرخازن سری	۴۸
انرژی قابل ذخیره در هر خازن	۳ Wh

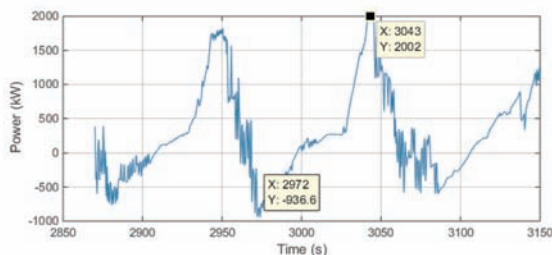
#### ۴-۲- مقایسه نتایج شبیه سازی سناریوهای مختلف

برای شبیه سازی کل شبکه، ابتدا حرکت قطار در هر فاصله بین ایستگاهی با استفاده از شبیه ساز تک قطاره مدل سازی شده است. با توجه به اینکه مشخصه سرعت واقعی قطار در راهبری دستی به شدت به رفتار راهبران وابسته است، برای مدل سازی حرکت در حالت واقعی، از داده های ذخیره شده در سامانه ضبط کننده رویداد قطارها استفاده شده است (در هر ثانیه ۲ نمونه از سرعت قطار ذخیره می شود). مشخصه های سرعت متنوعی از قطارها در ساعت ها و شرایط مختلف کاری رسم شده است. سپس نزدیک ترین نمونه از نظر زمان سفر به زمان برنامه ریزی شده انتخاب شده است و توسط نرم افزار شبیه سازی شده است. در شکل (۵) یک نمونه مشخصه سرعت واقعی و شبیه سازی شده برای یک فاصله بین ایستگاهی نمونه نشان داده شده است. این کار برای تمام فاصله های بین ایستگاهی سیستم مورد مطالعه انجام شده است و در نهایت با انجام پخش توان DC برای کل شبکه، کلیه پارامترهای الکتریکی شامل ولتاژها، جریان ها، توان ها و انرژی مصرفی کل شبکه محاسبه شده اند. نتایج حالت واقعی به عنوان سناریوی پایه (سناریوی A) در سطر اول جدول (۴) نشان داده شده است در این سناریو زمان سفر بین ایستگاه ها و زمان سفر کل مسیر مطابق جدول زمان بندی شرکت بهره برداری قطار شهری مشهد در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: مشخصه سرعت واقعی و شبیه سازی شده برای یک IS

در سناریوی دوم (B) مانند مطالعات قبلی میزان خازن مورد نیاز برای کاهش مصرف انرژی کل سیستم عادی محاسبه شده است. برای تخمین حداکثر تقریبی خازن ها، با فرض برگشت پذیر بودن پست ها، پخش توان انجام شده است و مقدار توان لحظه ای منفی در تمام پست ها به دست آورده شده است. توان لحظه ای پست کشش شماره ۳ به عنوان نمونه در سیستم مورد مطالعه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶: توان لحظه ای در یک پست کشش شماره ۳ با فرض برگشت پذیر بودن پست حداکثر تعداد بلوک موازی خازن ها  $n_{p_{max}}$  در هر پست از رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$n_{p_{max}} = \frac{P_{max}^{neg}}{0.75 \times P_{string}} \quad (6)$$

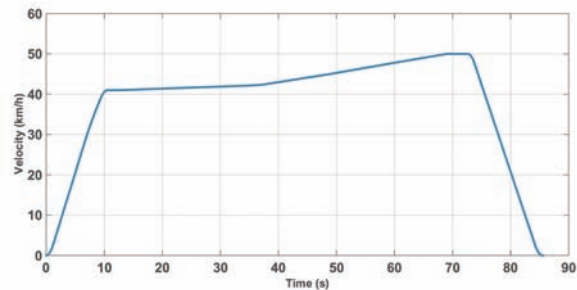
که  $P_{max}^{neg}$  حداکثر توان منفی در پست و  $P_{string}$  توان نامی هر

بلوک ابرخازن است. برای ابرخازن داده شده با توان نامی هر زنجیره ۱۸۰ kW و پست نمونه که توان آن در شکل (۶) نشان داده شده است:

$$\eta_{pmax} = \frac{936}{0.75 \times 180kw} = 6.93 \approx 7$$

ضریب ۰,۷۵ به این دلیل در رابطه استفاده شده است که در عمل برای افزایش طول عمر خازن‌ها، اجازه داده نمی‌شود که SOC از ۰,۲۵ کمتر شود. لذا بخشی از ظرفیت خازن استفاده نمی‌شود. شبیه‌سازی با بلوک‌های مختلف خازن انجام شده است و با فرض مساوی بودن تعداد بلوک‌ها در تمام پست‌ها و عدم وجود محدودیت، تعداد بلوک‌های موازی تا جایی افزایش داده شده است که دیگر تأثیری بر کاهش مصرف انرژی نداشته باشد. نتایج نهایی این سناریو در سطرهای ۲ تا ۴ جدول (۴) برای ۵، ۶ و ۷ بلوک موازی خازن آورده شده است.

در سناریوی C با استفاده از الگوریتم ارایه شده در [۲۹] با استفاده از متغیرهای تصمیم سرعت کروز و زمان خلاصی - که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، مشخصه بهینه سرعت برای همه فاصله‌های بین ایستگاهی به‌دست‌آمده است، ضمن اینکه قید زمان سفر برنامه‌ریزی شده بین ایستگاه‌ها و کل مسیر و سایر قیده‌های فیزیکی رعایت شده است. مشخصه سرعت بهینه تعیین‌شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای فاصله بین ایستگاهی نمونه در شکل (۷) نشان داده شده است. سپس با انجام پخش توان، انرژی‌های شبکه محاسبه شده است و نتایج در سطر ۵ جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، بهینه‌سازی مشخصه سرعت به‌تنهایی کاهش قابل توجهی در انرژی کل مصرفی دارد.



شکل ۷: مشخصه سرعت بهینه شبیه‌سازی شده برای IS نمونه

در سناریوی آخر (D)، با انجام شبیه‌سازی مشابه سناریوی B برای شبکه با مشخصه‌های سرعت بهینه، مقدار خازن مورد نیاز جهت کاهش انرژی مصرفی کل محاسبه شده است و نتایج در سطرهای ۶ تا ۸ برای ۵، ۶ و ۷ بلوک موازی خازن خلاصه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، صرفه‌جویی انرژی در سناریوی D به میزان قابل توجهی بیشتر از سناریوی B است. ضمن اینکه مقدار خازن مورد نیاز هم کمتر است. در شبکه با مشخصه سرعت عادی، با استفاده از ۷ بلوک خازن، مصرف کل انرژی کمتر شده است، در حالی که با مشخصه سرعت بهینه، با ۶ بلوک خازن، انرژی کل کمترین مقدار خود را داراست. نتایج نشان می‌دهد که بهینه کردن مشخصه سرعت و سپس خازن‌گذاری، از یک‌طرف کاهش انرژی بیشتری به‌دنبال دارد و از طرف دیگر، با توجه به نیاز به تعداد کمتر خازن، از نظر هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیز صرفه‌جویی به‌دنبال خواهد داشت.

در جدول (۴)،  $\Delta E$ ، درصد کاهش انرژی کل مصرفی نسبت به حالت مبنا (سناریوی A) است. مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش

مصرف انرژی در سناریوی D با ۶ بلوک خازن موازی به میزان ۲۳,۹ درصد است و با افزایش خازن‌ها به ۷ بلوک در این سناریو، انرژی کل زیاد شده است. Econ-trains انرژی مصرفی کل قطارهاست که شامل انرژی مورد نیاز جهت حرکت قطار و روشنایی و تهویه است. Egen-trains انرژی باز تولیدی همه قطارهاست که از طریق خط بالاسری به شبکه برگردانده می‌شود.

جدول ۴: انرژی‌های شبکه در سناریوهای مختلف

Scenario	$n_p$	$E_{in-tot}$	$\Delta E\%$	$E_{con-trains}$	$E_{gen-trains}$	$E_{loss}$	$E_{block}$	$E_{Ess}$
A	۰	۳۲۵,۲	۰,۰	۴۲۴,۵	۱۱۹,۷	۲۰,۴	۴۶,۳	۰
B	۵	۲۸۴,۷	۱۲,۵	۴۱۷,۳	۱۵۲,۹	۲۰,۳	۵,۹	۷۸,۴
	۶	۲۸۱,۴	۱۳,۵	۴۱۶,۸	۱۵۵,۸	۲۰,۳	۲,۵	۸۵,۳
	۷	۲۷۹,۷	۱۴,۰	۴۱۶,۴	۱۵۷	۲۰,۴	۰,۸	۸۶,۲
C	۰	۲۷۵,۹	۱۵,۲	۳۲۰,۳	۵۷,۷	۱۳,۴	۳۴	۰
D	۵	۲۵۱,۱	۲۲,۸	۳۱۸,۵	۸۴,۱	۱۳,۸	۵,۷	۵۱,۵
	۶	۲۴۷,۵	۲۳,۹	۳۱۸,۵	۸۴,۷	۱۳,۸	۵	۵۰,۳
	۷	۲۴۹,۲	۲۳,۴	۳۱۸,۵	۸۳,۱	۱۳,۸	۶,۸	۴۷,۵

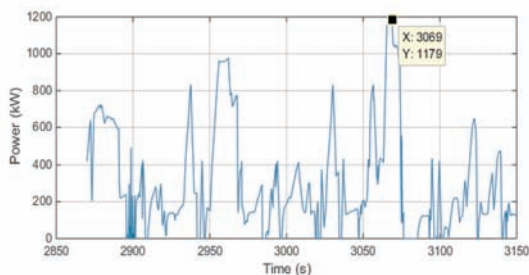
Eblock بخشی از انرژی باز تولیدی همه قطارهاست که توسط بقیه قطارها در شبکه جذب نشده است و به‌طور معمول در مقاومت‌های ترمزی تلف می‌شود. چون معمولاً پذیرندگی شبکه ۱۰۰٪ نیست، Egen-trains از مجموع باز تولیدی قطارها کمتر است. Eregen کل انرژی باز تولیدی هر قطار است که بسته و وضعیت سایر قطارها و شبکه مقداری از آن استفاده خواهد شد و بقیه در مقاومت‌های ترمزی تلف می‌شود.

$$E_{block} = \left( \sum_{All\ trains} E_{regen} \right) - E_{gen-trains} \quad (V)$$

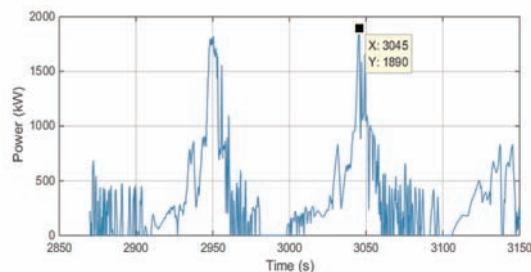
یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از ذخیره‌سازها همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود این است که، استفاده از ابرخازن‌ها منجر به کاهش تلفات در مقاومت‌های ترمزی می‌شود، ولی اگر مقدار ذخیره‌ساز از حدی بیشتر شود، می‌تواند دوباره باعث افزایش این تلفات شود. Eloss کل تلفات الکتریکی در شبکه است (غیر از تلفات در مقاومت‌های ترمزی) که با انجام پخش بار DC در کل سیستم، محاسبه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر:

$$E_{in-tot} = E_{cons-trains} - E_{gen-trains} + E_{loss} \quad (A)$$

با بهینه‌سازی مشخصه سرعت، انرژی مصرفی و باز تولیدی قطارها هردو کاهش پیدا می‌کنند ولی چون مقدار عددی کاهش انرژی مصرفی بیشتر است، انرژی خالص دریافتی کل سیستم نیز کم می‌شود. مشاهده می‌شود که خازن‌گذاری از نوع ساکن تقریباً تأثیری بر تلفات کل انرژی در شبکه ندارد. مقدار انرژی دریافتی و تحویلی خازن‌ها در یک دوره تناوب در جدول با EBSS نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، استفاده از مشخصه سرعت بهینه باعث می‌شود که میزان انرژی مبادله شده خازن‌ها در هر دوره تناوب، کمتر از مقدار انرژی مبادله شده با مشخصه سرعت عادی است. این به معنی شارژ و دشارژ کمتر و در نتیجه طول عمر بیشتر خازن‌هاست. از مزایای دیگر استفاده از ذخیره‌سازها همراه با بهینه‌سازی مشخصه سرعت، بهبود مشخصه ولتاژ پست‌ها و قطارها و کاهش دامنه حداکثر توان پست‌ها است. که به‌عنوان پارامترهای کیفیت توان حائز اهمیت



ب- استفاده هم‌زمان از ذخیره‌ساز و مشخصه سرعت بهینه



الف- استفاده از ذخیره‌ساز با مشخصه سرعت عادی

شکل ۸: توان لحظه‌ای در پست کشش شماره ۳

عملی انرژی در قطارها و پست‌ها، همکاری صمیمانه داشته‌اند، کمال سپاسگزاری را دارند.

### مراجع

- [1] V. De Martinis, M. Gallob, "Models and methods to optimize train speed profiles with and without energy recovery systems: a suburban test case," Proc. Social and Behavioral Sciences, vol. 87, pp. 222 – 233, 2013.
- [2] A. Gonzalez Gil, R. Palacin, P. Batty and J. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," Energy Conversion and Management, vol. 80, pp. 509-524, 2014.
- [3] G. M. Scheepmaker and R. M. P. Goverde, "The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements," Journal of Rail Transport Planning & Management, vol. 5, no. 4, pp. 225–239, Dec. 2015.
- [4] K. Kim, S. Chien, "Optimal train operation for minimum energy consumption considering track alignment, speed limit, and schedule adherence," J. Transp. Eng. Vol. 137, no. 9, pp. 665–674, 2011.
- [5] S. Lu, S. Hillmansen, T. Kin Ho, and C. Roberts, "Single-train trajectory optimization," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 14, no. 2, pp. 743–750, Jun. 2013.
- [6] M. Domínguez, A. Fernández, A. P. Cucala, and P. Lukaszewicz, "Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F-J. Rail Rapid Transit, vol. 225, no. 5, pp. 463–474, Sep. 2011.
- [7] J. Yin, D. Chen, and L. Li, "Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 6, pp. 2561–2571. 2014.
- [8] R. Chevrier, P. Pellegrini, J. Rodriguez, "Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times," Transportation Research Part C, vol. 37, pp. 20–41, 2013.
- [9] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, T. Gonsalves, and A. Fernandez-Rodríguez, "Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines," Eng. Appl. Artif. Intell. vol. 29, pp. 43–53, Mar. 2014.
- [10] W. ShangGuan, X. H. Yan, B. G. Cai and J. Wang, "Multi-objective optimization for train Speed trajectory in CTCS high-speed railway with hybrid evolutionary algorithm," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 16, no. 4, pp. 2215 - 2225, Mar. 2015.
- [11] A. Fernández-Rodríguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, M. Domínguez, and T. Gonsalves, "Design of robust and energy-efficient ATO speed profiles of metropolitan lines considering train load variations and delays," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 16, no. 4, pp. 2061–2071,

« ادامه در صفحه ۵۷

است. در شکل (الف-۸) توان لحظه‌ای مربوط به پست ۳ با ذخیره‌ساز در مشخصه سرعت عادی و در شکل (ب-۸) توان لحظه‌ای همان پست با ذخیره‌ساز و مشخصه سرعت بهینه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از ذخیره‌ساز به تنهایی، باعث کاهش ۵٫۶٪ حداکثر توان لحظه‌ای (از ۲۰۰۲ kW به ۱۸۹۰ kW) شده است درحالی‌که استفاده هم‌زمان باعث کاهش ۴۱٪ حداکثر توان لحظه‌ای (از ۲۰۰۲ kW به ۱۱۷۹ kW) شده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مصرف انرژی در قطار شهری با استفاده هم‌زمان از مشخصه‌های سرعت بهینه حرکت قطار و ذخیره‌سازهای ساکن ابرخازنی کاهش داده شد. نتایج نشان می‌دهد که اگر ظرفیت ذخیره‌سازها با پروفایل سرعت عادی محاسبه شود، حداکثر ۱۴٪ صرفه‌جویی حاصل می‌شود (np=۷). درحالی‌که اگر ابتدا مشخصه‌های سرعت بهینه شود، سپس ظرفیت ذخیره‌ساز محاسبه شود، صرفه‌جویی انرژی به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و به حدود ۲۳٫۹٪ می‌رسد. ضمن اینکه مقدار ابرخازن مورد نیاز برای این کار کمتر از حالت مشخصه عادی سرعت است (np=۶). استفاده از مشخصه سرعت بهینه در هنگام محاسبه ذخیره‌سازها، نه تنها باعث کاهش ظرفیت ابرخازن موردنیاز می‌شود، بلکه با کم شدن انرژی مبادله شده ذخیره‌سازها در هر دوره تناوب از حدود ۸۵kW به ۵۰kW، باعث افزایش عمر کاری ابرخازن‌ها می‌شود. از طرفی مشاهده می‌شود که بهینه کردن مشخصه سرعت، تلفات شبکه را نیز کاهش می‌دهد که به دلیل کاهش توان مصرفی و بازتولیدی قطارها و در نتیجه، کاهش جریان خط است. نتیجه کاهش تلفات، افزایش بیشتر بازده انرژی کل شبکه است. ذخیره‌سازهای ساکن تأثیری بر تلفات شبکه ندارند، درحالی‌که باعث کاهش تلفات در مقاومت‌های ترمزی قطارها و در نتیجه افزایش راندمان می‌شوند. بهبود پارامترهای کیفیت توان مانند حداکثر توان لحظه‌ای و نوسانات ولتاژ، از مزایای دیگر روش پیشنهادی است، بطوریکه کاهش ۵٫۶ درصدی حداکثر دامنه توان لحظه‌ای یک پست نمونه به ۴۱٪ تبدیل شده است. در پایان لازم به ذکر است که در این مقاله هدف فقط کاهش انرژی ورودی کل شبکه بود و با داشتن هزینه انرژی و قیمت ذخیره‌سازها و انجام تحلیل اقتصادی، ظرفیت بهینه ذخیره‌سازها نیز قابل‌محاسبه خواهد بود.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از کلیه کارکنان شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد که در استخراج مشخصات فنی خط ۱ و اندازه‌گیری

## کنترل محرکه ماشین جریان مستقیم بدون جاروبک با هدف بهبود بازده الکتریکی جهت استفاده در پمپ آب خورشیدی

## مدل مداری سلول‌های خورشیدی پلیمری و کاربرد آن برای طراحی و تحلیل آرایه‌های فتوولتایی قابل پیکربندی

امیر خزاعی

استاد راهنما: دکتر حسین ابوترابی  
دانشگاه فردوسی مشهد

علی خرمی

استاد راهنما: دکتر مجتبی جودکی  
دانشگاه فردوسی مشهد

از میان کاربردهای متعدد سامانه‌های فتوولتاییک، سامانه پمپ آب خورشیدی در مناطق دور از شبکه برق، توجه گسترده‌ای را به خود اختصاص داده است. با توجه به هزینه زیاد تولید انرژی الکتریکی از تابش خورشید، بهبود بازده سامانه پمپ آب خورشیدی برای استخراج بیشترین آب ممکن از چاه ضروری است. بهبود بازده کلی سامانه پمپ آب خورشیدی از طریق انتخاب مناسب اجزاء و همچنین بهبود بازده تک‌تک اجزاء سامانه به دست می‌آید. در سال‌های اخیر به کارگیری موتورهای پربازده مانند موتور جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC)، که در صنعت به عنوان یک موتور با بازدهی بالا و عملکرد خوب شناخته می‌شود، مورد توجه قرار گرفته است. علی‌رغم بازده خوب موتور BLDC در شرایط نامی، باید توجه داشت در سامانه‌های پمپ آب خورشیدی، موتور الکتریکی بیشتر اوقات در شرایط غیر نامی کار می‌کند. عملکرد موتور در شرایط نامی، محدود به ساعات خاص از روزهای خاص در تابستان است؛ از این رو ضروری است سامانه کنترل محرکه الکتریکی در سرتاسر ناحیه عملکرد موتور، بیشینه بازده را تضمین نماید. بر همین اساس، در این رساله، سه راهکار برای بهبود بازده محرکه الکتریکی موتور BLDC پیشنهاد شده است.

راهکار نخست کاهش تلفات مس موتور BLDC از طریق پیاده‌سازی استراتژی بیشینه گشتاور به ازای جریان ثابت (MTPA) است. در این راهکار جریان‌های مرجع سامانه کنترلی به نحوی تعیین می‌گردد که بیشترین گشتاور ممکن از یک جریان معین اخذ گردد که این امر منجر به کاهش تلفات مس و بنابراین بهبود بازدهی موتور می‌گردد. راهکار دوم کمینه‌سازی مجموع تلفات محرکه الکتریکی موتور، شامل تلفات آهن و تلفات مس موتور و مبدل است. در این راهکار، الگوریتمی برای تعیین شار بهینه موتور در شرایط کاری متفاوت پیشنهاد شده است. کنترل غیرمستقیم شار در مقدار مطلوب آن منجر به بیشینه شدن بازده موتور BLDC در شرایط کاری مختلف خواهد شد. راهکار سوم، به کارگیری مبدل تک‌مرحله‌ای به جای مبدل مرسوم دو مرحله‌ای برای کنترل محرکه الکتریکی سامانه پمپ آب خورشیدی است. در ساختار تک‌مرحله‌ای پیشنهادی، هر دو عملکرد کنترلی سامانه پمپ آب خورشیدی، یعنی تحقق MPPT و کنترل موتور توسط اینورتر انجام شده و بنابراین تلفات مبدل سمت آرایه فتوولتاییک حذف خواهد شد. دو راهکار نخست به صورت آزمایشگاهی و راهکار سوم به صورت شبیه‌سازی پیاده‌سازی شده است. نتایج آزمایشگاهی و یا شبیه‌سازی در شرایط کاری مختلف، عملکرد مناسب راهکارهای فوق را تایید می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** پمپ آب خورشیدی، بهبود بازده، ماشین جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC)، ساختار مبدل تک‌مرحله‌ای، سامانه فتوولتاییک

\*\*\*

در این رساله با توجه به اهمیت و خواص مدل مداری برای سلول‌های آلی و کاربردهای متعدد آن، یک مدل مداری چند فیزیکی آرایه خواهد شد. مدل مداری پیشنهادی دارای دو ویژگی جدید است: منبع جریان و مقاومت سری وابسته به ولتاژ. برای مقاومت سری، رابطه بسته‌ای پیشنهاد خواهد شد که وابستگی به میدان (ولتاژ) را نشان می‌دهد. برای جریان نوری، بر اساس تئوری محدودیت بارفضایی، رابطه‌ای چند ضابطه‌ای برای توصیف وابستگی به ولتاژ معرفی خواهد شد. مدل مداری پیشنهادی قابلیت مدل‌سازی پیچش (S-kinck) منحنی جریان-ولتاژ سلول‌های آلی را خواهد داشت. الگوریتمی برای استخراج پارامترهای مدل مداری پیشنهاد شده است که پارامترهای مداری را با دقت خوبی از منحنی‌های جریان-ولتاژ اندازه‌گیری شده، استخراج می‌کند (دقت برازش  $10^6$  برابر بهتر از روش‌های استخراج قبلی). مقایسه پارامترهای استخراج شده در نقاط مشخص با نتایج به دست آمده از روش‌های دقیق تحلیلی، دقت مناسب روش را نشان می‌دهد. برای بررسی بهتر پدیده پیچش در منحنی جریان-ولتاژ، معادلات رانش-نفوذ اصلاح شده، پیاده‌سازی و شبیه‌سازی خواهد شد. شبیه‌سازی رانش-نفوذ نشان می‌دهد که اختلاف شدید بین تحرک‌پذیری الکترون و حفره باعث به وجود آمدن محدودیت بارفضایی و در نتیجه اشباع جریان نوری می‌شود. در این پژوهش ساختار سلول آلی ITO/PEDOT:PSS/PTB7:PCBM/Al (که یک ساختار عادی محسوب می‌شود نه معکوس) با بازدهی تبدیل انرژی اندازه‌گیری شده ۳،۵۷٪، پیاده‌سازی شده است. بستره‌های ITO مورد استفاده دارای مقاومت سطحی  $(\Omega/\square)$  ۱۵-۲۰ و گذردهی بالای ۸۰٪ بوده‌اند. لایه بافر (لایه انتقال‌دهنده حفره) PEDOT:PSS با نسبت پلیمری PEDOT به PSS (۱:۲.۵) و pH برابر با ۱.۵-۲.۵ تهیه شد. پلیمرهای PTB7 و PCBM از شرکت سیگما آلدردیج تهیه شده‌اند و برای محلول‌سازی لایه فعال از حلال کلروبنزن شرکت مرک استفاده شد. پارامترهای مدل مداری برای سلول آلی ساخته شده استخراج خواهد شد. تاثیر تنزل ویژگی‌های سلول ساخته شده با گذشت زمان بر روی پارامترهای مدل مداری بررسی خواهد شد.

به‌عنوان یک کاربرد از مدل‌های مداری، از آن برای تحلیل آرایه‌های فتوولتایی استفاده شده است. یک ساختار آرایه فتوولتایی با قابلیت پیکربندی الکتریکی جدید پیشنهاد شده است و از مدل مداری برای شبیه‌سازی و تحلیل آن استفاده شده است. این ساختار با تغییر شرایط سایه جزئی، قابلیت پیکربندی مجدد را دارد، به طوری که در هر شرایطی بیشترین توان را تولید می‌کند. آرایه پیشنهادی می‌تواند نسل جدیدی از پنل‌های هوشمند را به وجود آورد که در شرایط سایه جزئی پویا عملکرد مناسبی دارند. برای این ساختار قابل پیکربندی، یک ردیاب نقطه بیشینه توان جدید که قابلیت کار در سایه جزئی را دارد و می‌تواند پیکربندی بهینه را انجام دهد، پیشنهاد شده است. یک الگوریتم دو

« ادامه در صفحه ۴۵ »

## ◀ آنالیز تاثیر فیدبک و یا اطلاعات جانبی بر نرخ و ظرفیت و عملکرد مخابراتی کانال‌های چندکاربره

## ◀ کنترل پیش بین مقاوم زمان-واقعی دو حلقه‌ای

جعفر بوستان پور  
استاد راهنما: دکتر قوشه عابدتینی  
دانشگاه فردوسی مشهد

محمدقاسم فرجزاده دوین  
استاد راهنما: دکتر سیدکمال حسینی ثانی  
دانشگاه فردوسی مشهد

دانش تئوری اطلاعات مخابرات بی‌سیم راهنمای رسیدن به راهبردهای انتقال اطلاعات با سرعت بالاتر و افزایش وسعت ناحیه تحت پوشش و بهسازی انواع معیارهای عملکرد مخابراتی است. بهره‌گیری از رله در انواع کانال‌های یک شبکه مخابراتی (نظیر کانال نقطه‌به‌نقطه، کانال پخش، کانال دستیابی چندگانه) باعث افزایش نرخ قابل حصول و یا ساده‌سازی شیوه‌های کدگذاری می‌شود. همچنین تحلیل نتایج استفاده از فیدبک در کانال دستیابی چندگانه گوسی و به‌ویژه بسط نتیجه کار ازارو (ناحیه ظرفیت کانال دستیابی چندگانه گوسی با فیدبک) به بیش از دو فرستنده از مسایل مهم تحقیقاتی تئوری اطلاعات در سال‌های گذشته بوده است.

در این رساله، با توجه به دویخش تحقیقاتی مهم بالا (استفاده از رله و یا فیدبک) ابتدا یک کانال رله با اطلاعات جانبی در رله و تاثیر وجود همبستگی بین نویز دریافتی در رله و گیرنده بر نرخ قابل حصول و کران بالای ظرفیت این کانال در حالت الفبا پیوسته گوسی و سپس تاثیر وجود اطلاعات جانبی در رله بر ناحیه پوشش کانال رله در حضور از رمق افتادگی رایلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه با هدف تحقیق چند و چون مشکل بسط کار اوزارو ابتدا برای کانال دست‌یابی چندگانه با سه کاربر ناحیه نرخ قابل حصول و ناحیه کران خارجی ظرفیت در حالت الفبا پیوسته گوسی و در حضور فیدبک اثبات و شرایط دستیابی به ظرفیت برای جمع نرخ بررسی می‌گردد. سپس تاثیر فیدبک جزئی از گیرنده به فرستنده‌ها بر روی کران‌های ظرفیت کانال دستیابی چندگانه با رله تحلیل می‌شود و نتایج برای حالات الفبا گسسته و بی‌حافظه و نیز الفبا پیوسته گوسی تعیین می‌گردد. در انتها نیز به کمک محاسبات عددی درستی نتایج ریاضی بررسی می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** ناحیه نرخ قابل حصول، ناحیه پوشش، اطلاعات جانبی، فیدبک، کانال دستیابی چندگانه گوسی، کانال دست‌یابی چندگانه با رله

\*\*\*

درسال‌های اخیر، کنترل پیش‌بین قابلیت‌های منحصر به فردی در کنترل سیستم‌های خطی مقید، غیرخطی و چندمتغیره از خود نشان داده است. اما توسعه آن در کاربردهای با دینامیک سریع با موانعی مواجه است که از جمله آنها میتوان به نیاز به مدل دقیق، حساسیت به نامعینی و اغتشاش، حجم بالای محاسبات و عدم تضمین انجام محاسبات در زمان نمونه‌برداری اشاره کرد. در این رساله سعی شده تا با تمرکز بر روی روش‌های طراحی کنترل پیش بین دو حلقه‌ای، معایب بیان شده تا حد ممکن برای سیستم‌های با ابعاد کوچک (کمتر از ۱۰ متغیر حالت و ۳۰ قید) کاهش یابد. روش پیشنهادی علاوه بر ارضا کردن قیود سخت چندوجهی محدب برای ورودی و حالت‌ها، نسبت به نامعینی محدود مقاوم است. لوله جدیدی جهت تضمین مقاومت روش پیشنهادی نسبت به نامعینی‌های محدود ارایه شده که بار محاسباتی کمتری نسبت به روش‌های مشابه دارد و محافظه‌کاری ناشی از اعمال لوله را کاهش می‌دهد. همچنین به کمک استفاده از روش‌های سریع بهینه‌سازی، حل بلادرنگ روش پیشنهادی با دقت زیر بهینگی از پیش تعیین شده، تضمین شده است. مساله‌ی کنترل ردیاب برای سیستم‌های خطی و غیرخطی مقید بررسی شده و نتایج بدست آمده برای مساله‌ی تعقیب مسیر خروجی بسط داده شده است. به‌علاوه، از دیدگاه عملی، روش پیشنهادی مزایایی را به‌دنبال خواهد داشت، از جمله: ۱- جهت پیاده‌سازی این روش نیازی به بازکردن حلقه کنترلی موجود در صنعت نیست و می‌توان از آن به‌عنوان حلقه داخلی روش پیشنهادی استفاده نمود، ۲- این روش به مدل سیستم حلقه-باز نیازمند نیست و تنها از مدل سیستم حلقه بسته استفاده می‌کند، ۳- در اثبات‌های پایداری مقاوم و تکرارپذیری حل مساله، از قید نهایی استفاده نشده که منجر به سادگی استفاده عملی، کاهش محافظه‌کاری و گسترش ناحیه همگرایی می‌شود. روش پیشنهادی علاوه بر شبیه‌سازی بر روی چند سیستم دینامیکی، بر روی ربات واقعی چهار درجه آزادی «اسکرا» (با ۸ حالت و ۲۴ قید) در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه فردوسی، با موفقیت پیاده‌سازی شده است، که نتایج بدست آمده نشان‌دهنده مزایای ادعایی بیان شده در عمل میباشد.

**کلمات کلیدی:** کنترل خطی، کنترل غیرخطی، کنترل مقاوم، کنترل پیش بین، کنترل ربات

\*\*\*

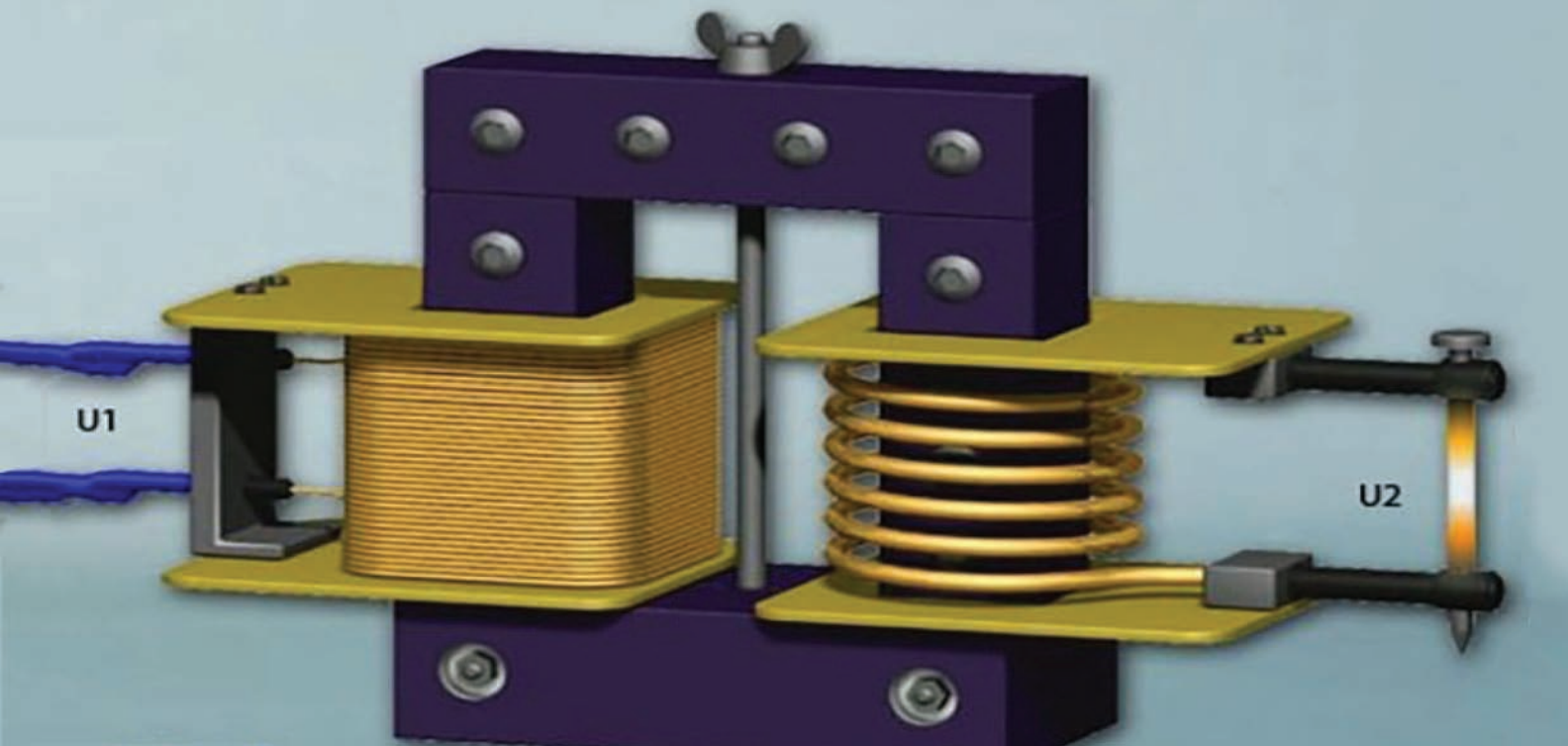
◀◀ ادامه از صفحه ۴۴

سرعت خوبی را در ردیابی نقطه بیشینه توان آرایه فتوولتایی ارایه داده است.

**کلمات کلیدی:** سلول‌های خورشیدی، سلول‌های پلیمری، پیچش، مدل مداری، شبیه‌سازی رانش-نفوذ، ردیاب بیشینه توان، ساختارهای قابل پیکربندی.

\*\*\*

مرحله‌ای مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات برای ردیابی بیشینه توان معرفی شده است. نوآوری الگوریتم پیشنهادی، علاوه بر ردیابی نقطه بیشینه توان، قابلیت پیکربندی آن در شرایط سایه جزئی است. علاوه بر شبیه‌سازی الگوریتم هوشمند ردیاب نقطه بیشینه توان (به کمک مدل مداری)، دستگاه ردیاب بیشینه توان ساخته شده و در شرایط سایه‌جزئی آزمایش شده است. دستگاه ساخته شده دقت و



مقاله علمی-ترویجی

## تدوین نرم افزار پایش وضعیت ترانسفورماتور به کمک تحلیل پاسخ فرکانسی (FRA)

مهدی بیگدلی/استادیار/گروه مهندسی برق/ واحد زنجان/ دانشگاه آزاد اسلامی/زنجان- ایران/ شرکت برق منطقه‌ای زنجان/ m.bigdeli@srbiau.ac.ir  
داود عزیزیان/استادیار/ گروه مهندسی برق/ واحد ابهر/ دانشگاه آزاد اسلامی/ ابهر- ایران/ شرکت برق منطقه‌ای زنجان/ d.azizian@abhariau.ac.ir

### چکیده

در حال حاضر مشکل عمده تشخیص عیب ترانسفورماتور با استفاده از FRA، پیچیدگی زیاد روش‌های تحلیل موجود به لحاظ الگوریتمی و محاسباتی و عدم امکان استفاده آسان توسط کاربر است. برخلاف روش DGA که نرم افزارهای مناسبی برای تفسیر نتایج اندازه گیری‌های آن توسعه یافته‌اند، روش FRA، با توجه به نوپا بودن، فاقد چنین نرم افزارهای جامعی است. بنابراین ضروری است نرم افزاری دقیق، کاربر پسند و قابل اطمینان برای این منظور تدوین شود. در این تحقیق نرم افزاری گرافیکی در محیط MATLAB تدوین شده است تا مهندس بهره‌بردار ترانسفورماتور، بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده، وضعیت ترانسفورماتور را تحلیل و بررسی نماید. برای این منظور، ابتدا آزمایش‌های لازم بر روی ترانسفورماتورهای مختلف (در حالت سالم و حالت‌های مختلف عیب) انجام و سپس به کمک روش‌های شناخته شده، نوع و شدت عیب مشخص می‌شود. علاوه بر روش‌های پیشین، روش جدیدی بر پایه ترکیب شبکه‌های عصبی احتمالی و شاخص‌های عددی برای تشخیص نوع عیب ارائه شده است. همچنین معیار جدیدی برای تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور بر پایه شاخص CC (در حالتی که نتایج اندازه‌گیری حالت سالم ترانسفورماتور در دسترس نیست) پیشنهاد می‌شود. در انتها عملکرد روش‌های پیشین و روش‌های پیشنهادی مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد.

**کلمات کلیدی:** ترانسفورماتور، تحلیل پاسخ فرکانسی (FRA)، نرم افزار گرافیکی، پایش وضعیت، عیوب سیم‌پیچ

## Development of Transformer Condition Monitoring Software by Frequency Response Analysis

■ Mehdi Bigdeli/ Assistant Professor / Department of Electrical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran/ Zanjan Regional Electric Company, Zanjan, Iran/ m.bigdeli@srbiau.ac.ir  
■ Davoud Azizian/ Assistant Professor/Department of Electrical Engineering, Abhar Branch, Islamic Azad University, Abhar, Iran/ Zanjan Regional Electric Company, Zanjan, Iran/ d.azizian@abhariau.ac.ir

### Abstract

At present, the major problem with transformer fault detection using the FRA is that all analysis methods are highly complex in terms of algorithms and computations that are not easily used by the exploiter. Un-



like the DGA method, which has developed good soft-wares to interpret the results of its measurements, the FRA method lacks this possibility due to its fledgling. Therefore, it is necessary to develop accurate, user-friendly and reliable software for this purpose. In this paper, graphical software is developed in MATLAB environment to enable transformer operation engineer to monitor the transformer condition without performing complex calculations. For this purpose, first the necessary experiments are performed on different transformers (in healthy and different fault conditions) and then by past well-known methods, the type and severity of fault are determined. In addition to the previous methods, a new method based on the combination of probabilistic neural network and numerical indices for the detection of fault type is proposed. Also, a new criterion for detecting fault occurrence based on CC index (for case where transformer healthy condition measurement results are not available) is proposed. Finally, the performance of previous methods and proposed methods is evaluated and evaluated.

**Keywords:** Transformer, Frequency Response Analysis (FRA), Graphical Software, Condition Monitoring, Winding Faults

### ۱- مقدمه

پایداری و قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت تا حد زیادی به وضعیت ترانسفورماتورهای آن وابسته است. ترانسفورماتورهای قدرت جزء تجهیزات مهم و گران قیمت یک شبکه تولید و انتقال برق هستند که خرابی آن‌ها باعث تحمیل هزینه‌های زیاد، کاهش قابلیت اطمینان شبکه قدرت و نهایتاً خروج بخشی از شبکه از مدار خواهد شد. بنابراین مراقبت و محافظت از ترانسفورماتورها در حین بهره‌برداری، لازم و ضروری است. این موضوع با گذشت زمان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است به طوری که امروزه پایش وضعیت ترانسفورماتورهای متوسط و کوچک نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اهمیت سیستم‌های تشخیص عیب و رقابتی شدن صنعت برق، روش‌های گوناگونی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر کدام از این روش‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود بوده و قادر به شناسایی نوع به خصوصی از عیب می‌باشند. یکی از مهم‌ترین عیوبی که در ترانسفورماتورها به‌وفور اتفاق می‌افتد و بخش قابل توجهی از خرابی‌های ترانسفورماتورهای قدرت را در بر می‌گیرد، عیوب ایجاد شده در سیم‌پیچ آن‌ها است. مهم‌ترین عیوبی که در سیم‌پیچ ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد، عبارتند از:

- جابجایی محوری سیم‌پیچ (AD)

- تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ (RD)

- تغییر فاصله بین بشقاب‌های سیم‌پیچ (DSV)

- اتصال کوتاه بین بشقاب‌های سیم‌پیچ (SC)

روش FRA مهم‌ترین روشی است که امروزه برای تشخیص این عیوب به کار گرفته می‌شود [۱-۳].

اساس کار در روش FRA به این صورت است که تابع تبدیل ترانسفورماتور در یک رنج وسیع فرکانسی اندازه‌گیری شده و این اندازه‌گیری‌ها با تابع تبدیل مرجع مقایسه می‌گردند. اختلاف‌های موجود بین دو منحنی، صدمات وارده به ترانسفورماتور را آشکار می‌سازد. سه روش شناخته‌شده، برای مقایسه بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری توابع تبدیل وجود دارد که عبارتند از: مقایسه مبتنی بر زمان، ساختار و نوع. که از بین این روش‌ها، روش مقایسه مبتنی بر زمان از بیشترین دقت برخوردار است. در هر حال، در هر سه روش نیاز است که دو منحنی اندازه‌گیری شده با یکدیگر مقایسه شوند. روش‌های مقایسه توابع تبدیل را می‌توان در ۴ دسته عمده؛ روش‌های بر پایه‌ی شاخص‌های آماری و عددی [۴-۷]، روش‌های بر پایه‌ی تحلیل مدار معادل [۸-۹]، روش‌های بر پایه‌ی الگوریتم‌های تخمین

[۱۱-۱۰] و روش‌های بر پایه‌ی الگوریتم‌های هوش مصنوعی [۱۴-۱۲] تقسیم‌بندی کرد. با توجه به تمرکز استاندارد IEEE [۱۵] بر روی استفاده از شاخص‌های آماری و عددی و نیز سادگی محاسبات و قابل فهم‌تر بودن آن‌ها برای کاربران، در این مقاله نیز این شاخص‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

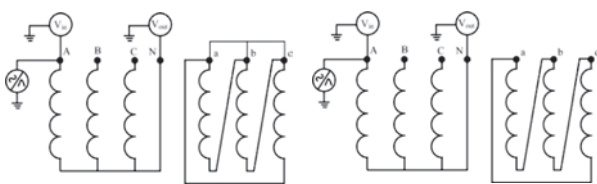
مطالعات زیادی در زمینه FRA و قابلیت‌های آن انجام شده است ولی با توجه به اینکه عمده این تحقیقات مربوط به ۱۰ سال اخیر بوده و این موضوع هنوز هم جز موضوعات روز دنیا در زمینه پایش وضعیت ترانسفورماتور است، انجمن‌های IEEE و IEC استانداردهای معتبری در زمینه FRA تدوین نموده‌اند [۱۶-۱۵]. گروه کاری GIGRE نیز گزارش مناسبی برای ارزیابی وضعیت مکانیکی سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از FRA ارائه نموده است [۱۷]. ولی این استانداردها و گزارش‌های علمی بیشتر در مورد الزامات اندازه‌گیری و مدارهای تست بحث نموده‌اند و هنوز استاندارد دقیقی برای تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های FRA تدوین نشده است. از این‌رو در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های FRA برای دستیابی به اطلاعاتی در مورد عیب ترانسفورماتور انجام شده است. در ادامه به پاره‌ای از نتایج این تحقیقات اشاره می‌شود. در مرجع [۱۸]، از سه شاخص SD، CC و ASLE برای این منظور استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داده است که تغییرات CC نسبت به بقیه شاخص‌ها خطی‌تر است. از طرف دیگر وقتی عیوب با شدت‌های بیشتر (بیشتر از ۵ درصد) اتفاق می‌افتند، شاخص ASLE قابلیت آشکارسازی بهتری دارد. در [۱۹] به ازای درجات مختلفی از DSV، اندازه‌گیری‌های لازم انجام و شاخص‌های 1-MM و  $\sigma$  محاسبه شده‌اند. نتایج محاسبات نشان‌دهنده این بوده است که شاخص 1-MM عملکرد بهتری از  $\sigma$  دارد. در مرجع [۵]، ۱۱ ترانسفورماتور مختلف تحت شرایط پایانه‌ای متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته و تقریباً تمامی شاخص‌هایی که در تحقیق حاضر معرفی شده، برای آن‌ها محاسبه شده و این نتیجه حاصل شده است که تغییرات  $\sigma_s$  نسبت به  $\rho$  1- خطی‌تر است. نتایج مقاله [۵] نشان می‌دهند که شاخص‌های ED، SD، IA، SDA، ASLE، RMSE، CC، SSE، SSRE،  $\sigma_e$ ،  $\rho$ ،  $\sigma$  و SSMRE در تمامی حالت‌ها به‌درستی عیب را تشخیص می‌دهند ولی بقیه شاخص‌ها حداقل در ۱ مورد تشخیص نادرست داشته‌اند. مثلاً شاخص CD فقط در ۱ مورد و شاخص MAX در ۴ مورد نتوانسته است شدت عیب را به‌درستی تشخیص دهد. ولی شاخص‌های ID و E در خیلی از موارد، تشخیص

## ۲- ایجاد بانک اطلاعات از نتایج اندازه‌گیری‌ها

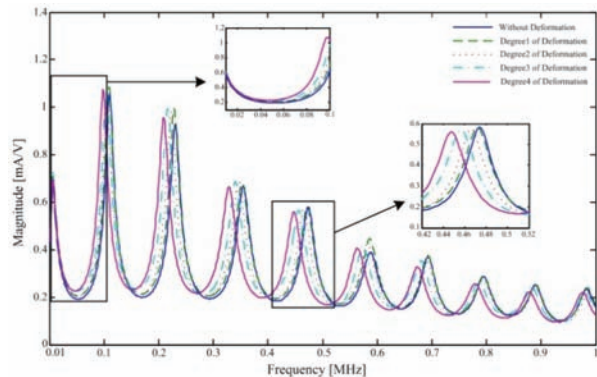
به‌منظور ارزیابی روش‌های تشخیص عیب، لازم است یک بانک اطلاعات از وضعیت حالت سالم و معیوب ترانسفورماتورها (در شدت‌های مختلفی از عیب) ایجاد شود. برای این منظور دو گروه از ترانسفورماتورها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. گروه اول از ترانسفورماتورها، از نوع ترانسفورماتورهای مدل هستند که عیوب موردنظر به صورت عمدی بر روی آن‌ها ایجاد شده است. در جدول ۱ اطلاعات کامل این ترانسفورماتورها آورده شده است. این گروه از ترانسفورماتورها با ساختارهای تقریباً مشابه مورد آزمایش قرار گرفته و بر روی هر یک از آن‌ها یکی از عیوب مورد مطالعه (AD, RD, SC, DSV) اعمال شده است. بعد از انجام اندازه‌گیری‌ها، داده‌های موردنظر به صورت فایل Text و Excel ذخیره شده و بانک اطلاعاتی موردنظر ایجاد شده است. گروه دوم، ترانسفورماتورهایی هستند که در حین کار دچار عیب شده‌اند. اطلاعات این ترانسفورماتورها در جدول (۲) نشان داده شده است.

در اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این تحقیق، از مدار شکل (۱) استفاده شده است [۱۶]. همچنین ذکر این نکته ضروری است که در مدارهای فوق به جای ولتاژ خروجی (Vt) می‌توان جریان خروجی را اندازه‌گیری نمود که در این صورت تابع تبدیل از جنس ادمیتانس خواهد بود.

شکل (۲) نتایج اندازه‌گیری بر روی تعدادی از این ترانسفورماتورها را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان‌دهنده‌ی این است که با افزایش میزان تغییرات در ساختار سیم‌پیچ به واسطه یک عیب، تغییرات ایجادشده در شکل تابع تبدیل نسبت به مقدار مرجع نیز افزایش خواهد یافت. ولی روند این تغییرات منظم نیست یعنی از روی شکل ظاهری توابع تبدیل اندازه‌گیری شده نمی‌توان تابع تبدیل حالت معیوب را با تابع تبدیل حالت سالم مقایسه کرد و در مورد نوع یا میزان عیب نتیجه‌گیری نمود. بنابراین باید روشی ارائه شود که ضمن مقایسه این توابع تبدیل، بتوان به اطلاعات دقیقی در مورد عیب نیز دست یافت.



شکل ۱: مدارهای اندازه‌گیری توابع تبدیل [۱۶]



الف- TRN 2 (۱۴-۱۳)

نادرست داشته‌اند؛ بنابراین استفاده از آن‌ها توصیه نمی‌شود. مرجع [۷] یک مقاله مروری است که به‌طور تقریب تمام روش‌هایی که برای تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های FRA تا قبل از ۲۰۱۷ چاپ شده را آورده است. جمع‌بندی کلی مرجع [۷] را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- شاخص‌های  $SSMMRE$ ،  $SSRE$ ،  $SSE$ ،  $CC$ ،  $\rho$ ،  $E[\Delta]$ ،  $SDA$ ،  $ID$ ، در برخی موارد عملکرد ناموفقی در تشخیص عیب داشته‌اند.
- سایر شاخص‌ها عملکرد موفقی داشته‌اند ولی دلایل مستند و متقنی برای استفاده از یک (یا چند) شاخص به‌خصوص در مراجع ارائه نشده است.

مرجع [۲۰] نیز مقاله مروری دیگری در زمینه FRA است که تقریباً در مورد تمام جنبه‌های FRA، شامل انواع روش‌های جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تابع تبدیل مرجع (مقایسه متکی بر زمان، مقایسه مبتنی بر ساختار و مقایسه مبتنی بر نوع)، انواع اتصالات در انجام تست FRA و انواع روش‌های تشخیص عیب بحث نموده است. در مورد شاخص‌های عددی نیز اشاره شده است که ASLE و DABS بیشتر از سایر شاخص‌ها در مراجع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مرجع [۲۱] عملکرد شاخص‌های مختلف تحت درجات مختلفی از شدت اتصال کوتاه سیم‌پیچ مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفته که عملکرد شاخص ASLE بهتر از شاخص‌های SD، DABS و CSD است.

دو شرکت معظم MEGGER و OMICRON جز سازندگان معتبر تجهیزات اندازه‌گیری FRA هستند که هر کدام از این سازندگان، نرم‌افزارهای مرتبط با FRA ارائه نموده‌اند [۲۲-۲۳]. هرچند نرم‌افزارهای این شرکت‌ها بخشی به نام تحلیل نتایج دارند ولی قابلیت اصلی این نرم‌افزارها امکان اتصال به تجهیز اندازه‌گیری است که می‌تواند داده‌های اندازه‌گیری را ذخیره نموده و نمایش دهند. تحلیل نتایج در نرم‌افزارهای این شرکت‌ها بر اساس شاخص CC صورت می‌گیرد ولی محدوده‌های تعریف شده برای این شاخص در دسترس نیست.

همان‌طور که ملاحظه گردید، تعداد شاخص‌ها بسیار زیاد است و بنابراین ممکن است که کاربر هنگام استفاده از آن‌ها سردرگم شود. متأسفانه استاندارد دقیقی وجود ندارد که کدام شاخص از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار است و هر مرجع بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌های خود، تأکید بر استفاده از شاخص خصوصی داشته است. برای رفع این نقیصه، در مقاله حاضر به ترتیب کارهای زیر انجام شده‌اند:

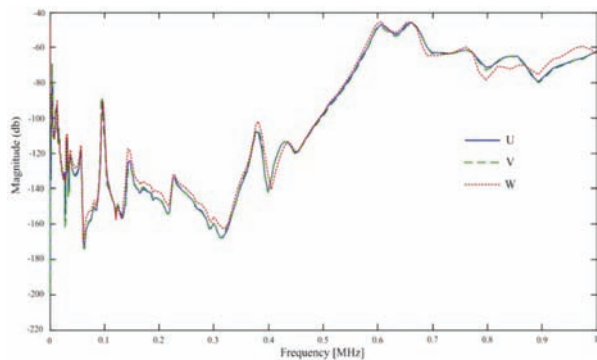
۱- گردآوری داده‌های FRA با انجام آزمایش بر روی ترانسفورماتورهای مختلف در حالت سالم و حالت‌های مختلف عیب (AD, RD, DSV, SC)

۲- معرفی شاخص‌های آماری و عددی در تحلیل نتایج FRA و محاسبه این شاخص‌ها برای نتایج اندازه‌گیری‌ها

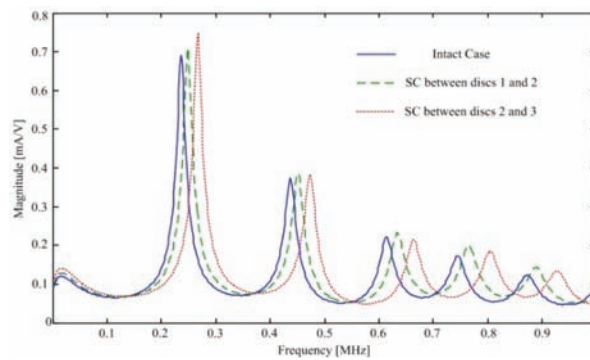
۳- معرفی روش‌های پیشنهاد شده در مراجع معتبر جهت تشخیص نوع و شدت عیب و نیز پیشنهاد یک روش جدید بر پایه ترکیب شبکه عصبی احتمالی و شاخص ED

۴- ارائه روش جدید بر پایه محدوده تغییرات شاخص CC جهت تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور در حالتی که امکان دسترسی به داده‌های تابع تبدیل مرجع وجود ندارد.

۵- برنامه‌نویسی روش‌ها و الگوریتم‌ها در محیط MATLAB و ارزیابی، بررسی کارایی و اعتبارسنجی آن‌ها



ت- TRN 8



ب- TRN 4 [۱۳-۱۴]

شکل ۲: برخی از توابع تبدیل اندازمگیری شده از ترانسفورماتورها

جدول ۱: اطلاعات ترانسفورماتورهای مدل [۱۳-۱۴]

نام ترانسفورماتور	سطح ولتاژ و توان	ساختار سیم‌پیچ	توصیف عیب
TRN 1	۱۰kV/۴۰۰V و ۶/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۶۰ جفت بشقاب ۱۳ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۴ لایه‌ی ۶۰ حلقه‌ای	جابجایی سیم‌پیچ لایه‌ای نسبت به بشقابی در ۸ مرحله و ایجاد یک سانتی‌متر جابجایی در هر مرحله
TRN 2	۱۰kV/۴۰۰V و ۶/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۶۰ جفت بشقاب ۱۳ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۴ لایه‌ی ۶۰ حلقه‌ای	تغییر شکل بشقاب‌های ششم تا ۵۴-ام به میزان هفت درصد شعاع سیم‌پیچ در ۴ مرحله (از ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ طرف سیم‌پیچ)
TRN 3	۱۰kV/۴۰۰V و ۱/۲ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۳۱ جفت بشقاب ۱۱ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۱ لایه‌ی ۲۳ حلقه‌ای	تغییر فاصله‌ی بین بشقاب‌های سیم‌پیچ سالم از ۵ mm به ۷/۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر و انجام تغییرات در ۳ محل شامل بشقاب‌های ۰.۲، ۰.۳ و ۱.۶
TRN 4	۱۰kV و MVA و ۱/۲	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۶۰ جفت بشقاب ۹ حلقه‌ای	اتصال کوتاه بین بشقاب‌های متوالی از سیم‌پیچ

جدول ۲: اطلاعات ترانسفورماتورهای واقعی

نام ترانسفورماتور	سطح ولتاژ و توان	ساختار سیم‌پیچ	توصیف عیب
TRN 5	۲۰kV/۴۰۰V و ۱ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۴۰ بشقاب ۱۷ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۲ لایه‌ی ۹ حلقه‌ای	ترانسفورماتور معیوب با نوع عیب AD و شدت بالا
TRN 6	۲۰kV/۴۰۰V و ۰/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۴۵ بشقاب ۱۳ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۲ لایه‌ی ۱۰ حلقه‌ای	ترانسفورماتور معیوب با نوع عیب DSV و شدت بالا
TRN 7	۶۳۰۰/۴۲۰V و ۲/۵ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۲۴ بشقاب ۱۲ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۴ لایه‌ی ۳۶ حلقه‌ای	ترانسفورماتور سالم که اندازه‌گیری روی هر سه فاز آن به طور مجزا انجام شده است
TRN 8	۲۰kV/۴۰۰V و ۱ MVA	سیم‌پیچ فشارقوی ساخته‌شده از ۴۰ بشقاب ۱۷ حلقه‌ای و سیم‌پیچ فشار ضعیف ساخته‌شده از ۲ لایه‌ی ۹ حلقه‌ای	ترانسفورماتور معیوب که اندازه‌گیری روی هر سه فاز آن به طور مجزا انجام شده است

### ۳- بررسی عملکرد شاخص‌ها

بعد از انجام اندازه‌گیری‌ها و به دست آوردن تابع تبدیل مرجع، باید تابع تبدیل به دست آمده از اندازه‌گیری جدید با تابع تبدیل مرجع مقایسه شود. برای این منظور از شاخص‌های عددی استفاده شده است، این شاخص‌ها در ادامه ارائه شده‌اند. در این شاخص‌ها داده‌های به دست آمده از دامنه پاسخ فرکانسی جدید با داده‌های حاصل از دامنه پاسخ فرکانسی مرجع مقایسه می‌شود. در صورتی که ترانسفورماتور سالم باشد (حالت ایده‌ال) در تمامی شاخص‌های معرفی شده،  $X=Y$  بوده و بنابراین هر کدام از شاخص‌ها دارای مقدار عددی مشخصی خواهند بود که این مقدار مشخص ۰ یا ۱ خواهد بود. به عبارت دیگر، اگر این شاخص‌ها هر مقداری غیر از این مقادیر مشخص را داشته باشند، یعنی عیبی در داخل ترانسفورماتور رخ داده است.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (X(i) - \bar{X})(Y(i) - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X(i) - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y(i) - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i), \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y(i)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N X(i)Y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X(i))^2 \sum_{i=1}^N (Y(i))^2}} \quad (14)$$

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y(i) - X(i))^2}{N} \quad (15)$$

$$SSRE = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{Y(i)}{X(i)} - 1 \right)^2}{N} \quad (16)$$

$$SSMMRE = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\max(Y(i), X(i))}{\min(Y(i), X(i))} - 1 \right)^2}{N} \quad (17)$$

$$DABS = \frac{\sum_{i=1}^N |Y(i) - X(i)|}{N} \quad (18)$$

$$MM = \frac{\sum_{i=1}^N \min(X(i), Y(i))}{\sum_{i=1}^N \max(X(i), Y(i))} \quad (19)$$

$$CSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X(i) - \bar{X}) - (Y(i) - \bar{Y})]^2}{N - 1}} \quad (20)$$

$$CSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X(i) - \bar{X}) - (Y(i) - \bar{Y})]^2}{N - 1}} \quad (20)$$

$$R_{XY} = \begin{cases} 10 & \text{if } (1 - \rho) \leq 10^{-10} \\ -\log_{10}(1 - \rho) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

در روابط فوق داریم:

X: بردار اندازه تابع تبدیل مرجع

Y: بردار اندازه تابع تبدیل جدید

X(i): عنصر نام از بردار X

Y(i): عنصر نام از بردار Y

f: بردار نمونه فرکانسی اندازه‌گیری شده

N: تعداد نمونه‌ها در یک بردار

از بین این ۲۱ شاخص، RXY شاخص مستقلی نیست و مبتنی بر شاخص است. بنابراین در این بخش، عملکرد ۲۰ شاخص دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. از بین ۴ عیب، در عیب SC هر چند حالت‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته ولی در این حالت‌ها فقط محل عیب

$$ED = \|Y - X\| = \sqrt{(Y - X)^T (Y - X)} \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y(i) - X(i))^2}{N - 1}} \quad (2)$$

$$ID = \int (Y(f) - X(f)) df \quad (3)$$

$$IA = \int |Y(f) - X(f)| df \quad (4)$$

$$SDA = \frac{\int |Y(f) - X(f)| df}{\int |X(f)| df} \quad (5)$$

$$ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N [20 \log_{10} Y(i) - 20 \log_{10} X(i)]}{N} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|Y(i)| - |X(i)|}{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X(i)| \right)} \right)^2} \quad (7)$$

$$E[\Delta] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta(i); \quad \Delta(i) = \frac{|Y(i)| - |X(i)|}{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X(i)| \right)} \quad (8)$$

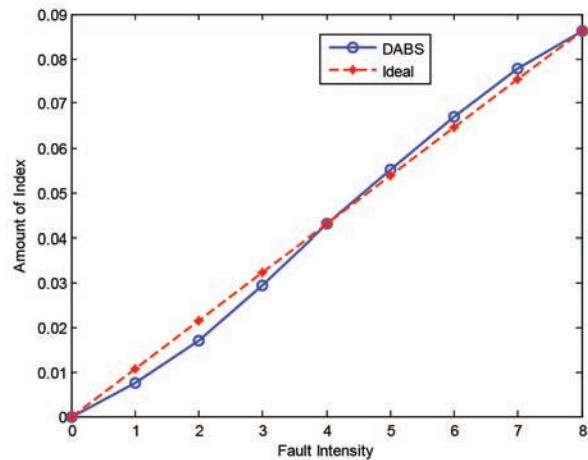
$$\sigma_e = \sqrt{\text{var}(\Delta)} = E[\Delta - E(\Delta)] \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left( \frac{X(i) - (X(i) + Y(i))/2}{(X(i) + Y(i))/2} \right)^2 + \left( \frac{Y(i) - (X(i) + Y(i))/2}{(X(i) + Y(i))/2} \right)^2} \quad (10)$$

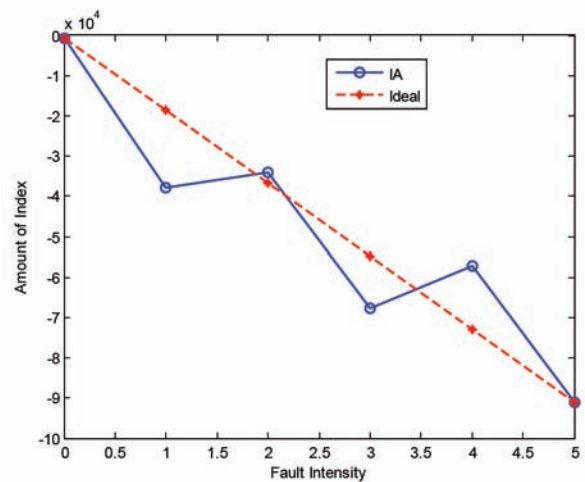
$$\sigma_s = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y(i) - X(i)}{X(i)} \right| \quad (11)$$

$$MAX = \max(Y(i) - X(i)) \quad (12)$$

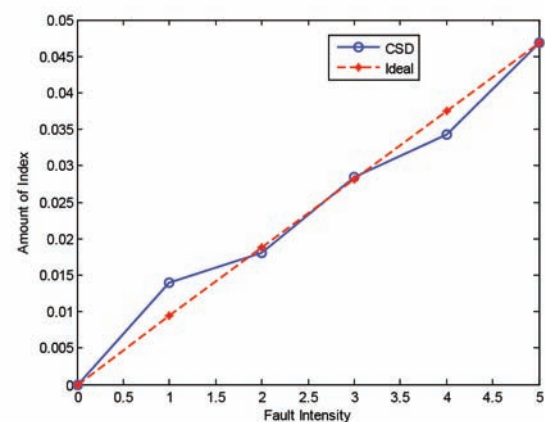
تغییر یافته و شدت عیب در همه حالت‌ها یکسان است. بنابراین عملکرد شاخص‌ها در مورد ۳ عیب AD، RD و DSV مورد بررسی قرار می‌گیرد.



الف - TRN1



ب - TRN3-S2



ج - TRN3-S2

شکل ۳: چند مورد از تغییرات شاخص‌های عددی به ازای شدت‌های مختلفی از عیب

در بررسی قابلیت اطمینان یک شاخص باید دو نکته مورد توجه قرار گیرد: اول اینکه شاخص مورد نظر باید به ازای هر درجه بخصوصی از

شدت عیب، مقدار منحصر به فردی تولید کند. به طوری که با افزایش شدت عیب، این مقدار منحصر به فرد کاهش یا افزایشی باشد. دوم اینکه میزان تغییرات شاخص به صورت خطی تغییر کند. بدیهی است که شرط اول از اهمیت بیشتری برخوردار است. در شکل (۳) چند مورد از بررسی دو معیار خطی بودن و منحصر به فرد بودن، نشان داده شده است. با توجه به اینکه حجم داده‌ها بسیار زیاد است، امکان ترسیم مقدار شاخص‌ها به ازای شدت‌های مختلفی از همه عیب‌ها وجود ندارد. اما این کار برای همه حالت‌های عیب و به ازای همه شاخص‌ها انجام شده و نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ۳ شاخص ID، E و قابل اطمینان نیستند. ولی شاخص‌های CC و CSD، در تمام حالت‌ها، تشخیص درست دارند. بقیه شاخص‌ها نیز فقط در یک مورد تشخیص نادرست داشته‌اند.

جدول ۳: توانایی شاخص‌ها در تشخیص عیب با محاسبه آن‌ها بر روی ترانسفورماتورهای مدل

ردیف	نام شاخص	TRN1	TRN2	TRN3 S2	TRN3 S4	TRN3 S16
۱	ED	T	T	F	T	T
۲	SD	T	T	F	T	T
۳	ID	T	T	F	F	F
۴	IA	T	T	F	T	T
۵	SDA	T	T	F	T	T
۶	ASLE	T	T	F	T	T
۷	RMSE	T	T	F	T	T
۸	E	T	T	F	F	F
۹	$\sigma_e$	T	T	F	F	F
۱۰	$\sigma$	T	T	F	T	T
۱۱	$\sigma_s$	T	T	F	T	T
۱۲	MAX	T	T	F	T	T
۱۳	$\rho$	T	T	T	T	T
۱۴	CC	T	T	T	T	T
۱۵	SSE	T	T	F	T	T
۱۶	SSRE	T	T	F	T	T
۱۷	SMMRE	T	T	F	T	T
۱۸	DABS	T	T	F	T	T
۱۹	MM	T	T	F	T	T
۲۰	CSD	T	T	T	T	T

(منظور از T (مخفف True) یعنی تشخیص صحیح و منظور از F (مخفف False) یعنی تشخیص نادرست)

#### ۴- روش‌های تشخیص عیب

در این مقاله مراحل پیش وضعیت ترانسفورماتور در سه مرحله به شرح زیر ارائه می‌شود:

#### ۴-۱- تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور بدون نیاز به اندازه‌گیری مرجع

در بیشتر کارهای تحقیقاتی که در زمینه تشخیص عیب به کمک FRA انجام شده است فرض بر این بوده که نتایج اندازه‌گیری تابع تبدیل حالت سالم ترانسفورماتور در دسترس است. در حالی که در بعضی از مواقع بخصوص برای ترانسفورماتورهای قدیمی این اندازه‌گیری موجود نیست. در این حالت از روش مبتنی بر ساختار متقارن استفاده می‌شود. به این صورت که تابع تبدیل ترانسفورماتور از هر سه فاز اندازه‌گیری شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود. معیاری که در این مقاله بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها پیشنهاد می‌شود این است که شاخص CC در محدوده فرکانسی 1000-20 KHz بین فازهای U-V، V-W و W-U محاسبه شود. سپس بر اساس محاسبات انجام شده اگر شاخص محاسبه‌شده بین فازها در محدوده  $CC_{UV}, CC_{VW} \text{ and } CC_{WU} < 0.9899$  باشد در این صورت عیبی در داخل ترانسفورماتور رخ داده است. لازم به ذکر است تعیین این محدوده‌ها بر اساس انجام آزمایش بر روی تعداد زیادی از ترانسفورماتورها بوده است.

#### ۴-۲- تشخیص نوع عیب

بعد از اینکه عیبی در ترانسفورماتور تشخیص داده شد، باید نوع آن تعیین شود. بنابراین در این بخش ابتدا روش شناخته شده در این زمینه بیان شده و سپس روش پیشنهادی مطرح می‌شود.

#### ۴-۲-۱- روش‌های پیشین

در مرجع [۲۴] روش جدیدی برای محاسبه شاخص‌ها جهت تشخیص نوع عیب پیشنهاد شده است. این روش، شاخص W نامیده شده است. در این روش یک پنجره با طول مشخص (WL) تعریف می‌شود. این پنجره از یک نقطه فرکانسی شروع و به یک نقطه فرکانسی دیگر ختم می‌شود و کل محدوده فرکانسی اندازه‌گیری شده را با پله‌های مطلوب اسکن می‌کند. در هر مرحله، شاخص‌ها در محدوده فرکانسی طول پنجره محاسبه و به فرکانس مرکزی پنجره اختصاص داده می‌شوند. شاخص‌های محاسبه‌شده در هر مرحله می‌توانند به عنوان یک مشخصه به منظور طبقه‌بندی عیوب استفاده شوند. تمامی شاخص‌هایی که در بخش قبلی معرفی شدند می‌توانند به کمک روش پنجره‌سازی مورد محاسبه باشند. با این حال در [۲۴]، این روش فقط بر CC اعمال شده است. بعد از محاسبه هر یک از شاخص‌ها در پنجره‌های مشخص، منحنی مقدار شاخص‌ها بر حسب فرکانس ترسیم می‌شود. این منحنی نشان می‌دهد که هر عیب، محدوده فرکانسی خصوصی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین می‌توان به لحاظ بصری بین عیوب مختلف تمایز قایل شد.

روش دیگری در مرجع [۲۵] مبتنی بر تابع همبستگی متقابل (CCF) برای تشخیص نوع عیب پیشنهاد شده است. تابع همبستگی متقابل در واقع معیاری برای تعیین نرخ تشابه بین دو تابع یا مجموعه‌ای از داده‌ها است. بعد از محاسبه مقادیر تابع همبستگی متقابل نمونه، تأخیر زمانی بین دو فرآیند می‌تواند به عنوان حداکثر قدر مطلق همبستگی متقابل تعیین شود. برای تفکیک عیوب، ابتدا تابع همبستگی متقابل برای توابع تبدیل اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. سپس بر اساس مقدار و میزان تأخیر زمانی شاخص محاسبه شده برای هر عیب نسبت به حالت سالم، عیوب مختلف از یکدیگر تفکیک می‌شوند. در این روش دیگر نیازی به تقسیم‌بندی محدوده‌های فرکانسی نیست و در عمل کل محدوده فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲-۲- روش پیشنهادی

نتایج کارهای تحقیقاتی [۱-۳] نشان می‌دهند که عیوب مکانیکی باعث تغییر پارامترهای مدل مشروح ترانسفورماتور (خازن‌ها، اندوکتانس‌ها و ...) شده و در نهایت باعث تغییر تابع تبدیل آن می‌شوند. این تحقیقات نشان می‌دهند که به‌عنوان مثال عیب AD باعث تغییر اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌ها می‌شود. در حالی که عیب RD بیشتر ظرفیت‌های خازنی را تغییر داده و تغییرات اندوکتانس ناچیز است. در حالت کلی می‌توان گفت انواع مختلفی از عیوب اثرات متفاوتی روی پارامترهای ترانسفورماتور داشته و باعث ایجاد تغییر در محدوده‌های فرکانسی مختلفی در پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده، می‌شوند. به بیان ساده، هر چند ممکن است عیب خاصی باعث تغییر در کل محدوده فرکانسی اندازه‌گیری شده شود ولی بیشتر هر یک از ۴ عیب مطالعه شده، ناحیه فرکانسی خصوصی را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهند. بر همین اصل می‌توان از تقسیم پاسخ فرکانسی به بازه‌های مختلف جهت تمایز و طبقه‌بندی عیوب استفاده نمود. بنابراین در این مقاله پیشنهاد می‌شود که پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور به ۱۰ بازه فرکانسی مساوی تقسیم شده و شاخص مورد نظر برای هر بازه محاسبه شود. بعد از محاسبه شاخص مورد نظر در هر بازه، داده‌ها به یک سیستم هوشمند تشخیص الگو اعمال می‌شوند. یکی از بهترین سیستم‌های تشخیص الگو، شبکه عصبی احتمالی (PNN) است که توانایی آن قبلاً در این زمینه به اثبات رسیده است [۱۴].

برای آموزش شبکه عصبی ابتدا باید ساختار آن (تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها) تعیین شود. در بخش ۳ مشخص شد که سه شاخص CC، CSD و قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به بقیه شاخص‌ها برخوردار هستند لذا از این شاخص‌ها به عنوان ورودی به PNN استفاده می‌شود. با توجه به اینکه چهار عیب داریم ماتریس ورودی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$I = \begin{bmatrix} Index_{1,AD_i} & Index_{1,RD_j} & Index_{1,DSV_k} & Index_{1,SC_l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Index_{10,AD_i} & Index_{10,RD_j} & Index_{10,DSV_k} & Index_{10,SC_l} \end{bmatrix}$$

خروجی شبکه یک بردار تک‌بعدی است که نوع خطا را مشخص می‌کند و می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$O = [AD_1 \dots AD_i RD_1 \dots RD_j DSV_1 \dots DSV_k SC_1 \dots SC_l]$$

به کمک داده‌های حاصل از ترانسفورماتورهای مدل می‌توان شبکه را آموزش داد و سپس با استفاده از داده‌های حاصل از ترانسفورماتورهای واقعی، شبکه آموزش‌دیده را مورد آزمایش قرار داد.

#### ۴-۳- تشخیص میزان و شدت عیب

مرحله بعدی در فرآیند تشخیص عیب سیم‌پیچ بعد از مشخص شدن نوع آن، شناسایی میزان و شدت عیب است. این نکته از آن جهت اهمیت دارد که وقتی جابجایی و تغییر شکل کوچکی در سیم‌پیچ ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد با شناسایی شدت آن در مراحل اولیه می‌توان از صدمات جبران‌ناپذیر جلوگیری کرد.

در مراجع مختلف عمدتاً شدت عیب به سه دسته: کم (Low)، متوسط (Moderate) و شدید (Severe) تقسیم‌بندی شده است. متأسفانه استاندارد متقنی برای این منظور تدوین نشده است و تنها استاندارد موجود در این زمینه استاندارد کشور چین است. بنابراین در ادامه به منظور تشخیص شدت عیب، استاندارد کشور چین و همچنین روش پیشنهادی توسط محققین، ارایه می‌شود.

#### ۴-۳-۱- استاندارد کشور چین

طبق استاندارد چینی [۲۶] ابتدا شاخص RXY در سه محدوده فرکانسی HF: 600-1000 و LF: 1-100 kHz، MF: 100-600 kHz kHz محاسبه می‌شود. سپس بر اساس جدول (۴) شدت عیب مشخص می‌شود.

جدول ۴: تشخیص شدت عیب به کمک استاندارد کشور چین [۲۶]

محدوده تغییرات $R_{XY}$	شدت عیب
$1 \leq R_{MF} < 2.0$ یا $1 \leq R_{LF} < 2$	کم (Low)
$R_{MF} < 0.6$ یا $0.6 \leq R_{LF} < 1$	متوسط (Moderate)
$R_{LF} < 0.6$	شدید (Severe)

#### ۴-۳-۲- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، ابتدا به کمک اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی ترانسفورماتورهای مدل، محدوده تغییرات شاخص‌های مختلف به ازای شدت‌های متفاوتی از عیب محاسبه می‌شود. سپس بر اساس محدوده تغییرات شاخص‌ها، شدت عیب در سه دسته کم، متوسط و شدید تقسیم‌بندی می‌شود. در جدول (۵) محدوده تغییرات برخی از شاخص‌ها آورده شده است. تمامی این محدوده‌ها به کمک دستورات شرطی در نرم‌افزار اعمال می‌شوند تا تصمیم‌گیری بر اساس آن‌ها صورت گیرد.

جدول ۵: تشخیص شدت عیب بر اساس میزان تغییرات شاخص‌های مختلف [۲۷]

ردیف	کم	متوسط	شدید
۱	$ED \leq 0.4$	$0.4 < ED \leq 0.8$	$ED > 0.8$
۲	$ASLE \leq 0.4$	$0.4 < ASLE \leq 0.8$	$ASLE > 0.8$
۳	$RMSE \leq 60 \times 10^{-5}$	$60 \times 10^{-5} < RMSE \leq 100 \times 10^{-5}$	$RMSE > 100 \times 10^{-5}$
۴	$MAX \leq 0.3$	$0.3 < MAX \leq 0.5$	$MAX > 0.5$
۵	$0.9800 \leq \rho < 0.9995$	$0.9500 < \rho \leq 0.9800$	$\rho < 0.9500$
۶	$0.9900 \leq CC < 0.9995$	$0.9900 < CC \leq 0.9700$	$CC > 0.9700$
۷	$SSE \leq 10 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4} < SSE \leq 30 \times 10^{-4}$	$SSE > 30 \times 10^{-4}$
۸	$SSRE \leq 100 \times 10^{-4}$	$100 \times 10^{-4} < SSRE \leq 500 \times 10^{-4}$	$SSRE > 500 \times 10^{-4}$
۹	$DABS \leq 0.01$	$0.01 < DABS \leq 0.015$	$DABS > 0.015$
۱۰	$MM \geq 0.96$	$0.92 < MM \leq 0.98$	$MM < 0.92$
۱۱	$CSD \leq 0.03$	$0.03 < CSD \leq 0.05$	$CSD > 0.05$

#### ۵- معرفی نرم‌افزار و مراحل انجام کار

در این بخش، برنامه محاسبه تمامی شاخص‌ها در محیط MATLAB نوشته شده و به صورت واسط کاربری گرافیکی آماده شده است. نرم‌افزار به گونه‌ای تدوین شده است که کافی است کاربر، داده‌ها را وارد نماید و با طی مراحل مختلف، به وضعیت ترانسفورماتور پی ببرد. روند تشخیص وضعیت ترانسفورماتور به گونه‌ای است که ابتدا نوع عیب و سپس شدت آن تعیین می‌شود. در شکل (۴) نمای از نرم‌افزار پایش وضعیت ترانسفورماتور به کمک FRA نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود می‌توان شاخص‌های موردنظر را در بازه‌های فرکانسی مختلف محاسبه نمود و منحنی تغییرات آن را مشاهده کرد. الگوریتم تشخیص عیب با استفاده از نرم‌افزار پیشنهادی به شرح زیر قابل بیان است:

۱- ایجاد بانک اطلاعاتی از نتایج اندازه‌گیری‌ها تحت شرایط سالم و معیوب ترانسفورماتورها

۲- معرفی ۲۲ شاخص عددی به کار گرفته شده در مراجع معتبر

۳- اعمال شاخص‌های عددی بر نتایج اندازه‌گیری‌ها و استخراج شاخص‌های قابل اطمینان

۴- استخراج مشخصه تشخیص احتمال وقوع، نوع و شدت عیب ترانسفورماتورهای مدل با استفاده از روش‌های پیشین و روش‌های پیشنهادی در این مقاله

۵- بررسی قابلیت اطمینان مشخصه‌های استخراج شده با اعمال آن‌ها بر روی ترانسفورماتورهایی که در عمل معیوب شده‌اند.

بعد از آماده‌سازی نرم‌افزار، با اعمال داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده از ترانسفورماتورهای مختلف می‌توان عملکرد نرم‌افزار را مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور از منوی Open Data گزینه Load را انتخاب می‌کنیم. حال می‌توان با انتخاب هر شاخص، میزان تغییرات آن را به ازای شدت‌های مختلف از عیب مشاهده کرد. برای مثال منحنی تغییرات شاخص ED به ازای شدت‌های مختلفی از عیب RD در شکل (۵) آورده شده است. کاربر می‌تواند تغییرات شاخص‌های مختلف در بازه‌های فرکانسی دلخواه و به ازای شدت‌ها و انواع مختلفی از عیب را مشاهده نماید و بر اساس آن تصمیم بگیرد. علاوه بر این، خود نرم‌افزار نیز این امکان را دارد که نوع عیب و شدت آن را مشخص نماید.

#### ۵-۱- تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور به کمک نرم‌افزار

از منوی Fault Detection گزینه Fault Occurrence Detection را انتخاب می‌شود. در سمت راست و در کنار شاخص‌ها، جعبه‌ای ظاهر می‌شود که سالم یا معیوب ترانسفورماتور را مشخص می‌کند.

#### ۵-۲- تشخیص نوع عیب به کمک نرم‌افزار

از منوی Fault Detection گزینه Fault Type Detection انتخاب می‌شود. کاربر برای محاسبه میزان تغییرات شاخص‌ها در بازه‌های فرکانسی مختلف می‌تواند از منویی که طبق شکل (۶) در اختیار دارد استفاده کرده و محدوده تغییرات را در بازه فرکانسی تعیین شده، مشاهده نماید. برای تشخیص نوع عیب، سه روش وجود دارد. روش اول روش پیشنهادی بر پایه PNN است. برای به‌کارگیری روش دوم کافی است کاربر گزینه Windowed Frequency Calculation را انتخاب کرده و سپس تعداد بازه‌های فرکانسی (Frequency Bands) و نیز تعداد پنجره‌ها (No of Data in Each Window) در بازه را مشخص نماید تا خروجی آن به صورت گرافیکی نمایش داده شود. این امکان نیز پیش‌بینی شده است که کاربر بتواند این محدوده‌ها را تغییر دهد.

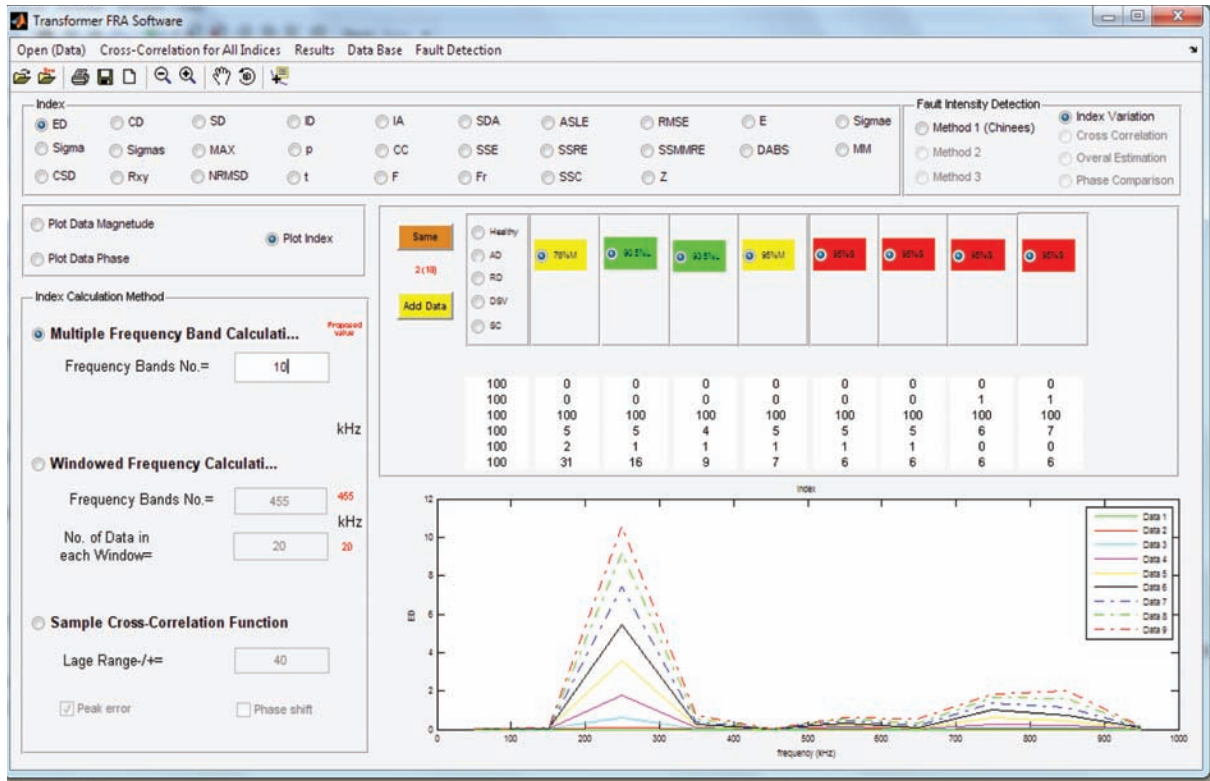
در روش سوم کاربر با انتخاب Sample Cross-Correlation Function (طبق شکل ۷) می‌تواند به صورت بصری منحنی تغییرات  $\rho$  برحسب تاخیر زمانی را مشاهده نماید. محدوده پیش‌فرض نمایش تاخیر زمانی، ۴۰ است ولی کاربر می‌تواند آن را تغییر داده و منحنی تغییرات را بازه‌های بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۴۰ مشاهده نماید.

#### ۵-۳- تشخیص میزان و شدت عیب

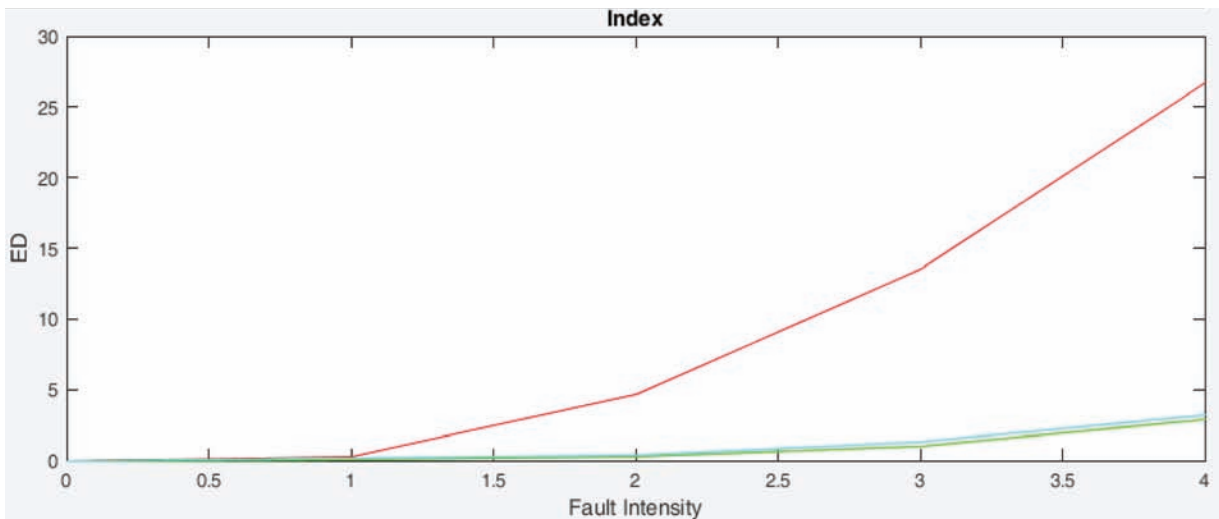
برای تشخیص شدت عیب، کاربر باید از منوی Fault Detection گزینه Fault Intensity Detection را انتخاب نماید. روش اول با نام Method1 (Chinese) و روش دوم با نام Index Variation مشخص شده است.

#### ۶- خروجی نرم‌افزار (تحلیل نتایج)

خروجی نرم‌افزار دارای سه مرحله؛ تشخیص معیوب بودن، تشخیص



شکل ۴: نمایی از نرم‌افزار طراحی شده برای پایش وضعیت ترانسفورماتور به کمک FRA



شکل ۵: یک نمونه از خروجی نرم‌افزار (تغییرات شاخص ED به ازای شدت‌های مختلفی از RD)

		MMR (new) = Max/GMax*100									
3	<	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	600	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	1000	100	25	22	24	29	31	33	36	38	

شکل ۶: محاسبه شاخص موردنظر در بازه دلخواه



نوع عیب و تشخیص شدت عیب است.

را به درستی تشخیص دهند. بنابراین می‌توانند به عنوان یک روش مطمئن در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. همچنین برنامه مربوط به محاسبه سایر روش‌های موجود در مراجع معتبر نیز در نرم‌افزار نوشته شده است که کاربر می‌تواند از آن‌ها استفاده کرده و با یکدیگر مقایسه نماید.

جدول ۷: تشخیص نوع عیب به کمک مشخصه‌های استخراج شده

روش تشخیص عیب					نوع واقعی عیب	ترانسفورماتور
PNN			CCF	WCM		
CSD	NCC	CC				
AD	AD	AD	SC	RD	AD	TRN5
DSV	DSV	DSV	DSV	DSV	DSV	TRN6

جدول ۸: تشخیص شدت عیب به کمک مشخصه‌های استخراج شده

روش پیشنهادی	استاندارد چین [۲۶]	شدت واقعی	ترانسفورماتور
1 cm: Low 2 cm: Moderate 3 to 8 cm: Severe	1 to 3 cm: Healthy 3 to 8 cm: Low	1 cm: Low 2 cm: Moderate 3 to 8 cm: Severe	TRN 1
Degree 1: Low Degrees 2 to 4: Severe	Degree 1: Healthy Degrees 2 to 4: Low	Degree 1: Low Degree 2: Moderate Degrees 3 to 4: Severe	TRN 2
Condition 1 to 3: Low Condition 4 to 5: Moderate	All Condition: Healthy	Condition 1 to 3: Low Condition 4 to 5: Moderate	TRN 3
All Condition: Severe	All Condition: Severe	All Condition: Severe	TRN 4
Severe	Low	Severe	TRN 5
Severe	-	Severe	TRN 6

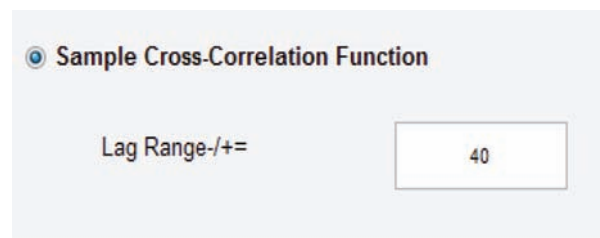
### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا با استفاده از انجام اندازه‌گیری‌های لازم بر روی ترانسفورماتورهای مختلف، توابع تبدیل مورد نیاز در حالت سالم و همچنین حالت‌های مختلف عیب (AD، RD، DSV، SC) استخراج شدند. سپس روش‌های مختلفی که در مراجع گوناگون برای مقایسه توابع تبدیل اندازه‌گیری شده در حالت‌های مختلف رخداد عیب در ترانسفورماتور نسبت به حالت سالم پیشنهاد شده است، مورد بررسی قرار گرفت و نحوه محاسبه این شاخص‌ها بیان شد. علاوه بر این، بر اساس کارهای تحقیقاتی انجام شده توسط محققین مختلف و همچنین تجربیات و تحقیقات مؤلفین، روش‌های مختلفی برای تشخیص عیب (شامل تشخیص وقوع عیب، تشخیص نوع عیب، تشخیص میزان عیب) ارائه شد. بعد از ارائه روش‌ها، برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB و به صورت گرافیکی انجام شد. برنامه نوشته شده به گونه‌ای است که کاربر به راحتی بتواند از آن استفاده کرده و در صورت لزوم تغییرات لازم را اعمال نماید. بعد

برای تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور، از بین اندازه‌گیری‌هایی که در جدول ۲ انجام شده است، اندازه‌گیری TRN7 و TRN8 بر روی فازهای مختلف از یک ترانسفورماتور انجام شده است. TRN7 مربوط به یک ترانسفورماتور سالم و TRN8 مربوط به یک ترانسفورماتور معیوب است. وقتی اندازه‌گیری مربوط به این ترانسفورماتورها به نرم‌افزار اعمال می‌شود، نرم‌افزار TRN7 را سالم و TRN8 را معیوب تشخیص می‌دهد که صحیح است.

برای تشخیص نوع عیب باید به این نکته مهم باید توجه کرد که داده‌های به دست آمده از ترانسفورماتورهای مدل صرفاً برای استخراج مشخصه استفاده می‌شود. جدول ۶ الگویی که از اعمال این روش‌ها بر ترانسفورماتورهای مدل حاصل شده را نشان می‌دهد. جدول ۷ نیز نتایج حاصل از تشخیص نوع عیب را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش‌های WCM و CCF در TRN5 تشخیص درست ندارند ولی روش پیشنهادی در هر دو مورد TRN5 و TRN6 نوع عیب را درست تشخیص داده است.

در جدول (۸) نتایج مربوط به تشخیص شدت عیب آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود استاندارد چینی [۲۶] در خیلی از موارد شدت عیب را Low تشخیص می‌دهد که صحیح نیست. روش پیشنهادی در TRN 2 فقط Degree 2 را به جای Moderate، Severe تشخیص داده است و در بقیه حالت‌ها تشخیص درستی داشته است.



شکل ۷: تشخیص نوع عیب به کمک روش تابع همبستگی متقابل

جدول ۶: استخراج مشخصه مربوط به تشخیص نوع عیب به کمک روش‌های FCC و MCW

نوع عیب	محدوده فرکانسی که در روش WCM تحت تأثیر قرار می‌گیرد	تغییرات ایجاد شده در منحنی در روش CCF
AD	۲۰۰ تا ۸۰۰ کیلوهرتز	تغییر دامنه منحنی و شیفت منحنی به سمت چپ
DSV	محدوده بالای ۶۵۰ کیلوهرتز	تغییر دامنه منحنی و بدون شیفت منحنی
RD	محدوده ۵۰ تا ۷۰۰ کیلوهرتز	بدون تغییر دامنه منحنی و شیفت منحنی به سمت چپ
SC	محدوده ۱۰۰ تا ۹۰۰ کیلوهرتز	تغییر دامنه منحنی و شیفت منحنی به سمت راست

دیده می‌شود که در مجموع روش‌های پیشنهادی با دقت بسیار خوبی (حتی در مورد ترانسفورماتورهای واقعی) توانسته‌اند نوع و شدت عیب

Absolute Difference	DABS
Minimum-Maximum ratio	MM
Comparative Standard Deviation	CSD
Spectrum Deviation	$\sigma$
Stochastic Spectrum Deviation	$\sigma_s$
Cross-Correlation Function	CCF
Probabilistic Neural Network	PNN

از اعمال داده‌های مختلف و تحلیل نتایج این نتیجه حاصل شد که مطمئن‌ترین روش برای تشخیص نوع عیب، روش پیشنهادی بر پایه ترکیب شاخص‌های CC،  $\rho$  و CSD و PNN است. در تشخیص شدت عیب، روش پیشنهادی دقت خوبی در تشخیص شدت عیب دارد ولی روش اول در برخی موارد به‌درستی شدت عیب را تعیین نمی‌کند. در حالی که مقایسه بین سه فاز از یک ترانسفورماتور (در صورت عدم دستیابی به تابع تبدیل مرجع) انجام می‌شود فقط می‌توان سالم یا معیوب بودن ترانسفورماتور را تعیین کرد که روش پیشنهادی، در این زمینه موفق عمل می‌کند.

### سپاسگزاری

این تحقیق تحت عنوان یک پروژه تحقیقاتی در شرکت برق منطقه‌ای زنجان به انجام رسیده است. بنابراین نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی شرکت برق منطقه‌ای زنجان در طول انجام تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### واژه‌های اختصاری

علامت اختصاری	توضیح
FRA	Frequency Response Analysis
DGA	Dissolved Gas Analysis
AD	Axial Displacement
RD	Radial Deformation
DSV	Disc Space Variation
SC	Short Circuit
DCS	Deformation of the Core Sheets
ED	Euclidean Distance
CD	Complex Distance
SD	Standard Deviation
ID	Integral of Difference
IA	Integral of Absolute difference
SDA	Standardized Difference Area
ASLE	Absolute Sum of Logarithmic Error
RMSE	Root Mean Square Error
MAX	Maximum of difference
CC	Correlation Coefficient
NCC or $\rho$	Normalized Correlation Coefficient
SSE	Sum Squared Error
SSRE	Sum Squared Ratio Error
SSMMRE	Sum Squared Max-Min Ratio Error

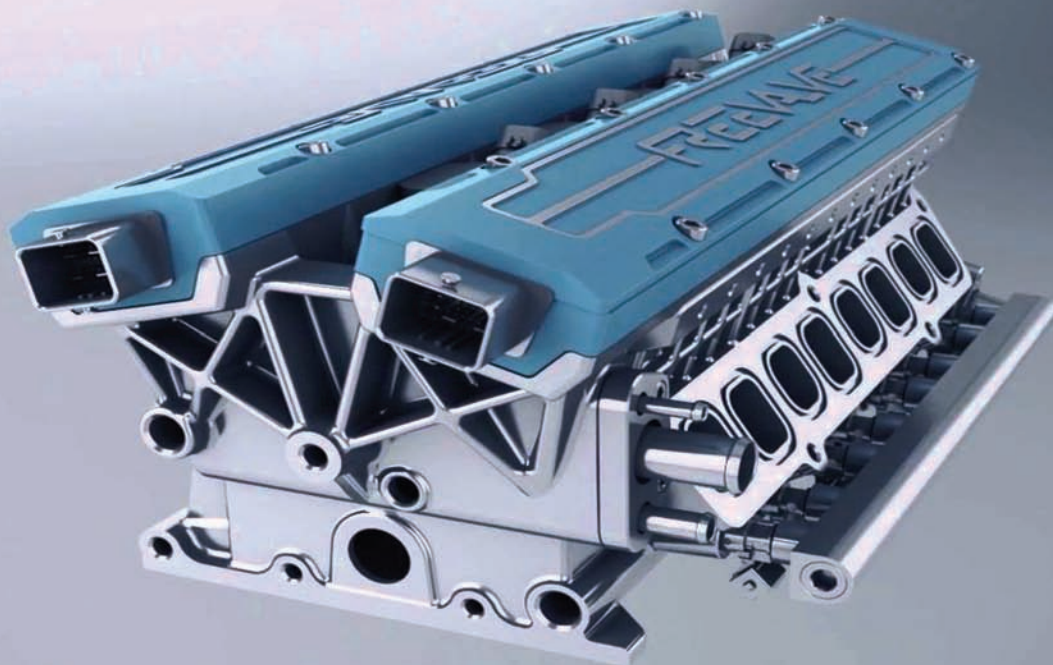
### مراجع

- [1] Rahimpour, E., Christian, J., Feser, K., and Mohseni, H.: "Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer winding", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 493-505, 2003.
- [2] Christian J., and Feser K., "Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp 214-220, 2004.
- [3] Leibfried T., and Feser K., "Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp. 1333-1341, 1999.
- [4] A. A. Devadiga, N. Harid, H. Griffiths, N. Al Sayari, B. Barakat, Sh. Jayaram, H. Ikeda, T. Koshizuka, Y. Taniguchi, "Winding Turn-to-Turn Short-Circuit Diagnosis using FRA Method: Sensitivity of Measurement Configuration", IET Science, Measurement & Technology, Vol. 13, No. 1, pp. 17-24, 2019.
- [5] Samimi, M. H., Tenbohlen, S., Shayegani Akmal, A. A., Mohseni, H., "Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 1, pp. 218-227, 2017.
- [6] Samimi, M. H., Tenbohlen, S., Shayegani Akmal, A. A., Mohseni, H., "Improving the numerical indices proposed for the FRA interpretation by including the phase response", International journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 83, pp. 585-593, 2016.
- [7] Samimi, M. H., Tenbohlen, S., "FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 89, pp. 115-125, 2017.
- [8] S. Miyazaki, M. Tahir, S. Tenbohlen, "Detection and quantitative diagnosis of axial displacement of transformer winding by frequency response analysis", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, No. 15, pp. 3493-3500, 2019.
- [9] A. Abu-Siada, M. I. Mosaad, D. Won Kim and M. F. El-Nagar, "Estimating Power Transformer High frequency Model Parameters using Frequency Response Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Early Access, 2020.
- [10] L. Satish ; B. Biswas, "Experimental Results on Estimation of Effective Inductance Associated With Winding Resonances of 1- $\phi$  and 3- $\phi$  Transformers using Measured FRA", IEEE Transactions on Power Delivery, Early Access, 2020.
- [11] B. Biswas, L. Satish, "Analytical Expressions to Link SCNF and OCNF of Transformer Windings to Their Inductances and Capacitances for 1- $\Phi$ , 3- $\Phi$  Y and  $\Delta$  Configurations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 34, No. 4, pp. 1725- 1735, 2019.

- Aug. 2015.
- [12] J. Liu, B. Cai, G. Xu, and G. Sun. "Energy Consumption Modeling and Optimization of Traction Control for High-speed Railway Trains." *Int. J. Control and Automation* 8, no. 10, pp. 109-124, 2015.
- [13] S. Su, T. Tang, X. Li, and Z. Y. Gao, "Optimization on multi-train operation in subway system," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 673-684, Apr. 2014.
- [14] J. C. Goodwin, D. I. Fletcher, and R. F. Harrison, "Multi-train trajectory optimisation to maximise rail network energy efficiency under travel-time constraints," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. f Rail Rapid Transit*, Jul. 2015.
- [15] S. Su, T. Tang, and C. Roberts, "A cooperative train control model for energy saving," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 622-631, Apr. 2015.
- [16] X. Li, H. K. Lo, "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations," *Transportation Research Part B*, vol. 64, pp. 73-89, 2014.
- [17] F. Devaux and X. Tackoen, "Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks," *Ticket to Kyoto final report*, sep. 2014.
- [18] R. Barrero, X. Tackoen and J. van Mierlo, "Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, pp. 207-225, 2010.
- [19] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 2129-2140, 2012.
- [20] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand," *Transp. Research Part C*, vol. 24, pp. 36-49, 2012.
- [21] Z. Gao, Y. Fang and D. Sun, "Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network," *J. Modern Power Systems, Clean Energy*, pp. 181-190, 2014.
- [22] R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini and R. Nejati fard, "Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line," *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 206-214, 2012.
- [23] S. de la Torre, A.J. Sánchez-Racero, J.A. Aguado, M. Reyes, and O. Martínez, "Optimal sizing of energy storage for regenerative braking in electric railway systems." *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 1492-1500, 2015.
- [24] H. Xia, H. Chen, Z. Yang, F. Lin, and B. Wang, "Optimal energy management, location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm", *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11618-11640, 2015.
- [25] F. Ciccarelli, A. Del Pizzo, and D. Iannuzzi. "Improvement of energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside lithium-ion capacitor storage." *IEEE Trans. Power Electronics* vol. 29, no. 1, pp. 275-286, 2014.
- [26] B. Wang, Z. Yang, F. Lin, and W. Zhao. "An improved genetic algorithm for optimal stationary energy storage system locating and sizing." *Energies* vol. 7, no. 10, pp. 6434-6458, 2014.
- [27] D. Iannuzzi, D. Lauria, and P. Tricoli. "Optimal design of stationary supercapacitors storage devices for light electrical transportation systems." *Optimization and Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 689-704, 2012.
- [28] Vukan R. Vuchic, *Urban transit systems and technology*. John Wiley & Sons, 2007.
- [29] S. Ahmadi, A. Dastfan, "Energy saving in urban railway using speed profile optimization," 24th Iranian Conf. Elec. Eng. (ICEE), IEEE, pp. 1076-1081, May 2016
- [12] J. Liu, Zh. Zhao, Ch. Tang, Ch. Yao, Ch. Li, and S. Islam, "Classifying Transformer Winding Deformation Fault Types and Degrees using FRA based on Support Vector Machine", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 112494-112504, 2019.
- [13] Bigdeli, M., Vakilian, M., Rahimpour, E., "Transformer Winding Faults Classification Based on Transfer Function Analysis by Support Vector Machine", *IET Electric Power Applications*, Vol. 6, No. 5, 2012.
- [14] Bigdeli, M., Vakilian, M., Rahimpour, E., "A Probabilistic Neural Network Classifier Based Method for Transformer Winding Fault Identification through its Transfer Function Measurement", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 23, No. 3, 2013.
- [15] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, *IEEE Std C57.149*, 2012.
- [16] IEC Standard on Power Transformers, Part 18: Measurement of Frequency Response, *IEC 60076-18*, 2012.
- [17] CIGRE Technical Brochure no. 342, *Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA)*, 2008.
- [18] Sardar, S., Kumar, A., Chatterjee, B., Dalai, S., "Application of Statistical Interpretation Technique for Frequency Response Analysis and Detection of Axial Displacement in Transformer Winding", *IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, 2017.
- [19] Zhang, Z. W., Yan, J. D., Tang, W. H., Guo, L. J., Tao, S. M., "Experimental Investigation of Localized Axial Winding Displacement in a High Frequency Range for Power Transformers", *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, China, 2016.
- [20] Khalili Senobari, R., Sadeh, J., Borsi, H., "Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review", *Electric Power Systems Research*, Vol. 155, pp. 172-183, 2018.
- [21] Wesley, N. Kh., Bhandari, S., Subramaniam, A., Bagheri, M., Panda, S. K., "Evaluation of Statistical Interpretation Methods for Frequency Response Analysis based Winding Fault Detection of Transformers", *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 2016.
- [22] Web Address: <https://megger.com/electrical-tester/September-2018/best-practice-for-sweep-frequency-response-analysis>
- [23] Web Address: [https://www.techrentals.com.my/pdf/products/Omicron\\_FRAnalyzer.pdf](https://www.techrentals.com.my/pdf/products/Omicron_FRAnalyzer.pdf)
- [24] Tarimoradi, H., Gharehpetian, G. B., "A Novel Calculation Method of Indices to Improve Classification of Transformer Winding Fault Type, Location and Extent", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 13, No. 4, pp. 1531-1540, 2017.
- [25] Abbasi, A. R., Mahmoudi, M. R., Avazzadeh, Z., "Diagnosis and Clustering of Power Transformer Winding Fault Types by Cross-Correlation and Clustering Analysis of FRA Results", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, No. 19, pp. 4301-4309, 2018.
- [26] The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China: Frequency response analysis on winding deformation of power transformers, *Std. DL/T911-2004*, ICS27.100, F24, Document No. 15182, 2005.
- [27] Bigdeli, M., Azizian, D., Gharehpetian, G. B., "Detection of Probability of Occurrence, Type and Severity of Faults in Transformer Using Frequency Response Analysis Based Numerical Indices", *Measurement*, Vol. 168, pp. 108322, 2021.

\*\*\*

\*\*\*



مقاله علمی-ترویجی

## کنترل کننده‌های الکترونیکی مدرن در سوپاپ‌های سیلندر خودرو

■ محمدرضا متولی کسمائی/ گروه مهندسی برق/ دانشکده فنی و مهندسی/ دانشگاه قم/ قم-ایران/ motavallireza@gmail.com

■ کریستین کونزلمان/ دکترای مهندسی برق-الکترونیک/ محقق کمپانی خودروسازی/Schwalbach/Automotive GmbH/ Xing, Schwabach/ آلمان

christian@gunselmann.de

### چکیده

یکی از روش‌های کمینه کردن مصرف مواد سوختی در خودروها، استفاده از سوپاپ‌های قابل کنترل در سیلندر است. سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی قدیمی، نمی‌توانند یک انطباق زمانی سریع بین موتور و موقعیت لحظه‌ای خودرو برقرار کنند. با کنترل جداگانه تک تک سوپاپ‌ها در سیلندر امکان انطباق کامل زمانی بین سوپاپ‌ها و حرکت آنی خودرو وجود دارد. به‌طور معمول کنترل کننده‌های با سنسور یا مشکل تکنیکی دارند و یا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیستند. از این رو تحقیقات کمپانی‌های خودروسازی به سمت سوپاپی پیش می‌رود که روش بدون سنسور را جایگزین کنند، تا از یک طرف از محاسبات طاقت فرسا به‌دور باشند و از طرف دیگر در مقابل مزاحمت‌ها، قابلیت انعطاف بیشتری داشته باشند. سوپاپ‌های مدرن که با نیروی الکترومغناطیسی کار می‌کنند به سوپاپ‌های الکترومغناطیسی معروف‌اند. آنها از دو سلف سیم‌پیچی شده با هسته فرومغناطیسی که در مقابل یکدیگر قرار دارند، تشکیل شده‌اند. این هسته فرومغناطیسی سیم‌پیچی شده، یک سیستم رزونانس الکتریکی - مکانیکی ایجاد می‌کند که زمینه حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر را فراهم می‌سازد. در این مقاله، قسمت کنترل کننده الکترونیکی سوپاپ الکترومغناطیسی، تجزیه و تحلیل، طراحی و تست می‌شود.

**کلمات کلیدی:** سوپاپ الکترومغناطیسی، هسته فرومغناطیسی، کنترل کننده الکترونیکی مدرن، رزونانس الکتریکی - مکانیکی

## Modern Electronic Controllers in Car Cylinder Valves

■ Mohammad Reza Motavalli Kasmaie/ Department of Electrical Engineering/ University of Qom/ Qom, Iran/ motavalliReza@gmail.com

■ Christian Gunselmann/ Doctor of Electronic Engineering/ Automotive researcher/ Automotive GmbH Xing, Schwabach, Germany/ christian@gunselmann.de

### Abstract

One of the ways to minimize fuel consumption in automobiles is to use cylinder-controlled valves. Traditional mechanical and hydraulic systems cannot achieve a fast time adaptation between the engine and the instantaneous position of the vehicle. With the separate control of each valve in the cylinder, it is possible to fully adjust the timing between the valves and instantaneous movement of the car. Sensor controllers usually have either a technical problem or are not economically viable. So the research of car companies is moving towards replacing the sensorless approach, to avoid overwhelming computation on the one hand, and to be more flexible against interference, on the other. Modern

valves that work with electromagnetic force are known as electromagnetic valves. They are composed of two coiled inductors with a ferromagnetic core facing each other. This coiled ferromagnetic core creates an electrical-mechanical resonance system that provides the ground for the valves to move in the cylinder. In this article, the electronic controller part of the electromagnetic valve is analyzed, designed, and tested.

**Keywords:** Electromagnetic valve, ferromagnetic core, modern electronic controller, electrical - mechanical resonance

## ۱-مقدمه

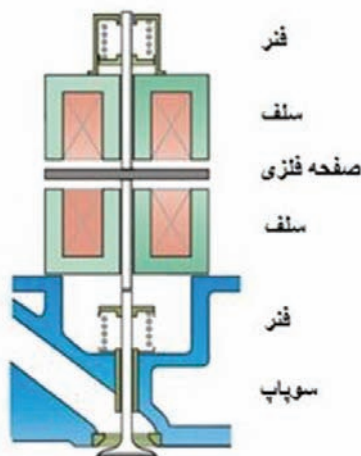
به علت گرانی حامل‌های سوخت نظیر بنزین، گاز و غیره و نیز جهت تدابیر حمایتی از محیط زیست، کاهش مصارف سوختی از اولیتهای اول کمپانی‌های بزرگ خودروسازی جهان بشمار می‌رود. موتورهای هوشمند که می‌توانند مواد سوختی را به‌طور هوشمند تغذیه کنند و یا تنظیم هوشمند زمان احتراق سیلندر را انجام دهند، یکی از راه‌های حل مشکل عنوان شده می‌باشد. یکی از پتانسیل‌های ناشناخته دیگر در کاهش مصرف مواد سوختی، استفاده از کنترل الکترونیکی حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر است. در سال‌های اخیر توجه و علاقه شرکت‌های خودروسازی به تحقیق در این‌گونه سوپاپ‌ها و استفاده بهینه از آنها بیشتر شده است [۱-۴]. سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی قدیمی فقط می‌توانند تا اندازه‌ای کنترل حرکت زمانی سوپاپ‌ها را اجازه دهند. به عبارت دیگر، اینها می‌توانند فقط یک کنترل محدود زمانی سوپاپ‌ها را باعث شوند. یک طرح چند منظوره، برای کنترل کامل الکترونیکی حرکت سوپاپ‌ها، استفاده از سوپاپ‌های الکترومغناطیسی است [۵-۶]. طرح مذکور طرح خیلی جدیدی نیست، اما از آنجایی که سرعت فرود بالای سوپاپ‌ها، باعث سر و صدای زیاد و کاهش عمر مفید آنها می‌شود، توسعه عملی و کاربردی آن امکان پذیر نبوده است. استفاده از سنسور برای تنظیم حرکت سوپاپ‌ها نیز به علت ارتعاشات زیاد موتور و نوسانات بالای دمایی عملی نیست [۷]. با توجه به نکات ذکر شده، انگیزه به خدمت گرفتن روشی بدون سنسور، با حذف معایب فوق بوجود آمد. در این مقاله، یک کنترلگر بدون سنسور معرفی می‌شود که برای کنترل حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر، اطلاعات لازم را از چرخه جریان «سلف محرک سوپاپ» اخذ می‌کند. در این حالت نه تنها از سنسور صرفه جویی می‌شود بلکه می‌توان به وسیله انتخاب درست الگوریتم کنترلی، از هزینه زیاد محاسبات نیز کاست. زمان باز و بسته شدن سوپاپ‌ها در سیلندر می‌تواند طوری تنظیم شود که توان خروجی موتور بیشینه شود.

مهمترین فوائد سوپاپ‌های متغیر قابل کنترل در سیلندر را می‌توان در سه عبارت عنوان کرد. الف) مصرف بهینه انرژی. با سوپاپ‌های قابل کنترل الکترونیکی، توان خروجی موتور می‌تواند حتی تا ۵۰٪ افزایش و در مقابل اتلاف انرژی، تا ۵٪ کاهش یابد [۸-۱۰].

ب) رفتار بهینه موتور هنگام روشن و خاموش شدن خودرو. با کنترل الکترونیکی سوپاپ‌های ورودی و خروجی سیلندر، انتشار هیدروکربن در هنگام روشن شدن موتور، می‌تواند تا ۶۰٪ کمتر شود [۱۱-۱۴]. همچنین می‌توان سیلندر‌ها را جداگانه و به‌طور مجزا از همدیگر خاموش کرد (در موتورهای چند سیلندر). بدین ترتیب خاموش شدن سیلندر می‌تواند به‌طور تعویضی تغییر کند که در نتیجه باعث انتشار یکنواخت حرارت در موتور می‌گردد. ج) خروج قابل کنترل گازهای متراکم از سیلندر. به وسیله کنترل الکترونیکی سوپاپ‌های خروجی سیلندر، خروج مواد سوختی متراکم از سیلندر هدفدار انجام می‌گیرد. بدین وسیله تاثیر ترمز موتور افزایش می‌یابد و بدین ترتیب دیگر به نیروی متداول اضافی برای ترمز کردن در خودروها احتیاج نیست.

## ۲-اساس کار

اساس کار سوپاپ که با نیروی الکترومغناطیسی کار می‌کند، بر نوسان یک صفحه فلزی استوار شده که بین دو سلف الکترومغناطیسی حرکت می‌کند. به عبارت دیگر محرک الکترومغناطیسی بر اساس قانون القای الکترومغناطیسی، یک سیستم رزونانس الکتریکی - مکانیکی تولید می‌کند. دو سلف مقابل به یکدیگر، که بر روی یک هسته فرومغناطیسی سیم پیچی شده‌اند، این محرک الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). بر روی محور مرکزی این دو سلف (جهت Y)، یک صفحه فلزی قرار دارد که می‌تواند آزادانه بین آنها (در جهت محور) حرکت کند. هنگام عبور جریان الکتریکی از سلف‌ها، شار الکترومغناطیسی عبور کننده و در نتیجه نیروی مغناطیسی بوجود آمده، باعث کشاندن صفحه فلزی به آن سمت می‌شود. حرکت صفحه فلزی مستقیماً به وسیله یک میله به سوپاپ‌ها منتقل می‌شود. استفاده از این چنین سوپاپ الکترومغناطیسی، به علت نبود سیستم هیدرولیکی باعث کاهش چشمگیر هزینه‌ها می‌شود. اگر هر دو سوپاپ ورودی و خروجی هر سیلندر و در نتیجه همه سیلندرهای یک موتور جداگانه از هم، قابل کنترل باشند می‌توان به‌طور کامل از امتیاز زمانی سوپاپ‌ها، برای کنترل بهینه خودرو بهره جست [۱۵-۱۷]. به علت جریان الکتریکی زیادی که احتیاج است تا صفحه فلزی را از موقعیتی به موقعیت دیگر حرکت دهد، دو فنر در بالا و پایین سلف‌ها جهت حمایت از حرکت صفحه فلزی، تعبیه شده است. فنرها طوری تعبیه شده‌اند که صفحه فلزی در حالت سکون، در وسط دو سلف قرار گیرد. هنگامی که صفحه فلزی در یکی از دو موقعیت بالایی و یا پایینی قرار می‌گیرد، جریان الکتریکی بین ۲ تا ۳ آمپر احتیاج است تا آن را در این موقعیت نگه دارد [۱۸-۱۹].



شکل ۱: سوپاپ الکترومغناطیسی

هنگامی که جریان الکتریکی قطع شود، صفحه فلزی ابتدا فقط به وسیله نیروی فنر به سمت دیگر شتاب می‌گیرد. به علت اتلاف انرژی موجود در سیستم، صفحه فلزی نمی‌تواند به‌طور کامل و فقط با نیروی فنر به طرف دیگر آورده شود. فقدان انرژی که احتیاج است

الکترومغناطیسی واقعی و ارزیابی عددی آنها ارتباط برقرار می‌شود. این کار توسط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است. این نرم‌افزار به کمک بعضی از توابع تعریف شده خود، امکان بررسی سیگنال‌ها را بصورت عددی فراهم می‌سازد. به‌وسیله این روش هم می‌توان ارتباط پارامترهای الکتریکی همچون جریان، ولتاژ و غیره را با پارامترهای مکانیکی همچون نیرو به‌دست آورد (از طریق محاسبه پارامترهای الکتریکی، پارامترهای مکانیکی سوپاپ به‌دست می‌آیند). این روش بهترین مدل را برای رفتار واقعی سوپاپ الکترومغناطیسی می‌دهد. بر اساس این مدل، رفتار الکتریکی سوپاپ و کنترل‌کننده الکترونیکی آن طراحی و ساخته شده است. شکل (۲) شمای کلی از سلف مدل حاصله هسته آهنی پایینی شکل (۱) را نشان می‌دهد.

#### ۴- رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی ایده‌آل

سوپاپ مغناطیسی یک سیستم مغناطیسی - مکانیکی است که به علت پدیده‌هایی همچون هیستریزس و اشباع، رفتار در شکل تحلیلی آن فقط به‌طور تقریبی قابل توجیح است. برای درک بهتر موضوع، رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی را می‌توان از سه منظر جداگانه الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی بررسی کرد که بدین وسیله موقعیت کل سیستم سوپاپ و در نتیجه رفتار مدار کنترل‌کننده الکترونیکی آن را می‌توان به‌درستی استنتاج و پیاده سازی کرد.

#### الف) رفتار الکتریکی

رفتار الکتریکی سوپاپ الکترومغناطیسی را می‌توان به‌وسیله مکان و سرعت صفحه فلزی آن (شکل ۱) که وابسته به مقدار اندوکتانس،  $L$  سلف آن است، توصیف کرد. از لحاظ ریاضی ارتباط بین ولتاژ اندوکتانس سوپاپ،  $V_L(t)$  و شار مغناطیسی سلف عبارت است از:

$$V_L(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1,4)$$

با  $N$  به عنوان تعداد سیم پیچ‌های سوپاپ  $\phi(t)$  به عنوان شار مغناطیسی عبوری از سلف سوپاپ

شار مغناطیسی به‌طور مستقیم به جریان  $I(t)$  و مکان صفحه فلزی وابسته است که در نتیجه ارتباط بین ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی نتیجه می‌شود.

برای تعیین رفتار الکتریکی سوپاپ الکترومغناطیسی تغییرات ولتاژ و جریان یکی از سلف‌های آن در موقعیت‌های مختلف مکانی بر حسب زمان بررسی و اندازه‌گیری شد. برای این اندازه‌گیری از مدار شکل (۳) استفاده شده است. برای سیگنال ورودی از یک منبع پالسی استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری جریان عبوری از سوپاپ از مقاومت اندازه‌گیری،  $R_M$  استفاده شده که برای جلوگیری از اتلاف انرژی،

تا صفحه فلزی را به‌طور کامل به سمت دیگر حرکت دهد، در فرم یک انرژی الکتریکی به سلف سوپاپ داده می‌شود. تزریق این انرژی الکتریکی به وسیله یک کنترل‌کننده الکترونیکی انجام می‌گیرد. در هنگام نوسان صفحه فلزی، یک جریان ثابت به سلف‌های سوپاپ الکترومغناطیسی تزریق می‌شود. اما برای فائق آمدن بر اتلاف انرژی و نیز نگه داشتن صفحه فلزی در موقعیت اوج بالایی یا پایینی، جریان زیادی احتیاج است. از اینرو دو جریان متفاوت برای حرکت صفحه فلزی استفاده می‌شود: جریان تقریباً بزرگ،  $I_H$ ، ۶ تا ۸ آمپر برای گیرانداختن صفحه فلزی و جریان تقریباً کوچک،  $I_L$ ، ۲ تا ۴ آمپر برای نگهداشتن آن [۲۰]. از آنجایی که ماده فرومغناطیسی استفاده شده یک رفتار غیرخطی شدید (رفتار هستریزس و یا حالت اشباع) را از خود نشان می‌دهد، یک تحلیل کامل برای رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی امکان‌پذیر نمی‌باشد، بلکه فقط یک تحلیل تقریبی برای آن میسر است [۲۱].

#### ۳- مدل سوپاپ الکترومغناطیسی

برای درست کردن مدل سوپاپ از سه روش زیر استفاده شده است:

#### الف) مدل فیزیکی

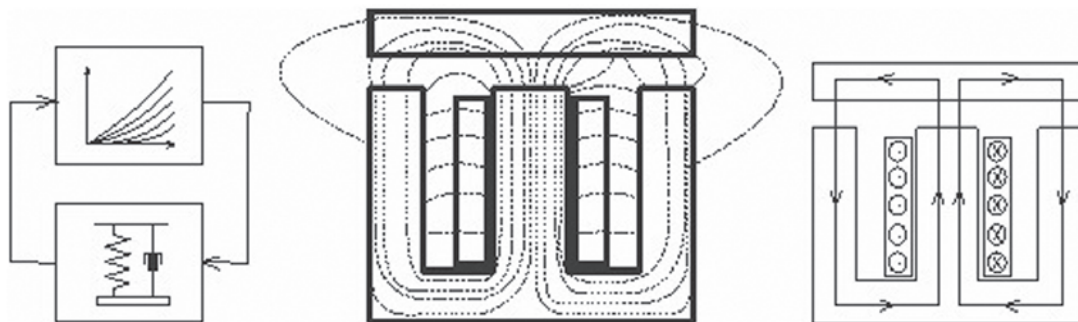
در این روش مدل سوپاپ الکترومغناطیسی به‌وسیله محاسبه حلقه‌های مغناطیسی که از توزیع هندسی میدان هسته آهنی بوجود می‌آید، درست می‌شود. از آنجایی که هسته آهنی از مواد فرومغناطیسی تشکیل شده که ذاتاً غیرخطی اند، از این‌رو خطای مدل درست شده قابل ملاحظه بوده و در نتیجه استفاده از مدل فیزیکی روش مناسبی نیست.

#### ب) استفاده از نرم‌افزار ANSYS

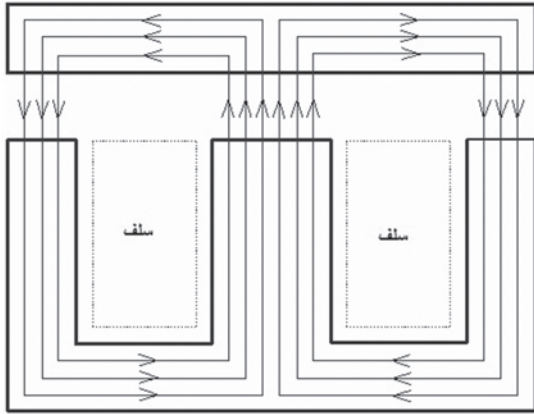
این نرم‌افزار توانایی محاسبات دما، میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و همچنین محاسبات مکانیکی را با توجه به طبیعت غیرخطی و غیرمتقارن مواد دارد. به‌عبارت دیگر با این نرم‌افزار محاسبه میدان‌های مواد غیر خطی و نیز پدیده پراگندگی میدان امکان‌پذیر است، بنابراین محاسبات توزیع میدان‌ها در مدل فراهم می‌شود. ارزیابی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به واسطه محاسبات معادلات ماکسول در این نرم‌افزار انجام می‌گیرد. با استفاده از محاسبات توزیع میدان‌ها، محاسبه پارامترهای دیگر همچون بزرگی نیروهای وارد شده بر سوپاپ و غیره که پارامترهای مکانیکی می‌باشند، نیز ممکن می‌شود [۵،۱۷].

#### ج) استفاده از تحلیل عددی

در تحلیل عددی ارزیابی مقایسه اندازه‌گیری شده امکان‌پذیر می‌باشد، از این‌رو در این روش بین مقادیر اندازه‌گیری‌های سوپاپ



شکل ۲: روش‌های مدل سوپاپ الکترومغناطیسی، الف) مدل فیزیکی، ب) استفاده از نرم‌افزار ANSYS، ج) تحلیل عددی

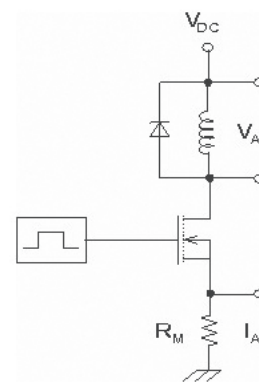


شکل ۵: خطوط میدان ایده ال برای مدل یک سوپاپ الکترومغناطیسی

مقدار آن در محدوده میلی اهم می باشد. با روشن شدن مدار، تمام ولتاژ منبع مستقیم،  $V_{DC}$ ، به طور تقریبی در سوپاپ الکترومغناطیسی ظاهر می شود و جریان در لحظه روشن شدن بر اساس رابطه:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{V}{L} \quad (4-2)$$

به طور ضعیفی افزایش می یابد، چرا که مقدار اندوکتانس،  $L$ ، در ابتدا بزرگ است. از آنجایی که بعد از مدت زمان کوتاهی مواد مغناطیسی موجود در آن سمت اشباع میل می کند، لذا افزایش جریان کم کم بیشتر می شود (مقدار اندوکتانس کاهش می یابد). برای  $t \rightarrow \infty$ ، جریان عبوری از سوپاپ به وسیله مجموع مقاومت ها،  $R_T$  (مقاومت های سیم پیچ بکار رفته، مقاومت اندوکتانس،  $R_A$ ، مقاومت  $R_M$  و غیره) محدود می شود ( $I_{MA} = \frac{V_A}{R_T} \approx \frac{V_A}{R_A}$ ). تغییرات زمانی ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳: مدار اندازه گیری ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی

برای حلقه های مغناطیسی شکل (۵)، ولتاژ مغناطیسی،  $V_{mag}(t)$ ، را می توان بر حسب جریان عبوری،  $I(t)$ ، نوشت، یعنی:

$$V_{mag}(t) = NI(t) \quad (4-3)$$

شار مغناطیسی عبوری از صفحه فلزی بر اساس رفرنس [۲۳] تعیین می شود:

$$\phi(t) = \frac{NI(t)}{\frac{2l_L(t)}{\mu_0 A} + R_F} \quad (4-4)$$

با

$\mu_0$  به عنوان نفوذپذیری هوا  
 $A$  به عنوان سطح هسته آهنی

$R_F$  به عنوان مقاومت مغناطیسی هسته آهنی و صفحه فلزی  
 $l_L(t)$  به عنوان طول شکاف هوایی بین هسته و صفحه فلزی  
 برای فواصلی که مقاومت مغناطیسی هسته آهنی و صفحه فلزی در مقابل طول شکاف هوایی کوچک باشد، رابطه ۴-۴ تبدیل می شود به:

$$\phi(t) = \frac{NI(t)}{\frac{2l_L(t)}{\mu_0 A}} \quad (4-5)$$

برای نیروی مغناطیسی که با آن صفحه فلزی سوپاپ الکترومغناطیسی کشیده می شود، در نتیجه می توان نوشت:

$$F_{mag} = \frac{\phi(t)^2}{\mu_0 A} \quad (4-6)$$

### ج) رفتار مکانیکی

رفتار مکانیکی سیستم سوپاپ مغناطیسی به وسیله نیروی  $F_F(t)$  که از طریق اعمال فنرهایی بر روی صفحه فلزی حاصل می شود، قابل تعیین است (شکل ۱) که متناسب با موقعیت صفحه فلزی است [۲۲]:

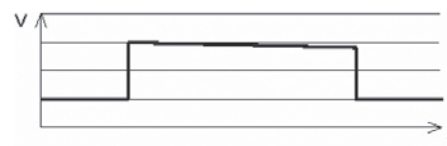
$$F_F(t) = -K_F \cdot S(t) \quad (4-7)$$

با

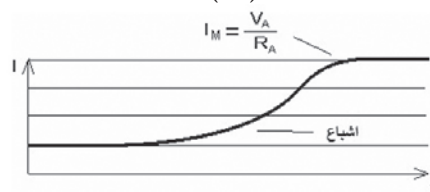
$S(t)$  به عنوان موقعیت صفحه فلزی نسبت به محل مرکزی  
 $K_F$  به عنوان ثابت فنر

### ۵- کنترل سوپاپ الکترومغناطیسی

وظیفه اصلی واحد کنترل کننده الکترونیکی، تغذیه جریان های الکتریکی از قبل تعریف شده و مشخص در زمان های معین، در سلف های سوپاپ الکترومغناطیسی است. برای این مهم می توان از



(الف)



(ب)

شکل ۴: مقادیر اندازه گیری های مورد انتظار سوپاپ الکترومغناطیسی.

(الف) ولتاژ، (ب) جریان

### ب) رفتار مغناطیسی

برای مقادیر بزرگ جریان و میدان مغناطیسی،  $H$ ، هسته آهنی سوپاپ الکترومغناطیسی به طور کامل اشباع (ناحیه به طور کامل غیرخطی) می شود. همچنین تغییرات مکانی صفحه فلزی در سوپاپ پدیده میدان پراکندهگی اضافی ایجاد می کند که می تواند بر رفتار الکتریکی و مغناطیسی سیستم تاثیر بگذارد. برای محاسبه رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی ایده ال، خطوط میدان مغناطیسی همچون شکل (۵) در نظر گرفته شده است [۲۲].

تنظیم کننده (regulator) خطی و یا تنظیم کننده کلیدی استفاده کرد. برای تحقق یک تنظیم کننده خطی بر اساس شکل ۶ ترانزیستور T چنان هدایت می شود که افت ولتاژ دو سر مقاومت،  $R_M$  به علت جریان عبوری، I از سلف سوپاپ، متناسب با  $V_C$  باشد. اما این مدار عیب بزرگی دارد و آن اینکه در حالت جریان ثابت عبوری از سلف،  $L_A$ ، افت ولتاژ دو سر آن به سمت صفر میل می کند و برای مقادیر کوچک  $R_A$  (مقاومت اندوکتانس سلف سوپاپ الکترومغناطیسی) و  $R_M$  (مقاومت لازم جهت اندازه گیری جریان عبوری از سلف سوپاپ الکترومغناطیسی) تقریباً کل ولتاژ منبع تغذیه مستقیم،  $V_{DC}$  در ترانزیستور T ظاهر می شود ( $V_D$  در عمل حدود ۴۲ ولت می باشد). در نتیجه اتلاف انرژی قابل ملاحظه ای در ترانزیستور بوجود می آید که هزینه های خنک کردن ترانزیستور و کاهش بازدهی را به دنبال خواهد داشت.

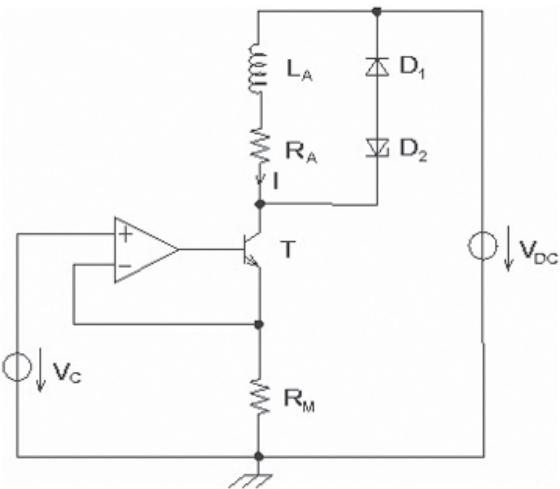
مدار شکل (۷) به طور کلی می تواند در سه حالت مختلف کار کند: الف) اگر هر دو ترانزیستور  $T_1$  و  $T_2$  روشن باشند. در این حالت جریان عبوری را از بالا به سمت پایین یعنی ترانزیستور،  $T_1$ ، اندوکتانس  $L_A$ ، مقاومت  $R_M$  و ترانزیستور،  $T_2$ ، داریم. هنگام روشن شدن مدار جریان به وسیله  $L_A$ ، افزایش می یابد. شیب افزایش جریان  $(\frac{dI(t)}{dt})$  با توجه به ناچیز بودن مقاومت  $R_M$  به وسیله رابطه زیر مشخص می شود:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{V_{DC} - R_A I(t)}{L_A(t)} \quad (5-1)$$

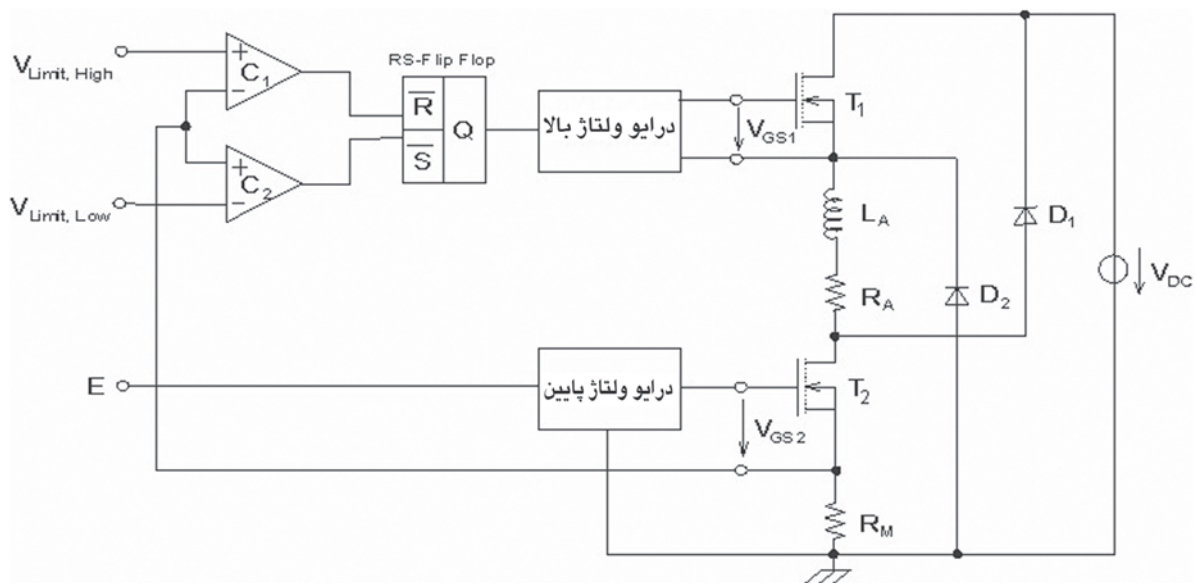
به عنوان اندوکتانس وابسته به زمان سوپاپ الکترومغناطیسی و  $V_{DC}$  در ابتدا وابسته به زمان در نظر گرفته می شود. اگر ترانزیستور  $T_1$  و یا  $T_2$  خاموش نشوند، در نتیجه جریان در محدوده حد خودش افزایش می یابد.

$$I_M = \frac{V_{DC}}{R_A} \quad (5-2)$$

ب) ترانزیستور  $T_2$  روشن و ترانزیستور  $T_1$  خاموش باشد. جریان عبوری از سلف سوپاپ و از طریق مقاومت  $R_A$ ، ترانزیستور  $T_2$ ، مقاومت  $R_M$  و دیود  $D_2$  دوباره به سلف سوپاپ بر می گردد. از آنجایی که اتلاف انرژی در این حالت ناچیز است، جریان الکتریکی به طور آهسته کاهش پیدا می کند.



شکل ۶: مدار کنترل کننده سوپاپ الکترومغناطیسی بر اساس تنظیم کننده خطی بنابراین ساختار مدار شکل (۷) که بر اساس تنظیم کننده کلیدی (حالت قطع و وصل) کار می کند. انتخاب شده است. در مدار شکل (۷) ترانزیستور،  $T_2$  به وسیله سیگنال E روشن می شود و در نتیجه جریان سوپاپ I از مقاومت،  $R_M$ ، عبور می کند. افت ولتاژ دو سر مقاومت  $R_M$

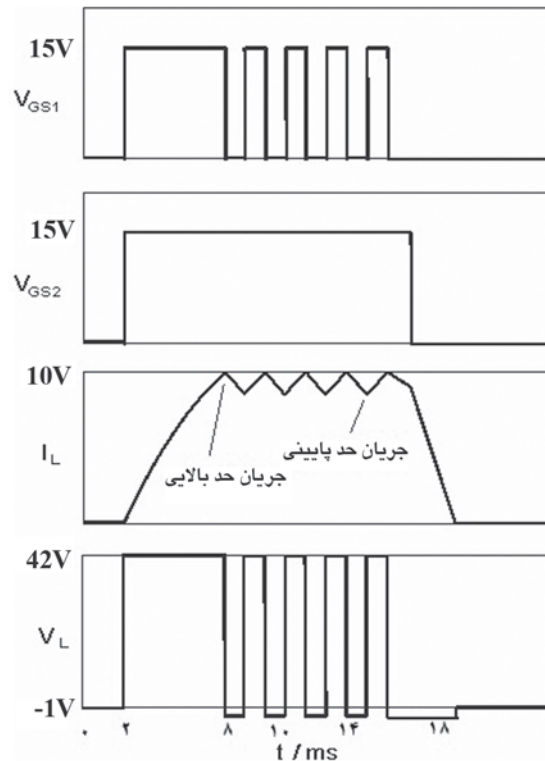


شکل ۷: مدار کنترل کننده سوپاپ الکترومغناطیسی بر اساس تنظیم کننده کلیدی



پ) هیچ کدام از ترانزیستورهای  $T_1$  و  $T_2$  روشن نباشند. جریان عبوری از سلف به وسیله دیودهای  $D_1$  و  $D_2$  به منبع ولتاژ، برمی گردد و به عبارت دیگر انرژی ذخیره شده در سلف سوپاپ به منبع ولتاژ برمی گردد و در نتیجه جریان الکتریکی خیلی سریع کاهش می یابد.

شکل (۸) نمونه‌ای از جریان عبوری و ولتاژ دو سر سلف سوپاپ الکترومغناطیسی با سیگنال‌های کنترل کننده ترانزیستورهای  $T_1$  و  $T_2$  را نشان می دهد. برای تنظیم جریان الکتریکی، ابتدا هر دو ترانزیستور روشن اند. شیب جریان الکتریکی در ابتدا به طور خطی افزایش می یابد. همین که جریان الکتریکی از حد مجاز بالایی تجاوز کند، حالت (ب) یعنی کاهش جریان اتفاق می افتد. جریان الکتریکی در حالت ایده‌ال، مقدار لحظه‌ای خود را حفظ می کند که به علت اتلاف انرژی الکتریکی در این حالت به صورت نمایی با ثابت زمانی بزرگ، کاهش پیدا می کند. بعد از تغییر کاهش جریان مدت زمانی سپری خواهد شد تا جریان الکتریکی به حد مجاز پایینی خود برسد. در این هنگام دوباره ترانزیستور  $T_1$  روشن می شود. ترانزیستور  $T_2$  همیشه روشن است و فقط وقتی خاموش می شود که جریان عبوری از سلف سوپاپ و دیودهای  $D_1$  و  $D_2$  سریع کاهش پیدا کند.



شکل ۸: نمودار جریان و ولتاژ سلف و سیگنال‌های هدایت کننده ترانزیستورهای  $T_1$  و  $T_2$

ولتاژ دو سر سلف  $L_A$  در حالت کاهش جریان، بسیار کوچک است (تقریباً یک ولت) چرا که ولتاژ دو سر سلف در این حالت تقریباً برابر با ولتاژ دو سر دیود  $D_2$  می باشد (افت ولتاژ مقاومت‌های  $R_A$  و  $R_M$  ناچیز است). توجه شود که شیب کاهش جریان الکتریکی در مقایسه با شیب افزایش جریان الکتریکی کوچک است. از آنجایی که ترانزیستور  $T_1$  در فواصل معین روشن و خاموش می شود، جریان و در نتیجه ولتاژ الکتریکی سلف سوپاپ بین دو مقدار مجاز بالایی و پایینی

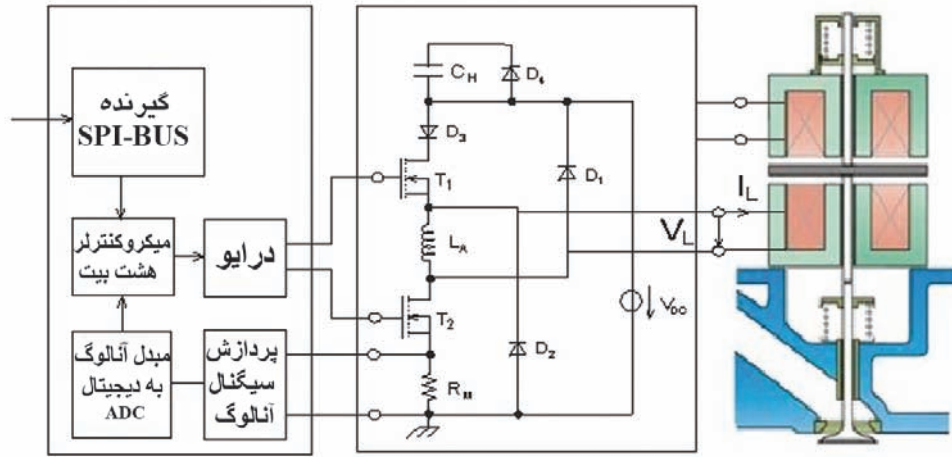
مورد نظر، به طور ثابت نگه داشته می شود. به عبارت دیگر مدار بین دو حالت پیشینه و کمینه جریان تغییر وضعیت می دهد تا جریان و ولتاژ الکتریکی سلف در محدوده مجاز حد وسط باقی بمانند. جریان الکتریکی از زمان تغذیه انرژی افزایش می یابد، از این زمان به بعد، صفحه فلزی شروع به حرکت می کند. در ابتدا شیب جریان الکتریکی مثبت است. اتلاف انرژی الکتریکی نیز در این حالت مثبت است. در حالت کاهش جریان (حالت ب)، شیب جریان الکتریکی منفی است. پس در این حالت برای حاصل ضرب ولتاژ و جریان سلف، یک مقدار منفی ظاهر می شود. به عبارت دیگر مدار از شبکه هیچ انرژی دریافت نمی کند. از اینرو برای محاسبه انرژی داده شده، باید مداری طراحی شود که در حالت کاهش جریان انرژی را روی صفر تنظیم کند.

شکل (۹) نحوه ارتباط مدار کنترل کننده الکترونیکی (شکل ۷) را به واحد تولیدکننده سیگنال‌های جریان، جهت هدایت سوپاپ الکترومغناطیسی نشان می دهد. بعد از پردازش آنالوگ سیگنال‌های ورودی، آنها به واحد میکروکنترلر عرضه می شوند. واحد میکروکنترلر سپس سیگنال‌های مورد نظر را بر طبق الگوریتم کنترل در خواستی تولید می کند که به کمک درایور به ترانزیستورهای قدرت (و جهت روشن و خاموش کردن آنها) عرضه می شود و بدین ترتیب سیگنال‌های جریان مورد نظر در سوپاپ الکترومغناطیسی تولید می شود.

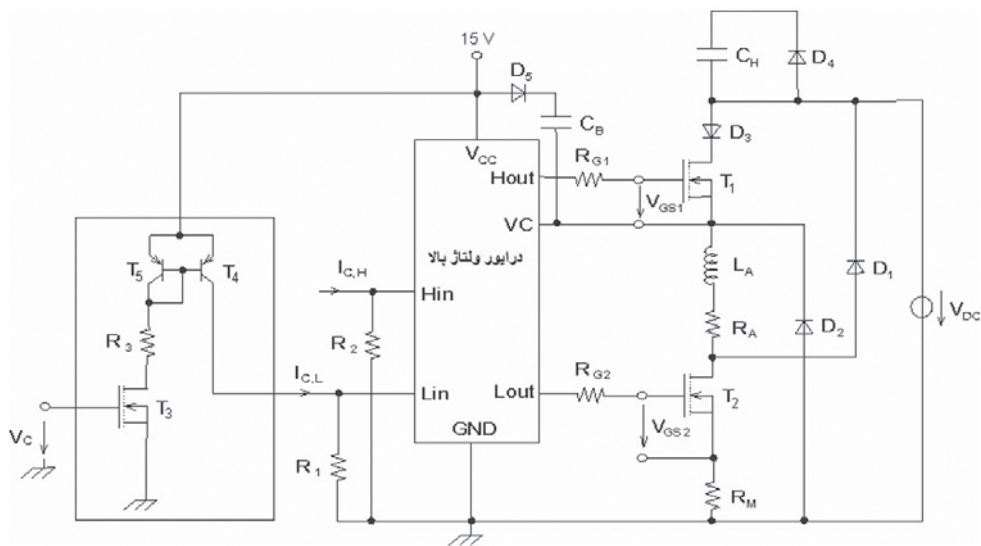
شکل (۱۰) مدار تغذیه کننده به کنترل کننده الکترونیکی را جهت روشن و خاموش کردن ترانزیستورهای قدرت نشان می دهد که در آن از یک درایور ولتاژ بالا استفاده شده است. همانطوریکه در شکل (۱۰) می بینیم در اینجا از یک خازن کمکی،  $C_H$ ، برای تولید ولتاژ بالای دینامیکی استفاده شده است. در مواقع خاموش بودن ترانزیستور،  $T_1$ ، خازن کمکی،  $C_H$ ، پر می شود، به طوری که در هنگام روشن شدن ترانزیستور،  $T_1$ ، به کمک همین خازن از لحاظ دینامیکی ولتاژی تولید می شود که بیشتر از ولتاژ منبع،  $V_{DC}$ ، است. کنترل درایور ولتاژ بالا از جریان آئینه ای با ترانزیستورهای  $T_3$  و  $T_6$ ، نتیجه می شود که با تغذیه جریان الکتریکی و روشن بودن ترانزیستور،  $T_4$ ، انجام می گیرد. سپس جریان تولید شده در ترانزیستور،  $T_6$ ، در مقاومت،  $R_1$ ، جاری می شود که افت ولتاژ حاصله به عنوان سیگنال محرک در درایور ولتاژ بالا استفاده می شود.

#### ۶- مدارهای اندازه گیری

روش‌های مختلفی برای تحقق مراحل کنترلی سوپاپ الکترومغناطیسی وجود دارد که هر کدام پیچیده گی خاص خود را دارد، به عنوان مثال دیجیتالی کردن سیگنال مشتق جریان سلف که فقط با نمونه برداری زیاد امکان پذیر است و یا تطبیق کامل قسمت‌های مختلف مدار در قسمت آنالوگ. بنابراین جهت سادگی کار، ترکیبی از هر دو روش آنالوگ و دیجیتالی برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها انتخاب شده است. بدین ترتیب که برای تقویت سیگنال‌ها و عملیات مشتق گیری و انتگرال گیری از مدارهای آنالوگ و برای کنترل سیگنال‌ها از مدارهای دیجیتالی استفاده می شود. میکروپروسسورهای قسمت دیجیتالی مدار به کمک درایورهای ولتاژ بالا، سیگنال‌های مورد نظر به ترانزیستورهای قدرت  $T_1$  و  $T_2$  را مطابق الگوریتم انتخاب شده، تولید میکنند تا با روشن و خاموش کردن این ترانزیستورها، رفتار حرکتی سوپاپ ایجاد شود. در تشکیل سیگنال‌های آنالوگ، باید از سیگنال‌های اندازه گیری شده جریان و ولتاژ الکتریکی سلف،  $L_A$ ، مشتق گیری و انتگرال گیری شود تا موقعیت صفحه فلزی سوپاپ الکترومغناطیسی تعیین شود. این کار توسط مدار شکل (۱۱) انجام می گیرد.



شکل ۹: ساختار کلی واحد کنترل



شکل ۱۰: نحوه تغذیه ترانزیستورهای قدرت استفاده شده توسط درایور ولتاژ بالا

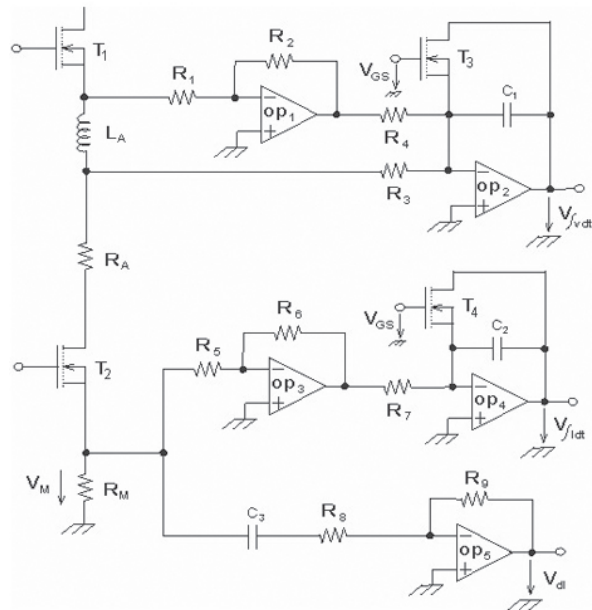
حسابه توان مصرفی سلف، می بایستی سه ولتاژ دیود،  $D_2$ ، سلف  $L_A$  و مقاومت،  $R_M$  مورد توجه قرار گیرد ( $V_{D2}$  ولتاژ دیود  $D_2$  در حالت کاهش جریان سلف است). خروجی های  $V_{in}$  و  $V_{out}$  (شکل ۱۲)، به ترتیب توان و انرژی مصرفی معادل را نشان می دهند. انرژی مصرفی هر سوپاپ، از مجموع انرژی مصرفی سلف های بالایی و پایینی واحد محرک آن به دست می آید. ولتاژ دو سر سلف،  $V_L$ ، به ورودی سر منفی مقایسه کننده  $C_3$  و تقسیم کننده ولتاژ  $N_1$  (با مقاومت های  $R_{11}$  و  $R_{12}$ ) متصل می گردد. ولتاژ  $V_M$  (افت ولتاژ دو سر مقاومتی که برای اندازه گیری جریان عبوری از سلف استفاده می شود) تقسیم کننده ولتاژ  $N_2$  با مقاومت های  $R_{13}$  و  $R_{14}$  را تغذیه می کند. از دو تقسیم کننده ولتاژ  $N_1$  و  $N_2$ ، به علت تطبیق به ورودی های ضرب کننده استفاده شده است. مقایسه کننده  $C_3$  به ترانزیستور  $T_5$  متصل می گردد. شاخه درین ترانزیستور  $T_5$  به خروجی نخستین تقسیم کننده ولتاژ  $N_1$  متصل می گردد، که هر دو این ها، نخستین شاخه ورودی ضرب کننده را تشکیل می دهند. خروجی دومین تقسیم کننده ولتاژ  $N_2$ ، دومین شاخه ورودی ضرب کننده را تشکیل می دهد. به سر منفی مقایسه کننده  $C_3$ ، یک مقاومت  $R_{10}$  و یک دیود زنر  $D_2$  نیز متصل می گردد که برای تامین جریان الکتریکی دیود زنر از

انتگرالگیری ولتاژ سلف  $L_A$  با محاسبه اختلاف پتانسیل های دو سر سلف، در سر منفی ورودی تقویت کننده عملیاتی معکوس  $OP_2$  انجام می گیرد. جهت تنظیم انتگرالگیر از ترانزیستور  $T_3$  استفاده می شود. برای انتگرالگیری و مشتقگیری جریان نیز از ولتاژ الکتریکی استفاده می کنیم (افت ولتاژی که در مقاومت  $R_M$  به واسطه جریان عبوری از سلف،  $L_A$ ، ایجاد می شود). ولتاژ دو سر مقاومت  $R_M$  توسط یک تقویت کننده تفاضلی و یک مبدل جریان به ولتاژ به دست می آید. بدین وسیله می توان به پهنای باند و  $CMRR$  (common mode rejection ratio) بزرگتر برای فرکانسهای بالا دست یافت. برای انتگرالگیری جریان الکتریکی از تقویت کننده عملیاتی معکوس  $OP_4$  استفاده می شود. خازن  $C_2$  با هدایت ترانزیستور  $T_4$  جهت تنظیم مجدد انتگرالگیر خالی می شود. برای مشتقگیری جریان الکتریکی نیز تقویت کننده عملیاتی معکوس  $OP_5$  و خازن  $C_3$  نقش ایفا می کنند. در شکل (۱۲) مدار اندازه گیری انرژی مصرفی نشان داده شده است. این مدار انرژی داده شده به هر سلف واحد محرک سوپاپ الکترومغناطیسی (سلف بالایی و پایینی شکل ۱) را به طور جداگانه و از طریق تعیین توان مصرف شده (که از حاصل ضرب ولتاژ و جریان مصرف شده در سلف حاصل می شود) محاسبه می کند. برای

خروجی مقایسه کننده  $C_3$  مثبت است، ترانزیستور  $T_5$  هدایت می کند (ولتاژ گیت ترانزیستور  $T_5$  مثبت است) در نتیجه ولتاژ درین - سورس ترانزیستور  $T_5$  خیلی کوچک و نزدیک به صفر می شود. یعنی ولتاژ اولین شاخه ورودی ضرب کننده، تقریباً صفر است. پس برای مقادیر منفی  $V_L$  ( $V_L \approx -1V$ ) ضرب کننده، دو ولتاژ ورودی  $V_M$  و صفر را ضرب می کند. بدین ترتیب می توان، توان محاسباتی را برای مقادیر منفی  $V_L$ ، روی صفر تنظیم کرد. ولتاژ خروجی ضرب کننده،  $V_{Mult}$ ، به وسیله یک تقویت کننده عملیاتی،  $OP_6$  با مقاومت های  $R_{16}$  و  $R_{17}$  تقویت می شود. به دلیل خنثی کردن ولتاژ افست تقویت کننده عملیاتی،  $OP_6$  از یک تقسیم کننده ولتاژ  $N_3$  با مقاومت  $R_{15}$  و یک پتانسیومتر  $R_P$  روی شاخه مثبت استفاده می شود (به کمک تقسیم کننده ولتاژ  $N_3$  حاوی پتانسیومتر، یک تفریق کننده برای خنثی کردن ولتاژ افست درست می شود). جهت محاسبه انرژی مصرفی از توان خروجی  $P_{in}$  (به عبارتی از ولتاژ خروجی  $V_{in}$ ) به وسیله تقویت کننده عملیاتی،  $OP_7$  (با مقاومت  $R_{18}$  و خازن  $C_4$ ) انتگرالگیری می شود. از ترانزیستور  $T_6$  برای تنظیم مجدد انتگرالگیر  $OP_7$  استفاده می گردد.

### ۷- نتایج اندازه گیری

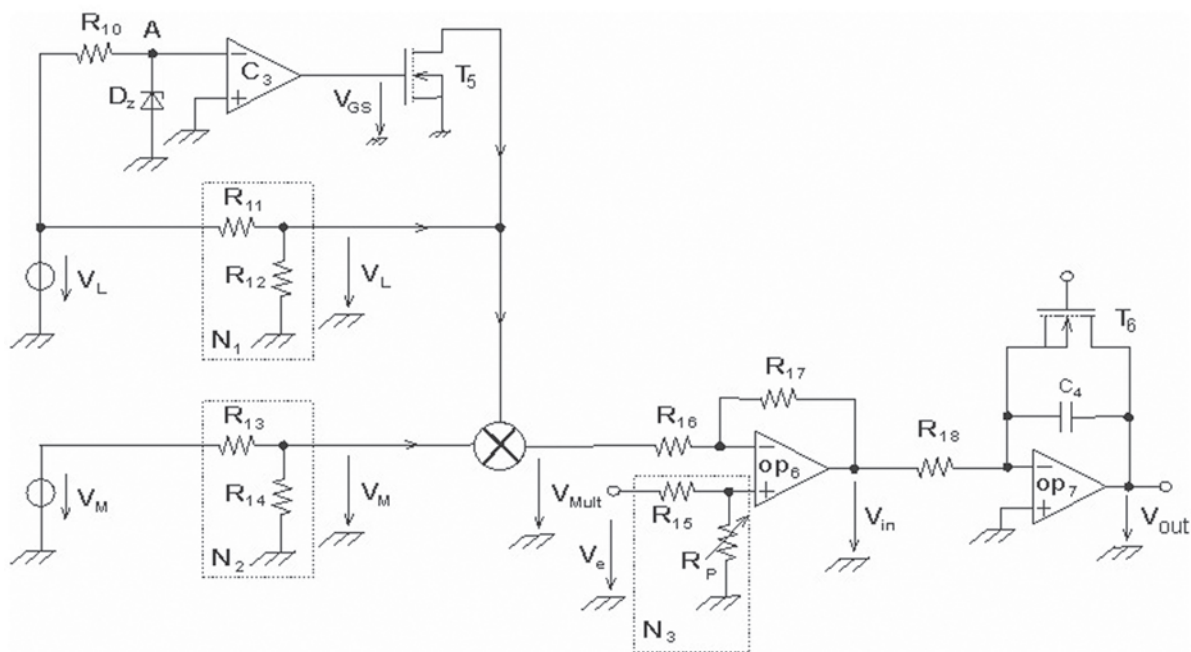
در شکل (۱۳) تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و توان مصرفی سلف سوپاپ الکترومغناطیسی نشان داده شده است. نمودار بالایی، تغییرات جریان، وسطی تغییرات ولتاژ و نمودار پایینی ضرب این دو (توان) را نشان می دهد. منبع جریان مستقیم DC به کمک واحد کنترل کننده، ولتاژ ۴۲ ولت و جریان عبوری ۱۲ آمپر را ایجاد می کند که این ولتاژ به کمک چندین تقویت کننده DC/DC تولید می شود. در شکل (۱۴) تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و انرژی مصرفی نیز رسم شده است. نمودار بالایی، تغییرات جریان، پایینی تغییرات ولتاژ و نمودار وسطی تغییرات انرژی مصرفی را نشان می دهد. حداکثر توان انرژی مصرفی برای یک سلف به ترتیب حدود ۴۴۰W و ۰.۳J می باشد (یعنی ۸۸۰W و ۰.۶J برای یک سوپاپ).



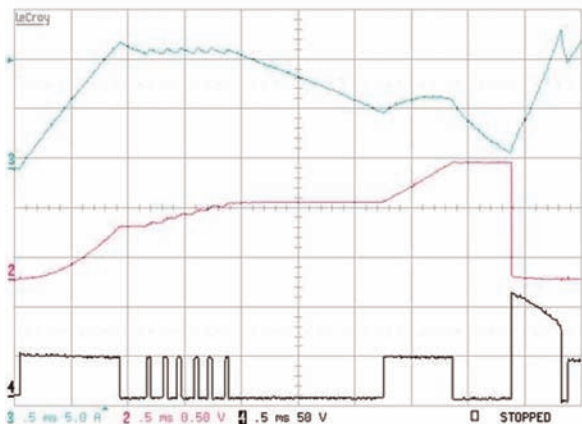
شکل ۱۱: مدارهای مشتق گیر و انتگرالگیر

مقاومت  $R_{10}$  استفاده می شود. ولتاژ دیود زبر نقش ولتاژ دیود  $D_2$  در حالت کاهش جریان را بازی می کند. برای مقادیر مثبت  $V_L$ ، ولتاژ نقطه A همان ولتاژ دیود زبر است.

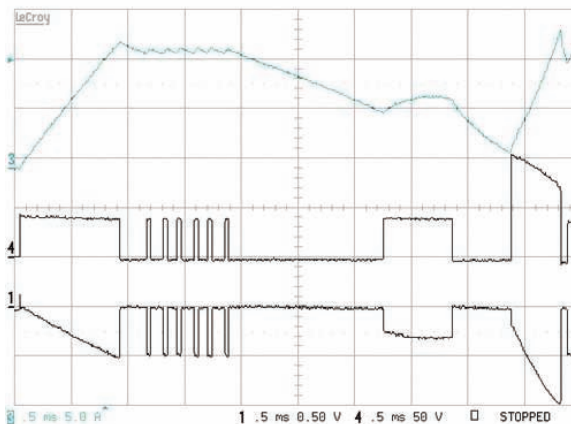
به عبارت دیگر دیود زبر هدایت می کند و ولتاژ خروجی مقایسه کننده  $C_3$  منفی می شود. برای مقادیر منفی  $V_L$ ، ولتاژ نقطه A منفی است و در نتیجه ولتاژ خروجی مقایسه کننده  $C_3$  مثبت. وقتی ولتاژ خروجی مقایسه کننده  $C_3$  منفی است، ترانزیستور  $T_5$  هدایت نمی کند (ولتاژ گیت ترانزیستور  $T_5$  منفی است). پس ولتاژ نخستین شاخه ورودی ضرب کننده،  $V_L$ ، یعنی اینکه برای مقادیر مثبت  $V_L$ ، ضرب کننده دو ولتاژ ورودی  $V_M$  و  $V_L$  را ضرب می کند. وقتی ولتاژ



شکل ۱۲: مدار اندازه گیری انرژی مصرف شده



شکل ۱۴: اندازه‌گیری تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و انرژی مصرفی برای یک سلف سوپاپ الکترومغناطیسی



شکل ۱۳: اندازه‌گیری تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و توان مصرفی برای یک سلف سوپاپ الکترومغناطیسی

- [8] M.Herrmann, "Design, calculation and regulation of magnetic reluctance actuators", Dissertation, University Munich, Germany 2008
- [9] U. Becker, "Method of estimating a needle lift of a solenoid valve", Patent DE198 34 405 A1, Robert Bosch GmbH, Germany, 2000
- [10] F. Denk, "Determination of the standard series opening Behavior of a fuel injector based on a test Opening behavior under the influence of a test pulse with a constant voltage", .Patent 10 2011 076 363 B 4, Continental Automotive GmbH, Germany, 2011
- [11] G. Rösel, F Denk, "Determining the temporal movement behavior of a fuel injector based on an evaluation of the time course of various electrical parameters". DE 102012 205 573 A1, Continental Automotive GmbH, Germany, 2013
- [12] A. Dukart, "Einspritzventil", DE10 2009 055 045 A 1, Robert Bosch GmbH, 2009.
- [13] W. Imoehl, "Fuel Injection System Trends and Emissions Implications", Continental Automotive Systems Newport News, SAE Technical Paper, 2013
- [14] J. Mumford, "Electromagnetic Valves", Patent 94 13 991 A1, PI RESEARCH LTD, 1994
- [15] K.Reif, Bosch, "Car electrics and car electronics", Robert Bosch GmbH, Teubner, Germany, 2011
- [16] A.Schultz, "Simulation-based design of electromagnetic linear actuators for fluidic valves", Dissertation, university of Aachen, Germany, 2006
- [17] V. Konev, "Foundations and Applications Electromagnetic actuators" Mechatronics, May 27, 2006
- [18] Y.Wang, X. Liu, "The Optimal Drive Current of Solenoid Valve and its Effect on Fuel Injection Characteristics", IEEE, 2010
- [19] S. Staples, "Transfer Report Using Magneto striation and the Villard Effect to detect Anomalies in Steel Materials", 2012
- [20] M. Sunwoo, J. Kang, "Nadelhub- Abschätzvorrichtung einer Kraftstoffein spritzdüse mit gemeinsamer Druckleitung", Patent DE 102 20 388 A1, Hyundai Motor Company, Germany 2002
- [21] S. Rosenbaum, "Design of electromagnetic actuators taking into account hysteresis", university Ilmenau Germany, 2011
- [22] P. Schneider, "FEM-gestützte Ableitung von Magnet kreismodellen für elektromagnetische Aktoren im Graf-Zeppelin"-Haus Friedrichshafe, Fraunhofer Institute, Germany, 2000
- [23] Kuchling, "physics Handbook", Harri Verlag Germany, 1989

\*\*\*

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل کننده الکترونیکی سوپاپ‌های سیلندر برای خودروها و یا هر موتور مکانیکی دیگر تجزیه و تحلیل شده است. این کنترل کننده با یک محرک الکترومغناطیسی و بر اساس قانون القای الکترومغناطیسی، یک سیستم رزونانس الکتریکی - مکانیکی تولید می‌کند. دو سلف مقابل به یکدیگر که بر روی یک هسته فرومغناطیسی سیم پیچی شده‌اند، این محرک الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند. هنگام عبور جریان الکتریکی از یکی از سلف‌ها، شار الکترومغناطیسی عبور کننده و در نتیجه نیروی مغناطیسی بوجود آمده، باعث کشاندن صفحه فلزی ومیله سوپاپ به آن سمت می‌شود. با تغذیه تعویضی جریان الکتریکی به سلف‌ها، سوپاپ متصل شده به میله فلزی بین دو سلف حرکت می‌کند. در این حال کنترل حرکت، سرعت و هر متغیر دیگری در خودرو فقط به وسیله جریان و ولتاژ الکتریکی انجام می‌گیرد. کنترل کننده الکترونیکی با نصب بر روی یک موتور با منبع ولتاژ مستقیم DC تست شد و توانست خواسته‌های مورد انتظار را برآورده کند.

## ۹- مراجع

- [1] Wright. "Engine Valve Actuated Control System", USA Patent 5,873,335, 1999
- [2] R. Flierl, M. Kluting, "New Fully Variable Valve trains for Throttle", Free Load Control, The Third Generation of Valve trains, SAE Special Publication, 2000
- [3] F. Staay, Variable Valve Timing, "A new Dimension of Engine Controls", European Automotive, Congress, Barcelona, 1999
- [۴] متولی کسمایی، محمدرضا، «اندازه‌گیری انرژی در کنترل کننده های الکترونیکی سوپاپ های سیلندر خودرو»، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، ۱۳۹۴
- [5] H. P. Zink, "Simulation of an electromagnetic Actuator in the Engine", M.Sc. Thesis, Institute for Physic, University of Regensburg, Germany, 1997
- [6] M. Pischinger, "Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation", SAE Special Publication", 2000
- [7] F. Denk, " Electromagnetic Injectors for Otto - motor", A contribution to the characterization and system integration of fast switching actuators, university ilmenau, Germany, 2018

## افغانستان نیازمند دانش بومی ایران در حوزه صنعت برق است

می‌توان به صورت مشارکتی با طرف افغان آن را احداث نمود. همچنین در صورت تمایل کشور افغانستان، خود کشور افغانستان نیز می‌تواند بی‌واسطه نسبت به احداث خط اقدام نماید. البته همه این اقدامات مشروط به انعقاد قرارداد خرید برق از ایران است که باید ابتدا بین دو طرف منعقد گردد. در حال حاضر این آمادگی وجود دارد که قراردادی به مدت ۱۰ سال با کشور افغانستان در این زمینه منعقد کنیم. در این رابطه تضمین تامین برق نیز از سوی طرف ایرانی ارایه خواهد شد. نرخ فروش برق نیز به صورت پلکانی خواهد بود. در واقع هر چه حجم برق بیشتری خریداری شود، قیمت آن کاهش خواهد یافت. با توجه به قابلیت اطمینان و استمرار برق صادراتی از ایران، این نرخ‌ها قابل رقابت با نرخ سایر کشورهای صادرکننده برق به کشور افغانستان خواهد بود.

مدیرعامل شرکت برق منطقه‌ای خراسان تاکید کرد: همچنین این آمادگی وجود دارد که این قرارداد به صورت مستقل با ولایت هرات منعقد شود. در حال حاضر شرکت توانیر نامه‌ای صادر کرده و براساس آن، این طرح به ما ابلاغ شده است. بنابراین موضوع همکاری در حوزه برق از طرف ایران جدی است.

علاوه بر این جهت افزایش همکاری‌ها آمادگی داریم کلیه مراحل تولید و عرضه برق و رساندن آن به دست مشترکان را برای یک ناحیه محدود در داخل خاک افغانستان توسط بخش خصوصی انجام دهیم.

مونسه حسن‌زاده معاون اقتصادی والی هرات نیز در این نشست با اشاره به برنامه‌های صنعت برق افغانستان برای خودکفایی و نیاز آن به انتقال دانش گفت: پارک بین‌المللی آموزش‌های تخصصی فوق‌توزیع و انتقال یکی از پیشنهادات خوبی است که می‌توان از ظرفیت آن برای توسعه صنعت برق افغانستان استفاده کرد.

مهندس خادمی عضو هیات اعزامی افغانستان نیز در این نشست بیان کرد: صنعت برق افغانستان نیازمند دانش و توانمندی‌های ایرانی است و می‌توان از دانش و همکاری‌های ایران در این زمینه استفاده کرد.

در ادامه این نشست تعدادی از شرکت‌های خصوصی فعال در صنعت برق خراسان نیز به ارایه توانمندی‌های خویش پرداختند. راه‌اندازی پست‌های برق بسیار، احداث خطوط برق به شکل BOT، ایجاد نیروگاه‌های حرارتی و تجدیدپذیر، تولید ژنراتور، تعمیر و نگهداری شبکه‌های برق و ... از اصلی‌ترین توانمندی‌های این شرکت‌ها در بخش خصوصی بود.

\*\*\*



و می‌تواند با کشور افغانستان در حوزه صنعت برق همکاری‌های موثری داشته باشد.

مهندس ریاحی خاطر نشان کرد: در حال حاضر برق ایران از طریق دو خط ارتباطی به کشور افغانستان صادر می‌شود. یک خط، ۲۰ کیلوولت دوغارون است که برق را به شهرهای کوچک افغانستان می‌رساند و مسیر دوم خط ۱۳۲ کیلوولت تربت‌جام است که برق ایران از این مسیر به شهر هرات منتقل می‌شود.

مدیرعامل شرکت برق منطقه‌ای خراسان گفت: در حال حاضر ظرفیت قرارداد صادراتی کشور ایران با شرکت برشنا افغانستان حدود ۱۴۰ مگاوات است و بیشترین حجم صادرات برق به افغانستان در زمستان حدود ۱۰۰ مگاوات و در تابستان نیز حدود ۷۰ مگاوات است.

در حال حاضر برنامه صنعت برق خراسان افزایش حجم صادرات به افغانستان با تمرکز روی ولایت هرات است. بر اساس این هدف‌گذاری حجم صادرات برق به کشور افغانستان به حدود ۵۰۰ مگاوات خواهد رسید. در حال حاضر یک خط ۴۰۰ کیلوولت از شهرستان تایباد به خواف کشیده شده که با انشعاب از این خط و احداث پست برق ۴۰۰ به ۵۰۰ کیلوولت در نزدیکی مرز و سپس احداث خط ۵۰۰ کیلوولت به طول ۱۵۵ کیلومتر، این ظرفیت جدید به وجود می‌آید و امکان انتقال حدود ۵۰۰ مگاوات برق به شهر هرات فراهم خواهد شد.

مهندس ریاحی در ادامه افزود: در حال حاضر انجام مطالعات مهندسی این طرح از طرف شرکت توانیر به برق منطقه‌ای خراسان ابلاغ شده که به هر روشی که طرف افغان حاضر به همکاری باشد، می‌توان خط و پست مزبور را ایجاد کرد. در واقع هم صنعت برق خراسان، توان انجام این پروژه را دارد و هم

هیات افغانستانی که از استان هرات به استان خراسان رضوی سفر کرده بود، در دیدار با مسوولان صنعت برق خراسان بر نیاز این کشور به دانش بومی ایران در حوزه صنعت برق و استفاده از دستاوردهای ایران در این بخش تاکید کرد.

دکتر علی رسولیان معاون هماهنگی امور اقتصادی استانداری خراسان رضوی در جلسه بین مسوولان صنعت برق خراسان و هیات اعزامی از ولایت هرات افغانستان اظهار کرد: استان خراسان رضوی ظرفیت آموزشی و اجرایی خوبی در حوزه برق در اختیار دارد که با توجه به توافقات این جلسه با حمایت استانداری خراسان رضوی و سایر دستگاه‌های ذی‌ربط در استان، امیدواریم زمینه همکاری‌های بیشتر بین استان و ولایت هرات فراهم شود.

مهندس رضا ریاحی رییس هیات مدیره و مدیرعامل شرکت برق منطقه‌ای خراسان نیز در این نشست بیان کرد: صنعت برق خراسان نخستین پارک بین‌المللی آموزش‌های تخصصی فوق‌توزیع و انتقال را راه‌اندازی کرده که این ظرفیت می‌تواند در زمینه افزایش مهارت و تربیت نیروی متخصص در کشور افغانستان مورد استفاده قرار گیرد.

وی ادامه داد: صنعت برق خراسان برای آموزش و انتقال دانش به نیروهای فنی در کشور افغانستان آمادگی دارد.

مهندس ریاحی پیشنهاد کرد کمیته مشترکی بین دو طرف راه‌اندازی شود تا متخصصان دو کشور با یکدیگر در ارتباط مستمر قرار گیرند و موارد توافق شده سریع‌تر به سرانجام برسد. وی به توانمندی‌های شرکت برق منطقه‌ای خراسان اشاره کرد و گفت: این شرکت از لحاظ سطح فعالیت در بین ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای در کشور ایران، جایگاه ویژه‌ای دارد

## درخواست اشتراک نشریه عصر برق

(لطفاً کپی این فرم را به‌طور خوانا و دقیق تکمیل فرمایید)

شماره اشتراک: شماره اشتراک قبل: 

(مشخصات متقاضی)

نام شرکت/موسسه: .....

نام خانوادگی: نام: 

شغل: ..... میزان تحصیلات: ..... رشته تحصیلی: .....

استان: ..... شهر: ..... بلوار: ..... خیابان: .....

کوچه: ..... پلاک: ..... طبقه: ..... واحد: ..... کد پستی: .....

صندوق پستی: ..... پست الکترونیک: ..... تلفن: .....

نمابر: ..... پیش شماره: ..... تلفن همراه: .....

تعداد نسخه در هر نوبت:  ارسال از شماره:  شماره‌های قبلی مورد درخواست: .....سرویس پست: عادی  سفارشی  ارسال به: نشانی پستی  صندوق پستی 

مبلغ واریزی: ..... شماره رسید بانکی: ..... بانک/شعبه: .....

برای برقراری اشتراک نشریه عصر برق، هزینه اشتراک مورد نظر را از جدول زیر انتخاب نموده و به حساب ۴۰۶۵۳۷۹۲۷ و یا شماره کارت ۵۸۵۹ ۸۳۱۱ ۲۸۰۶ ۵۱۵۷ نزد بانک تجارت شعبه برق (قابل پرداخت در همه شعب بانک تجارت) به نام نشریه عصر برق واریز و رسید مربوطه را به همراه برگ تکمیل شده درخواست اشتراک به نشانی: مشهد، بلوار وکیل آباد نبش بلوار امامت، مجموعه فرهنگی ورزشی شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ساختمان اداری، طبقه اول ارسال فرمایید. همچنین برای جلوگیری از عملیات پستی و سهولت کار می‌توانید فرم تکمیل شده را به‌وسیله نمابر به شماره ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۸ ارسال فرمایید.

 پست سفارشی
  پست عادی

 یکساله
  ۸۰۰,۰۰۰ ریال
  ۱,۰۰۰,۰۰۰ ریال

تذکر: اشتراک بیش از یک سال پذیرفته نمی‌شود.



دانشجویان محترم، اساتید گرامی و فرهنگیان عزیز در صورت تمایل می‌توانند مبلغ فوق را پس از کسر ۱۰٪ واریز فرمایند. نسخه الکترونیکی شماره‌های قبلی نشریه در سایت انجمن موجود است و برای دریافت نسخه چاپی شماره‌های قبلی نشریه به ازای هر شماره مبلغ ۲۰۰,۰۰۰ ریال به حساب واریز گردد.

توسعه مدیریت های فیزیکی

سامانه مدیریت های فیزیکی

سامانه مدیریت های فیزیکی

وب پیم  
WebPam

سامانه مدیریت دارایی های فیزیکی  
Enterprise Asset Management

وب پیم  
(WebPam)

استقرار سامانه  
نرم افزار مدیریت  
دارایی های فیزیکی  
مبتنی بر نظام نامه مدیریت  
دارایی های فیزیکی

وب پیم  
WebPam



۹۸۷۶۵۴۳۲

کدگذاری  
تجهیزات و تاسیسات



پیاده سازی  
مدل آیتایم

UPTIME:  
John D.Campbell



تحول دیجیتال  
در نظام نگهداشت  
و تعمیرات

استقرار  
مدیریت  
دارایی های  
فیزیکی

HSE  
تحول دیجیتال  
در نظام ایمنی بهداشت  
و محیط زیست  
Health  
Safety  
Environment

بومی سازی  
فرآیند مدیریت کار



آموزش و  
فرهنگ سازی

برگزاری دوره جامع  
آموزش مجازی مدیریت  
دارایی های فیزیکی در  
سطح کشور با حضور بیش از  
۵۰۰ نفر از همکاران شرکت های توزیع

اسکن کنید



پیاده سازی استاندارد  
IEC 61968  
بامحوریت مدیریت  
دارایی های فیزیکی

مدیریت دارایی های فیزیکی  
www.modaf.ir

معاونت بهره برداری و ویرایشگری  
شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان جنوبی



Webinar

# اجرای طرح مکانیزاسیون و اتوماسیون شبکه‌های توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی در ۱۲۰۰ نقطه

## دستاوردهای طرح

# دهنک

افزایش تاب آوری و مکانیزاسیون شبکه با:

- نصب ۲۶۰۰ ست سکسیونر غیر قابل قطع زیر بار هوایی
- نصب ۱۸۰۰ عدد اسپیسر جداساز هوایی
- استحکام بایه‌های هوایی ۹۰۰۰ اصله
- عایق کاری و کاورینگ ۳۰۰۰ پست هوایی

ایجاد ۴۰۰ نقطه تحت اتوماسیون با:

- نصب ۲۰۰ دستگاه سکشنالایزر هوایی
- تجهیز ۲۰۰ دستگاه سکسیونر موجود
- نصب، تجهیز و بروز رسانی ۴۰۰ دستگاه RTU
- نصب ۲۳۰ دستگاه مودم رایویی UHF
- نصب ۱۷۰ دستگاه مودم ارتباطی GPRS



کاهش شاخص SAIDI از ۲۵۸ به ۱۸۸ دقیقه در سال به ازای هر مشترک

راه اندازی اولین مرکز تماس مبتنی بر SIP Trunk در کشور با امکان پاسخگویی انواع مدیاهای ارتباطی اعم از تماس، پیامک، ایمیل، چت آنلاین و پایش خدمات سبز در اپلیکیشن برق من



مدیریت داده‌های انرژی  
www.modaf.ir

شرکت خدمات برق استان خراسان رضوی

معاونت بهره برداری و دیسپاچینگ  
شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی