

عصر برق ۱۲

ASR-E-BARQ

فصل نامه علمی

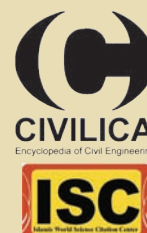
انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران، شاخه خراسان

سال ششم • شماره ۱۲ • تابستان ۱۳۹۸

قيمت ۱۰,۰۰۰ تومان



ارتباط صنعت و دانشگاه؛ لازمه تربیت نیروی انسانی کارآمد / طراحی اقتصادی یک ریز شبکه هوشمند با در نظر گرفتن شاخص های قابلیت اطمینان و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی PSO / آخرین دستاوردهای کنترل گلوکز پلاسمای خون در بیماران دیابتی با استفاده از گوشی های هوشمند / چالش های موجود و راهکارهای ارائه شده در مسیر توسعه فناوری دیود ساطع کننده نور آبی / بررسی عملکرد و بهینه سازی دستگاه همگن ساز فراصوت به منظور ارتقا توان / تشخیص استرس از سیگنال قطر مردمک به کمک شبکه عصبی / طراحی و ساخت موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) با بازده بالا و نوسان گشتاور کم برای استفاده در کولر آبی / مروری بر خازن های بین انگشتی و نحوه ی عملکرد آنها در سنسور مختلف با استفاده از دی الکتریک مایع





شرکت مخابرات ایران
(سامی نام)
روابط عمومی منطقه خراسان رضوی



هساولک

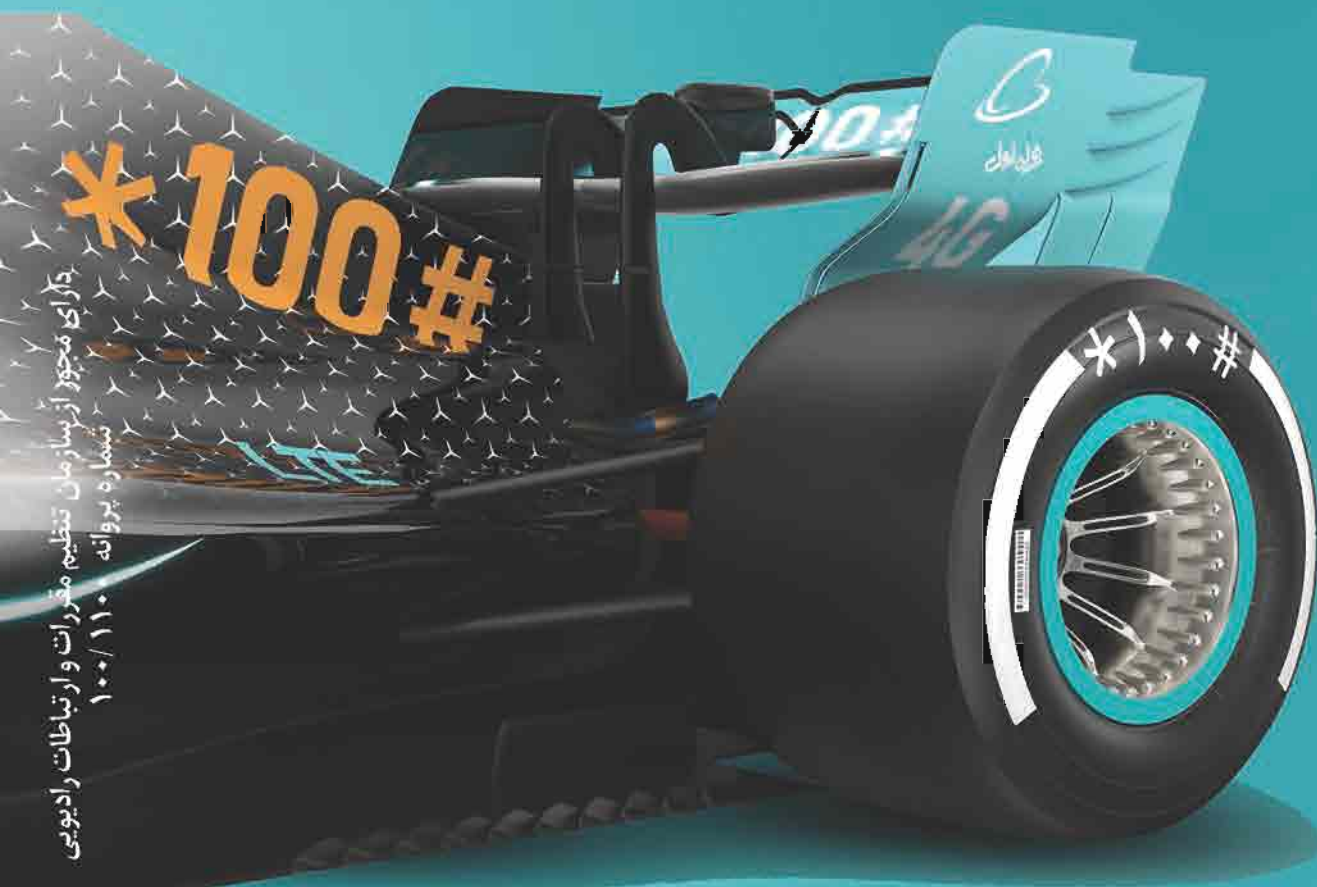
www.mci.ir

صفر تا صد خدمات اینترنت همراه اول

*\♦♦#

*100#

دکرای مجبور از سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی
شماره پروانه: ۱۰۰/۱۱۰



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

شورای سیاست گذاری:

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

شورای نویسندگان:

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

مدیر اجرایی:

مهندس غلامرضا یزدانی شواکند

روابط عمومی:

مهندس فریده سعادت، مهندس سمیرا شمس،
مهندس فرزانه رحیمی

مدیر برنامه ریزی:

دکتر مصطفی رجبی مشهدی

صفحه آرایی و امور گرافیک:

امواج برتر (۰۵۱-۳۸۹۴۰۱۲۰)

لیتوگرافی: سارنگ (۰۵۱-۳۷۰۵۶۵۴۰)

چاپ: زبرد (۰۵۱-۳۱۶۶۶۶)

صحافی: حافظ (۰۵۱-۳۳۹۲۹۱۱۱)

به نام دوست

فهرست مطالب

۲	یادداشت مدیرمسئول
۳	ارتباط صنعت و دانشگاه: لازمه تربیت نیروی انسانی کارآمد
۶	طراحی اقتصادی یک ریزشبه هوشمند با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان و ...
۱۵	آخرین دستاوردهای کنترل گلوکز پلاسمای خون در بیماران دیابتی با استفاده از ...
۲۱	چالش‌های موجود و راهکارهای ارایه شده در مسیر توسعه فناوری دیود ...
۲۷	بررسی عملکرد و بهینه‌سازی دستگاه همگن‌ساز فراصوت به منظور ارتقا توان
۳۵	تشخیص استرس از سیگنال قطر مردمک به کمک شبکه عصبی
۴۰	طراحی، تحلیل الکتریکی و حرارتی و ساخت تقویت کننده رادیویی ... (چکیده رساله دکتری)
۴۱	برنامه ریزی بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع شامل ریزشبه‌ها تحت (چکیده رساله دکتری)
۴۲	حسگرهای نوری زیستی با ساختارهای متمرکز کننده امواج ... (چکیده رساله دکتری)
۴۲	پایدارسازی سیستم‌های مرتبه کسری سویچ شونده با عدم قطعیت (چکیده رساله دکتری)
۴۳	طراحی و ساخت موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) با بازده بالا و ...
۵۱	مروری بر خازن‌های بین انگشتی و نحوه عملکرد آنها در سنسور مختلف با ...

● 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 لزوما دیدگاه «عصر برق» نیست.
- 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.

فراخوان سال



نشانی:

مشهد، بلوار وکیل‌آباد، نیش بلوار امامت، مجموعه فرهنگی
ورزشی شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ساختمان کتابخانه
تلفن دبیرخانه نشریه: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۷
نمبر: ۰۵۱-۳۶۱۰۳۸۵۸

وب سایت: www.kiaeee.ir

پست الکترونیک: asrebarq@gmail.com



صنعت برق و تحولات پیش رو

یادداشت مدیرمسئول

فناوری ریزشبه با نقش برجسته و کلیدی شبکه‌های توزیع برق در ساختار صنعت به‌عنوان راهبردی اساسی دنبال می‌شود. تمرکز زدایی از صنعت برق به‌طور کلی موجب بالا رفتن بهره‌وری صنعت شده و شرایط را برای ورود مردم به عرصه‌های متنوعی از کسب و کار فراهم می‌کند و در نهایت موجب رونق مردم سالاری در اقتصاد و مدیریت صنعت برق می‌شود. محور دیجیتالی شدن شبکه برق نیز که در واقع زیرساختی برای تحقق ایده‌های نو در صنعت می‌باشد، شرایط را برای مبادله دوطرفه اطلاعات بین شبکه و مشتریان فراهم می‌سازد. فناوری‌هایی مانند اندازه‌گیری هوشمند، کنترل از راه دور، اینترنت اشیاء، سامانه‌های خودکار و سنسورهای هوشمند و ... در این محور به خدمت گرفته می‌شوند تا به کمک زیرساخت‌های مخابراتی، بهره‌برداری و راهبری شبکه را به‌صورت مؤثر و ایمن امکان‌پذیر سازند.

ترکیبی از سه روند بالا را می‌توان به‌طور آشکار، در روند تحولات صنعت برق مشاهده نمود. به‌کارگیری این محورها علاوه بر کمک به کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری در صنعت موجب شده است تا شرایط برای خلق کسب و کارهای خلاقانه، به‌روز، فناوری‌های نو و قدرتمند شدن مشتریان شبکه برق فراهم گردد. اگرچه این تغییرات راهبری و بهره‌برداری از شبکه را پیچیده‌تر می‌سازد و نظام حقوقی و تکالیف نمادهای مختلف صنعت برق و مشتریان را به‌طور قابل توجهی تغییر می‌دهد، اما دستاوردهای بزرگی را نیز در ایجاد صنعتی پویا، سازگار با محیط زیست و مبتنی بر اقتصاد رقابتی و خلاق به ارمغان می‌آورد. صنعت برق کشور نیز که در راستای تغییرات جهانی این صنعت، در حال باز تعریف کارکرد خود می‌باشد، مناسب است که به‌طور دقیق‌تر و شفاف‌تر برنامه‌ریزی کلی خود را در جهت پیاده‌سازی این محورها تعریف نماید و از مزایای آن‌ها برخوردار گردد.

صنعت برق، نقشی کلیدی در توسعه و پیشرفت اقتصادی یک کشور بازی می‌کند. بالا بودن همبستگی بین سرانه مصرف برق یک کشور و سرانه درآمد ناخالص آن، به‌خوبی این حقیقت را آشکار می‌سازد. بنابراین، برای بررسی وضعیت یک کشور به لحاظ توسعه اقتصادی می‌توان وضعیت صنعت برق و به‌ویژه مصرف برق آن کشور را در بخش‌های مولد اقتصاد (صنعت، کشاورزی، ...) بررسی نمود. امروزه، تأمین برق با قابلیت اطمینان مناسب در چارچوب اقتصاد رقابتی و با رعایت محدودیت‌های محیط زیستی، یک نیاز اساسی برای کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه می‌باشد. به دلیل تقاضای فزاینده برای انرژی الکتریکی، توسعه کاربردهای الکتریسته در زندگی مردم و در صنایع نوظهور، توجه مضاعف به الزام‌های محیط زیستی و هزینه‌ی تمام شده برق، برنامه‌ریزی صنعت برق اهمیت ویژه‌ای برای کشورها پیدا کرده است. سه محور اصلی که صنعت برق را در سال‌های پیش رو بیشتر متأثر می‌کند عبارتند از:

- برق‌رسانی به بخش‌های جدیدی از جامعه مانند حمل و نقل و گرمایش
 - تمرکززدایی از ساختار تولید و فعال کردن مشتری‌های برق
 - دیجیتالی کردن شبکه برق و برقراری ارتباط دوطرفه بین شبکه و مشتریان
- تغییرات صنعت برق را می‌توان به‌طور عمده در این سه محور و تأثیرات متقابلی که بین آن‌ها وجود دارد، تحلیل نمود. هدف اصلی محور برق‌رسانی به بخش‌های جدیدی از خدمات و صنعت مانند حمل و نقل که برقی شدن خودروها و سایر سیستم‌های حمل و نقل شهری، ریلی و یا استفاده از برق در گرمایش ساختمان را دنبال می‌کند، هدف اصلی، کاهش دی‌اکسید کربن و استفاده از انرژی‌های پاک می‌باشد. در محور تمرکززدایی، استفاده بیشتر از پتانسیل‌های مشتریان برق در مدیریت مصرف و پاسخ تقاضا مورد توجه است. همچنین در این محور، استفاده از منابع تولید پراکنده، ذخیره انرژی و

ارتباط صنعت و دانشگاه؛ لازمه تربیت نیروی انسانی کارآمد

گفت‌وگو با دکتر حمیدرضا پوررضا؛ رئیس دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد



دنبال شد. در یک بخش کرسی‌های دانشگاه در صنعت تعریف شد تا امکان حضور استادان در صنعت فراهم شود و استادان علاقمند بتوانند قسمتی از فعالیت‌های خود را در صنعت دنبال کنند و یک روز در هفته در صنعت حضور داشته باشند. این موضوع در اجرا نتوانست انتظار دانشگاه را برآورده سازد چرا که فضا و زیرساخت قانونی لازم برای تعداد اندک استادانی که با صنعت ارتباط داشتند فراهم نشد و ممکن بود در دانشگاه بابت عدم حضور بازخواست شوند که البته در نهایت مساله حل شد اما موفق

دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد از جمله مراکز آموزش عالی است که در سال‌های اخیر سعی در برقراری ارتباط موثر با صنعت داشته است و برنامه‌های مختلفی برای دستیابی به این هدف تدوین نموده است. برای بررسی میزان موفقیت این برنامه‌ها گفت‌وگویی با دکتر حمیدرضا پوررضا رئیس دانشکده مهندسی انجام شده است که حاصل این گفت و گو را در ادامه خواهید خواند.

حضور موفق صنعت در دانشگاه

اقداماتی در این دانشکده برای ارتباط با صنعت انجام شده و چه نتایجی از آن‌ها حاصل شده است گفت: «بحث ارتباط صنعت و دانشگاه در دانشکده مهندسی از چند جنبه

رئیس دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد در گفت‌وگو با بخش خبری فصلنامه عصر برق در پاسخ به این پرسش که چه



نشان می‌دهد در این سال‌ها عامل شکست برخی از صنایع عامل مالی و اقتصادی نبوده است بلکه مشکلات آن‌ها ناشی از سرمایه‌های انسانی و نیروهای متخصص و ورزیده بوده است. بخشی از این مشکل به اشکالاتی بر می‌گردد که ما در سیستم آموزش و پرورش و فنی و حرفه‌ای داریم و بخشی به دانشگاهیان مربوط می‌شود. بخش دیگری هم مربوط به دانشجویان است که انگیزه لازم برای یادگیری را ندارند و در طول تحصیل خود به دنبال فراگیری نیستند. اگر قرار است شرکت‌های دانش‌بنیان شکل بگیرند و بزرگ و قوی شوند باید این اشکال‌ها برطرف شود. وقتی صنعت در کنار دانشگاه باشد، به نیروهای ارزان قیمت متعددی دسترسی خواهد داشت و ما انتظار داریم بخشی از دانشجویانی که درگیر کار می‌شوند وارد صنعت شوند و ماندگار شوند. بخش بزرگی از دانشجویانی که بعد از تحصیلات تصمیم به مهاجرت می‌گیرند یا به تحصیل در مقاطع بالاتر تحصیلی می‌پردازند به این دلیل است که کار ندارند».

رییس دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد در ادامه هم‌چنین در مورد مزایایی که راه‌اندازی بخش‌های تحقیق و توسعه و آزمایشگاه‌های صنعتی در دانشکده برای سیستم آموزشی دارد بیان داشت: «حضور این آزمایشگاه‌ها و بخش تحقیق و توسعه صنعت در دانشگاه، برای دانشگاه هم مزایایی دارد از جمله این که وقتی شخصی از هیات علمی دانشگاه با مسایل صنعتی درگیر

سخنرانی‌ها به دانشگاه آمده‌اند تا دانشجویان با دیدگاه‌های صنعتی و کسب و کارهای زمینه‌ی تحصیلی خود آشنا شوند. از دیگر برنامه‌هایی که هم‌اکنون در دست اجرا است بازسازی یکی از ساختمان‌های اداری دانشکده‌ی مهندسی است و قرار است فضای فیزیکی لازم ایجاد شود و مراکز تحقیق و توسعه شرکت‌های صنعتی را تشویق کنیم تا در دانشگاه مستقر شوند و از طرف دیگر بعضی از آزمایشگاه‌های خاص دانشگاه مانند آزمایشگاه رباتیک که مورد علاقه صنعت است نیز در این ساختمان جانمایی خواهند شد. با تعدادی از شرکت‌ها مانند «تیان الکترونیک» که از شرکت‌های موفق و موافق این قضیه است و «طاها قالب» مذاکره‌هایی انجام شده است. برخی از شرکت‌ها مانند «آذرخش انتقال نیرو» هم اعلام آمادگی کرده‌اند تا در تامین مالی آزمایشگاه‌ها مشارکت نمایند و آزمایشگاهی با نام شرکت خودشان در دانشگاه راه‌اندازی کنند.

دکتر پوررضا در مورد مزیت‌های راه‌اندازی بخش تحقیق و توسعه شرکت‌های صنعتی در دانشگاه گفت: «یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که صنایع با آن مواجه هستند، مشکل تامین نیروی انسانی کارآمد و متخصص است. با وجود حجم عظیمی از نیروهایی که در دانشگاه تربیت می‌شوند اما صنعت نتوانسته است نیروی مطلوب مورد نظر خود را که بتواند به اتکال آن کار خود را پیش ببرد در بین آن‌ها پیدا کند. بررسی‌ها و تجربه‌ها

نشدیم اشخاص دیگری که در صنعت حضور نداشتند را به این موضوع علاقمند کنیم و به این ترتیب آن‌چه مورد انتظار بود اتفاق نیفتاد و تب و تاب آن هم کم شد. اما در بخش دیگر که هدف حضور صنعت در دانشگاه بود اتفاقات بهتری رقم خورد و این موضوع به سمت بهبود در حال انجام است. بخش عمده‌ای از رابطه دانشگاه با صنعت در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب خانه صنعت و معدن بود که در دانشگاه یک باشگاه دانشجویی از طرف خانه صنعت و معدن شکل گرفت و در عمر سه ساله این باشگاه به نظر می‌رسد توفیق‌های خوبی حاصل شده است. در جلسه‌ای که با مدیران خانه صنعت و معدن به تازگی برگزار شد، عارضه‌یابی صورت گرفت و نکات مثبت و منفی بازنگری شد تا روند کار به صورت مطلوب‌تری دنبال شود. جلسات هم‌اندیشی که با مدیران خانه صنعت و معدن استان برگزار شد تجربه‌ی بسیار خوبی بود چون کار به شکل سازمان یافته و از طریق یک تشکل دنبال شد.

بخش دیگری از بحث ارتباط صنعت و دانشگاه مربوط به سخنرانی‌ها بود. این موضوع نیز تجربه‌ی خوبی بود و برنامه سخنرانی‌های هفتگی همیشه پر است و به طور تقریبی در طول ترم هر هفته سخنرانی وجود دارد و بر اساس برنامه‌ریزی یک هفته سخنرانی علمی و یک هفته سخنرانی صنعتی انجام می‌شود که مورد توجه دانشجویان قرار گرفته است و اشخاص زیادی از صنعت برای این

نوبین انرژی

چهارمین همایش ملی فناوری‌های نوین انرژی در آذرماه ۱۳۹۸ با همکاری انجمن مهندسين برق و الكترونيك شاخه خراسان در دانشكده مهندسي برگزار خواهد شد. دکتر پوررضا که ریاست این همایش را بر عهده دارد در مورد کارهای اجرایی و اقدام‌های انجام شده در این زمینه گفت: «در حال حاضر کارهای اجرایی و برنامه‌ریزی برای این همایش با هماهنگی دبیر اجرایی همایش در دست اقدام است و کمیته‌های مختلف آن شکل گرفته‌اند که هر یک در حوزه مورد نظر خود در حال فعالیت هستند. روند عادی این همایش در ابتدا بر مبنای انجام سخنرانی‌های علمی بود و نمایشگاه جانبی نیز در حاشیه همایش پیش‌بینی شده بود تا توانمندی شرکت‌های داخلی در این زمینه عرضه شود و ارتباط بین متخصصان و محققان با بخش صنعت شکل بگیرد. در حال حاضر علاوه بر این موضوع‌ها، برنامه‌های دیگری هم به این همایش اضافه شده است تا بخش‌های دیگری نیز حضور پیدا کنند و همایش مقداری همه‌گیر شود. انتخاب پایان‌نامه‌های برتر در حوزه فناوری‌های نوین انرژی از جمله این برنامه‌ها است. هم‌چنین برگزاری یک مسابقه ایده‌پردازی از دیگر برنامه‌های همایش است تا علاقمندان ایده‌های خود را برای حل یک مساله مشخص در بازه زمانی تعیین شده‌ی قبل از کنفرانس ارائه نمایند. و ایده‌های برتر در این زمینه انتخاب شوند. برگزاری یک رویداد استارت‌آپی با توجه به فعال شدن استارت‌آپ‌های حوزه انرژی نیز در دستور کار قرار دارد تا با نگاه ساخت داخل برخی محصولات و ایده‌هایی که می‌توانند بخشی از مشکلات حوزه انرژی را برای تامین نیازهای شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع برق برطرف نمایند در آن مشارکت نمایند». دکتر پوررضا در پایان ابراز امیدواری نمود در چهارمین همایش ملی فناوری‌های نوین انرژی، بخش‌های مختلف فعال شوند و همگرایی خوبی از جامعه‌ی مهندسان، کارشناسان صنعت، بخش‌های مدیریت شهری، نهادهای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری و دانشگاهیان، به‌ویژه دانش‌آموختگان مقاطع مختلف تحصیلی در این همایش به‌وجود بیاید و چالش‌های بخش انرژی مورد توجه قرار گیرد.

دانش‌آموختگان شکل می‌گیرد. این موضوع یکی از اشکالاتی است که وجود دارد و چون نتوانسته‌ایم دانش‌آموختگانی را که وارد صنعت شده‌اند شناسایی کنیم، به طور دقیق نمی‌توانیم نیاز صنعت را شناسایی کنیم تا بر اساس آن آموزش‌ها شکل بگیرد و بر مبنای آن نیرو تربیت شود اگر این موضوع شکل بگیرد با توجه به اختیاراتی که وزارت علوم به دانشگاه‌ها داده است، به صورت خودکار باعث تغییر سرفصل‌های آموزشی و تغییر برخی عنوان‌های درسی تخصصی خواهد شد. اما باید آن ارتباط با شرکت‌های بزرگ که نیازمند نیروهای دانشگاهی هستند و نه شرکت‌هایی که نیاز به نیروی تکنیسینی دارند، برقرار شود تا ضعف دانش‌آموختگانی که از دانشگاه وارد بازار کار می‌شود شناسایی شود. مدیرعامل یکی از شرکت‌های صنعتی که از دانش‌آموختگان دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی است به تازگی در یک جلسه مطرح کرد که نیرو از زمانی که وارد محیط کار می‌شود تا زمانی که آماده می‌شود و کاری را فرا می‌گیرد هزینه‌ای معادل ۱۵ میلیون تومان برای شرکت ایجاد می‌کند، اگر دانشگاه ضعف‌ها را بداند این زمان را کوتاه و هزینه را کاهش می‌دهد و دانش‌آموختگان هم امیدوارتر به تحصیل می‌پردازند چون می‌دانند که بعد از دانشگاه می‌توانند جذب شوند و شرکت‌ها هم با خیالی آسوده‌تر نیرو را به‌کار خواهند گرفت».

استاد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی در مورد نحوه‌ی شکل‌گیری ارتباط با دانش‌آموختگان و راه‌اندازی یک سازمان مردم‌نهاد گفت: «ارتباط با دانش‌آموختگان سال‌های گذشته می‌تواند از طریق یک سازمان به نام سازمان دانش‌آموختگان یا NGO دیگری شکل بگیرد. دانشگاه چند نوبت در این زمینه تلاش کرده است، اما انگیزه‌های دانش‌آموختگان برای این موضوع کم است و از طرفی باید این سازمان به‌صورت خودجوش و دانشجویی باشد و دانشگاه نباید متولی این موضوع باشد. این سازمان‌ها باید در زمینه فناوری و حوزه‌ی ثروت آفرینی فعال باشند. شکل‌گیری چنین سازمان‌هایی دسترسی به اطلاعات دانش‌آموختگان، معرفی زمینه‌های شغلی، هم‌افزایی، تامین آسان نیروهای مورد نیاز، شناسایی نقص‌ها و کاستی‌های سیستم آموزشی، دریافت ایده‌های نوآورانه دانشگاه از صنعت و بر عکس را به دنبال داشته باشد.

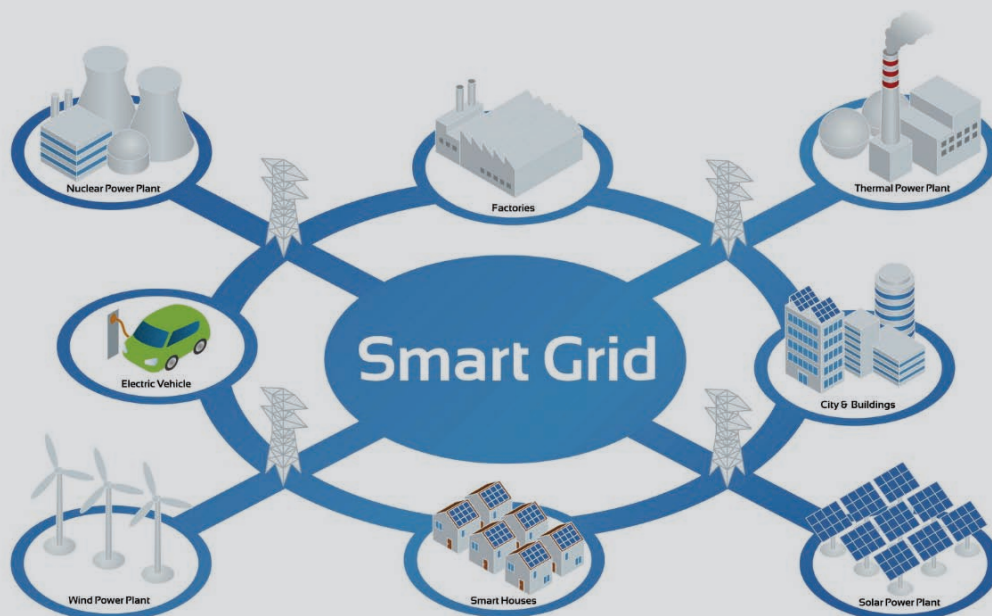
چهارمین همایش ملی فناوری‌های

می‌شود به طور قطع در شیوه‌ی آموزش او به دانش‌آموختگان دگرگونی‌هایی حاصل خواهد شد. زمانی که استاد بتواند مثال‌های عملی ملموس در کلاس درس مطرح کند، نسبت به وضعیتی که بخواد فقط بر اساس کتاب‌ها و منابع علمی به دانشجو آموزش بدهد متفاوت خواهد بود و دانشجو حس بهتری برای فراگیری خواهد داشت چرا که با دانستن کاربرد علوم انگیزه‌های او برای یادگیری افزایش خواهد یافت».

عدم شناخت دانش‌آموختگان از رشته‌های تحصیلی خود که گاهی بر اساس جو حاکم بر جامعه انتخاب رشته نموده‌اند باعث سرگردانی دانش‌آموختگان در سال‌های نخست تحصیلی در دانشگاه‌ها می‌شود، به‌گونه‌ای که پیوسته این پرسش در ذهن دانشجو تکرار می‌شود که کاربرد مطالب که در حال فراگرفتن آن است در کجا خواهد بود. این چالش با تعریف و افزودن یک درس به سرفصل‌های هر رشته‌ی مهندسی تا حدودی حل شده است: «یکی از مشکلاتی که در حال حاضر وجود دارد این است که دانشجو تا سال سوم نمی‌داند چه کاره خواهد شد. برای رفع این مشکل درسی به نام «شنایی با مهندسی X» در نظر گرفته شده است و یک گروه متشکل از استادان صنعت و دانشگاه سعی می‌کنند موضوعات مختلف را برای دانش‌آموختگان ترم یک معرفی کنند و در بعضی موارد پروژه‌های کوچکی تعریف کنند تا دانش‌آموختگان به‌صورت گروهی و تیمی با انجام آن پروژه با مبانی مهندسی رشته‌ی خود آشنا شوند و این کار اثر بسیار مثبتی بر انگیزه‌های دانش‌آموختگان گذاشته است».

استفاده از دانش‌آموختگان سال‌های گذشته

یکی از قابلیت‌های دانشگاه‌ها که می‌تواند در دانش‌آموختگان ایجاد انگیزه نماید و آن‌ها نتایج آموزش‌های را مشاهده کنند، استفاده از توان دانش‌آموختگان سال‌های گذشته دانشگاه است. ارتباط این گروه از دانش‌آموختگان که به نوعی محصول دانشگاه هستند هم تجربه‌ای شیرین برای آن‌ها ایجاد می‌کند و هم به دانش‌آموختگان فعلی راه را نشان می‌دهد. دکتر پوررضا در این زمینه می‌گوید: «در دانشکده مهندسی بانک اطلاعاتی کاملی از دانش‌آموختگان وجود ندارد و ارتباط با آن‌ها بیشتر بر اساس شناخت‌های شخصی یا علاقمندی



مقاله علمی-ترویجی

طراحی اقتصادی یک ریزشبکه هوشمند با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO

■ سید مهدی حکیمی/ استادیار گروه قدرت دانشکده مهندسی برق/ دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند / دماوند - ایران / sm_hakimi@damavandiau.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک سیستم میکروشبکه هوشمند متشکل از توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی، میکروتوربین و باتری جهت تامین یک الگوی بار منطقه مورد مطالعه طراحی می‌شود. هدف از این طراحی، کمینه کردن هزینه‌های ۲۰ ساله سیستم تولید انرژی، با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان آن، می‌باشد. فرض می‌شود که از میان تجهیزات سیستم، احتمال خروج اضطراری سه جز عمده، یعنی توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی و مبدل DC/AC وجود دارد. هزینه‌های سیستم شامل سرمایه‌گذاری اولیه، بهره‌برداری و نگهداری و همچنین هزینه از دست رفتن بار می‌باشد. داده‌های باد و تابش نیز مربوط به مناطق شمال غرب ایران می‌باشند. برای بهینه‌سازی سیستم از الگوریتم اجتماع ذرات استفاده می‌گردد. ترکیب یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند با ارزیابی قابلیت اطمینان، باعث بالا رفتن حجم و در نتیجه، بالا رفتن زمان انجام محاسبات می‌شود. یک مدل تقریبی جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم آرایه می‌گردد که منجر به کاهش قابل توجهی در زمان انجام محاسبات می‌شود. خوشبختانه، مقایسه نتایج بدست آمده از مدل تقریبی با نتایج حاصله از مدل دقیق، نشان‌دهنده دقت قابل قبول این مدل، با وجود کاهش چشمگیر حجم محاسبات می‌باشد. در این مقاله شهرک اکباتان به عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم ریزشبکه هوشمند، شاخص‌های قابلیت اطمینان، بهینه‌سازی اجتماع ذرات

The Economic Design of a Smart Microgrid Considering the Reliability Indices Using the PSO Algorithm

■ Seyed Mehdi Hakimi/ Electrical Engineering Department, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran / sm_hakimi@damavandiau.ac.ir

Abstract

In this study a novel intelligent method is applied to the problem of sizing in a hybrid power system such that the demand of residential area is met and the results are analyzed from the viewpoint of meeting the demand and total costs. This study is performed for Ganje area in north-western Iran. The systems consist of fuel cells, some wind units, some electrolyzers, a reformer, a compressor, an anaerobic reactor and some hydrogen tanks. The system is assumed to be stand-alone and uses the biomass as an available energy resource. Our aim is to minimize the total costs of the system such that the demand is met. PSO algorithm is used for optimal sizing of system's components.

Keywords: Renewable energy, intelligent Micro network system, reliability indicators, particle assembly optimization

در یک ریزش شبکه که به عنوان مثال از توربین بادی، آرایه خورشیدی، سیستم پشتیبان توان، سیستم ذخیره ساز و منابع پاسخ گویی بار استفاده می نماید، مساله بهینه سازی بسیار پیچیده است، زیرا در این شرایط می بایست قدرت توربین های بادی، آرایه های خورشیدی، سیستم ذخیره ساز و همچنین پاسخ گویی بار با توجه به میزان وزش باد و تابش خورشید به نحوی محاسبه گردد که علاوه بر این که هزینه سیستم کمینه می شود، انرژی مورد نیاز نیز در تمام ساعات شبانه روز، با قابلیت اطمینان مطلوب و کیفیت توان قابل قبول تامین گردد. همچنین قدرت سیستم پشتیبان باید به اندازه ای باشد که بتواند در صورت عدم وزش باد و تابش خورشید، بارهای ضروری را تامین نماید. میکرو شبکه متصل به شبکه می تواند به خرید و یا فروش برق با شبکه سراسری بپردازد. در این صورت محاسبه ظرفیت بهینه مولدها، سیستم ذخیره ساز و توان خریداری شده از شبکه سراسری دشوارتر نیز می گردد. مسایل اقتصادی و قابلیت اطمینان نقاط ضعف سیستم هایی است که از انرژی های تجدید پذیر برای تولید الکتریسیته استفاده می کنند. اینجا است که ضرورت تعیین بهینه ظرفیت مولدها، سیستم ذخیره ساز و سیستم پشتیبان مشخص می گردد، چرا که در صورت بهینه سازی صحیح علاوه بر دستیابی به قابلیت اطمینان لازم، هزینه الکتریسیته تولیدی نیز کمینه می شود و امکان رقابت انرژی های تجدید پذیر با روش های دیگر تولید انرژی بیشتر می شود. در [۱] تعیین سائز بهینه سیستم ترکیبی خورشیدی-پیل سوختی - ابرخازن برای یک منطقه مسکونی که دسترسی به شبکه برق سراسری ندارد مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بهینه سازی این سیستم ترکیبی از نرم افزار HOMER استفاده شده است. در [۲] تعیین سائز و مدیریت توان بهینه یک سیستم ترکیبی کوچک مستقل از شبکه برق سراسری با هدف تولید هیدروژن بررسی شده است و به این نتیجه رسیده است که هزینه های سیستم مورد مطالعه به بازدهی تجهیزات و قابلیت اطمینان بستگی دارد. به منظور بهینه سازی این سیستم از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در مرجع [۳] سیستم ترکیبی بر مبنای انرژی های تجدید پذیر به منظور تامین برق دو جزیره مستقل از شبکه مطالعه شده است. در این مقاله از نرم افزار HOMER به منظور بهینه سازی اقتصادی سیستم تامین توان استفاده شده است. در مرجع [۴] از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه اجتماع ذرات برای بهینه سازی سیستم تولید توان در یک ریزش شبکه استفاده شده است. متغیرهای این بهینه سازی سائز بهینه تجهیزات تولید توان می باشد. اهداف این بهینه سازی حداقل کردن هزینه های سالیانه سیستم و هزینه انرژی خریداری شده از شبکه برق سراسری است. در [۵] از الگوریتم بهینه سازی زنبور عسل به منظور مشخص کردن ظرفیت بهینه واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است. در این بهینه سازی هدف، یافتن توان اکتیو بهینه بوده است و فرض شده است که توان راکتیو واحدها مشخص باشد. در [۶] تعیین ظرفیت بهینه ذخیره ساز در ریزش شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این بهینه سازی حداقل کردن هزینه های سرمایه گذاری اولیه و هزینه بهره برداری میکرو شبکه می باشد. در [۷] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی بررسی گردیده است. هدف این مقاله حداقل سازی هزینه سالیانه تولید انرژی است. در این مقاله فرض شده که بار همیشه می بایست تامین گردد یا به عبارتی توانی از بارها نباید قطع شود. در منابع [۸-۱۰] برخی از کاربردهای سیستم مستقل از شبکه شامل منابع خورشیدی و ذخیره سازها بررسی شده اند. در [۸] بهینه سازی یک سیستم ترکیبی مستقل از شبکه مبنی بر منابع خورشیدی و

باتری مطالعه شده است. در [۹] تعیین ظرفیت بهینه یک سیستم ترکیبی خورشیدی، باتری و پیل سوختی مستقل از شبکه با هدف حداقل سازی هزینه ها بررسی شده است و به این نتیجه رسیده است که استفاده همزمان از باتری و پیل سوختی، بهینه تر از به کار بردن یکی از آنها می باشد. در [۱۰] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی خورشیدی - باتری با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای چند سایت مختلف مطالعه شده است. در [۱۱] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی مبتنی بر منابع انرژی های تجدید پذیر در حالت عدم اتصال به شبکه، مطالعه شده و هدف آن حداقل سازی هزینه ها بوده به صورتی که بار منطقه مسکونی مورد مطالعه تامین شود. در [۱۲-۱۳] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی - باتری با هدف کمینه سازی هزینه بررسی شده است. قابلیت اطمینان، یکی از قیود این بهینه سازی می باشد. در [۱۴] بهینه سازی سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی با ذخیره ساز هیدروژن از بعد اقتصادی مطالعه شده است. در [۱۵] سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی - باتری مطالعه شده است و نتایج نشان می دهد که استفاده از ذخیره ساز هیدروژن به عنوان ذخیره ساز بلند مدت سیستم، گزینه مناسبی می باشد. در [۱۶] تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی بادی - خورشیدی - باتری برای منطقه ای در سنگال که شبکه برق سراسری در آن وجود ندارد بررسی شده است. هدف این مقاله حداقل سازی هزینه سالیانه و همچنین حداقل کردن بار تامین نشده می باشد.

در این مقاله یک سیستم میکرو شبکه هوشمند متشکل از توربین های بادی، آرایه های خورشیدی، میکروتوربین و باتری جهت تامین یک الگوی بار منطقه مورد مطالعه طراحی می شود. هدف از این طراحی، کمینه کردن هزینه های ۲۰ ساله سیستم تولید انرژی، با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان آن، می باشد. فرض می شود که از میان تجهیزات سیستم، احتمال خروج اضطراری سه جزء عمده، یعنی توربین های بادی، آرایه های خورشیدی و مبدل DC/AC وجود دارد. هزینه های سیستم شامل سرمایه گذاری اولیه، بهره برداری و نگهداری، و همچنین هزینه از دست رفتن بار می باشد. داده های باد و تابش نیز مربوط به مناطق شمال غرب ایران می باشند. برای بهینه سازی سیستم از الگوریتم اجتماع ذرات استفاده می گردد. ترکیب یک الگوریتم بهینه سازی هوشمند با ارزیابی قابلیت اطمینان، باعث بالا رفتن حجم، و در نتیجه، بالا رفتن زمان انجام محاسبات می شود. یک مدل تقریبی جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم آرایه می گردد که منجر به کاهش قابل توجهی در زمان انجام محاسبات می شود. خوشبختانه، مقایسه نتایج بدست آمده از مدل تقریبی با نتایج حاصله از مدل دقیق، نشان دهنده دقت قابل قبول این مدل، با وجود کاهش چشمگیر حجم محاسبات، می باشد. در این مقاله شهرک اکباتان به عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است.

ساختار مقاله بدین صورت است که: در بخش دوم ساختار ریزش شبکه هوشمند مورد مطالعه را بیان می کنیم. مدل سازی اجزای ریزش شبکه هوشمند را در بخش سوم توضیح خواهیم داد. در بخش چهارم به ارزیابی قابلیت اطمینان خواهیم پرداخت. مدل سازی تعیین ظرفیت اجزای ریزش شبکه های هوشمند را در بخش پنجم بررسی خواهیم کرد. در بخش ششم نتایج شبیه سازی تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزش شبکه هوشمند را نشان خواهیم داد. در نهایت به بیان نتیجه گیری خواهیم پرداخت.

۲- ساختار ریزش شبکه هوشمند مورد مطالعه

در این مقاله شهرک اکباتان به عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است. این شهرک مسکونی از سه ریزش شبکه هوشمند و یک پست

سازنده توربین ارایه می‌شود و بیان‌کننده توان حقیقی می‌باشد که از توربین به باسبار منتقل می‌شود. توربین مورد استفاده در این مقاله از نوع SWT-50KW [۲۰] می‌باشد. توان نامی این توربین 50 kW است. مشخصه توان خروجی (P_{WG}) بر حسب سرعت باد (V_W) این توربین را می‌توان با رابطه (۳) تقریب زد.

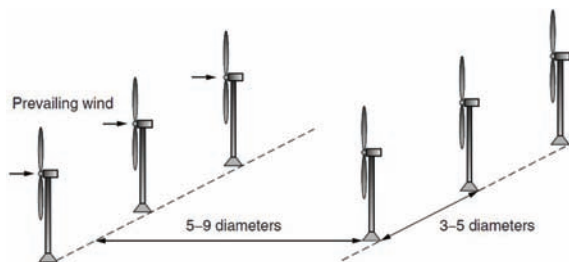
$$P_{WG} = \begin{cases} 0 & ; V_W \leq V_{cut\ in} \vee V_W \geq V_{cut\ out} \\ P_{WG,max} \times \left(\frac{V_W - V_{cut\ in}}{V_{rated} - V_{cut\ in}} \right)^m & ; V_{cut\ in} \leq V_W \leq V_{rated} \\ P_{WG,max} + \frac{P_{furl} - P_{WG,max}}{V_{cut\ out} - V_{rated}} \times (V_W - V_{rated}) & ; V_{rated} \leq V_W \leq V_{furl} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن $V_{cut\ in}$ ، $V_{cut\ out}$ و V_{rated} به ترتیب سرعت‌های قطع پایین، سرعت قطع بالا و سرعت نامی (m/s) توربین بوده $P_{WG,max}$ بیشینه توان خروجی توربین (P_{furl} و (kW) نیز توان خروجی در سرعت قطع بالا می‌باشند. در ادامه کار m برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری نمونه برداری شده‌اند، حال آن‌که ارتفاع نصب (ارتفاع توبی) توربین‌های مورد استفاده ۱۵ متر می‌باشد. سرعت باد در ارتفاع توبی را می‌توان با استفاده از قانون توان^۱ به صورت زیر محاسبه نمود.

$$V_W^h = V_W^{ref} \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha} \quad (4)$$

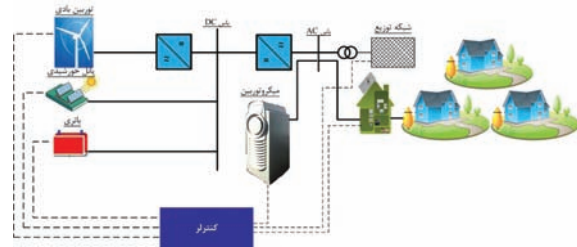
در رابطه فوق V_W^h سرعت باد در ارتفاع h و V_W^{ref} سرعت باد در ارتفاع، اندازه‌گیری یا مرجع (h_{ref}) بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. α ، نمای رابطه بالا، به‌طور معمول بین ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ می‌باشد (در اینجا ۰/۱۴). سایر مشخصات توربین‌های به کار رفته در مرجع [۲۰] قابل مشاهده می‌باشد. نرخ خروج اضطراری توربین‌های بادی ۴ درصد [۱۹] لحاظ شده است.

در مواردی که بیش از یک توربین بادی نصب می‌شود، جریان باد بعد از عبور از یک توربین به توربین دیگری می‌وزد و مقدار انرژی آن کاهش یافته و سرعت وزش باد کم می‌شود. پس فواصل توربین‌های بادی باید به درستی انتخاب شده و همچنین محدودیت فضای در دسترس نیز در محاسبات در نظر گرفته شود. فواصل بهینه توربین‌های بادی (بر مبنای قطر توربین) از یکدیگر به‌منظور بیشینه تولید توان در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۱]. وسعت شهرک اکباتان ۵/۹۴ کیلومتر مربع بوده که از این فضا حدود ۳ کیلومتر مربع آن قابلیت نصب توربین بادی را دارد. بر اساس شکل (۸-۴) و با توجه به قطر توربین بادی انتخاب شده (۱۸ متر) این فضا ظرفیت نصب حداکثر ۲۵۰۰ توربین بادی را دارد. قابل ذکر است که این قید به‌عنوان یکی از قیود بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه توربین‌های بادی به شبکه ۲۰ کیلوولت متصل می‌گردند.



شکل ۲: چیدمان بهینه توربین‌های بادی در مزرعه بادی

۶۳/۲۰ کیلوولت تشکیل شده است. همان‌طور که اشاره شد شهرک اکباتان شامل فازهای ۱، ۲ و ۳ بوده که در این رساله هر فاز از شهرک اکباتان به‌عنوان یک ریزشبهک هوشمند در نظر گرفته شده است. این ریزشبهک‌ها با یکدیگر اتصال الکتریکی ندارند، ولی هر یک از این ریزشبهک‌ها توسط یک کابل ۲۰ کیلوولت به پست ۶۳/۲۰ کیلوولت اتصال دارد. شبکه توزیع انرژی در شهرک اکباتان با استفاده از کابل زیرزمینی ۲۰ کیلوولت می‌باشد. فرض می‌شود ریزشبهک هوشمند متشکل از توربین‌های بادی، پانل‌های خورشیدی، میکروتوربین و باتری، بارهای قابل کنترل (ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی، سیستم سرمایش/گرمایش و خودروهای الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه) و بارهای غیرقابل کنترل می‌باشد. سیستم تولید توان در ریزشبهک هوشمند در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: سیستم تولید توان در ریزشبهک هوشمند

۳- مدل‌سازی اجزای ریزشبهک هوشمند

به منظور تأمین توان در ریزشبهک‌های هوشمند از واحدهای توربین بادی، آرایه‌های خورشیدی، میکروتوربین، باتری و مبدل AC/DC استفاده شده است که در ادامه به مدل‌سازی آنها می‌پردازیم.

۳-۱- آرایه‌های خورشیدی

داده‌های مربوط به توان تابیده شده بر سطح آرایه با استفاده از رابطه زیر به توان خروجی آن تبدیل می‌شود:

$$P_{PV} = \frac{G}{1000} \times P_{PV,rated} \times \eta_{PV,conv} \quad (1)$$

که در آن G ، توان تابش عمود بر سطح آرایه (W/m^2) و $P_{PV,rated}$ توان نامی هر آرایه بوده که به ازای $G=1000 (W/m^2)$ بدست می‌آید. $\eta_{PV,conv}$ نیز برابر با بازدهی مبدل DC/DC نصب شده بین هر آرایه و باسبار DC می‌باشد.

با توجه به در دست بودن مولفه‌های عمودی و افقی توان تابشی خورشید در هر لحظه، می‌توان توان تابیده شده (به‌صورت عمودی) بر سطح آرایه نصب شده با زاویه θ_{pv} را طبق رابطه زیر محاسبه نمود [۱۷]:

$$G(t, \theta_{pv}) = G_v(t) \times \cos(\theta_{pv}) + G_h(t) \times \sin(\theta_{pv}) \quad (2)$$

که در آن $G_h(t)$ و $G_v(t)$ به ترتیب نرخ تابش افقی و عمودی در گام زمانی t ام می‌باشند (W/m^2). سایر مشخصات آرایه‌های خورشیدی در [۱۸] قابل مشاهده می‌باشد. نرخ خروج اضطراری پنل‌های خورشیدی ۴ درصد در نظر گرفته شده است [۱۹]. در این مقاله فرض شده است که محل نصب پنل‌های خورشیدی بر روی پشت بام منازل بوده و با توجه به فضای در دسترس پشت بام بهینه ظرفیت مجاز قابل نصب محاسبه شده است.

۳-۲- توربین‌های بادی

توان خروجی توربین بادی مورد استفاده در این مطالعه در [۲۰] نمایش داده شده است. این منحنی به‌طور معمول توسط کارخانه

این دست اشاره نمود. در نهایت ضریب قطع معادل بار را نیز می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$ELF = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{Q(t)}{D(t)} \quad (9)$$

از آنجایی که ELF در برگیرنده اطلاعات بیشتری، هم درباره تعداد قطعی ها و هم مقدار آنها، می باشد [۲۲]، در این مقاله از آن به عنوان معیار اصلی قابلیت اطمینان استفاده خواهد شد. البته، برای سیستم مورد بررسی در آن مطالعه این محدودیت برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

۴-۲- مدل قابلیت اطمینان سیستم

محاسبات قابلیت اطمینان انجام گرفته در این پژوهش، با فرض وجود احتمال خروج واحدهای تولید کننده توان، یعنی توربین های بادی و آرایه های خورشیدی، و همچنین احتمال خروج مبدل DC/AC، انجام گرفته اند.

نرخ خروج اضطراری^۸ (FOR) واحدهای بادی و خورشیدی، بر اساس اطلاعات آرایه شده در [۱۹] برابر با ۴ درصد در نظر گرفته شده است. در نتیجه هر واحد توربین بادی یا آرایه خورشیدی با احتمال ۹۶ درصد در دسترس خواهد بود. احتمال قرار گرفتن در هر وضعیت بر اساس تابع توزیع دوجمله ای قابل محاسبه می باشد [۲۴]. به عنوان مثال، احتمال خروج^۹ توربین بادی از کل^{۱۰} توربین نصب شده، و همچنین خروج^{۱۱} آرایه خورشیدی از کل^{۱۲} نصب شده، برابر خواهد بود با:

$$f_{ren}(n_{wg}^{fail}, n_{pv}^{fail}) = \left[\left(\frac{N_{wg}}{n_{wg}^{fail}} \right) \times A_{wg}^{N_{wg}-n_{wg}^{fail}} \times (1-A_{wg})^{n_{wg}^{fail}} \right] \times \left[\left(\frac{N_{pv}}{n_{pv}^{fail}} \right) \times A_{pv}^{N_{pv}-n_{pv}^{fail}} \times (1-A_{pv})^{n_{pv}^{fail}} \right] \quad (10)$$

که در آن^{۱۳} A_{wg} و A_{pv} به ترتیب برابرند با احتمال در دسترس بودن هر واحد توربین بادی و هر واحد آرایه خورشیدی می باشد. احتمال خروج سایر اجزای سیستم در مقایسه با توربین های بادی و آرایه های خورشیدی بسیار پایین است. ولی توجه به این نکته نیز ضروری است که مبدل DC/AC نقشی بسیار حیاتی در تامین بار سیستم دارد در نتیجه، در نظر گرفتن احتمال خروج آن، هر اندازه هم که بعید باشد، در محاسبات قابلیت اطمینان ضروری است.

هرچند به علت نبود مراجع کافی در زمینه بررسی قابلیت اطمینان مبدل های الکترونیک قدرت، یافتن نرخ خروج مبدل کمی در دسترس نبود، ولی در نهایت با ترکیب کردن اطلاعات موجود در [۲۷-۲۵]، نرخ خروج تقریبی یک مبدل DC/AC محاسبه گردید. با توجه به اینکه میانگین زمان تا خرابی^{۱۴} (MTTF) هر تجهیز برابر با معکوس نرخ خرابی^{۱۵} آن می باشد [۲۸]، اگر نرخ خرابی یک مبدل fail/hr با ۱۰۵*۲/۵ فرض گردد [۲۹]، میانگین زمان تا خرابی آن حدوداً برابر با ۳۷۰۳۷ ساعت خواهد بود. از طرف دیگر در [۲۵] آمده است که میانگین زمان تا تعمیر^{۱۶} (MTTR) یک مبدل DC/AC حدوداً ۴۰ ساعت است. اگر m نشان دهنده میانگین زمان تا خرابی و r میانگین زمان تا تعمیر یک تجهیز باشد، قابلیت اطمینان حالت پایدار، یا به عبارت بهتر احتمال دسترسی^{۱۷}، آن طبق رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۲۴]:

$$A = \frac{m}{m+r} \quad (11)$$

با توجه به مطالب بالا، در این مقاله، دسترسی مبدل DC/AC برابر

۳-۳- توان تولید شده توسط واحدهای تجدیدپذیر

یکی از نکات مهم در محاسبات قابلیت اطمینان، در نظر گرفتن احتمال خروج واحدهای تولید کننده است. خروج واحدها ممکن است به صورت برنامه ریزی شده و یا به صورت اضطراری باشد. اگر فرض شود که به علت برخی مسایل، مانند خرابی، به ترتیب^{۱۸} n_{wg}^{fail} توربین بادی و^{۱۹} n_{pv}^{fail} آرایه خورشیدی از سیستم خارج شده باشند، آنگاه توان قابل تزریق به باس توسط واحدهای بادی و خورشیدی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$P_{ren}(n_{wg}^{fail}, n_{pv}^{fail}) = (N_{wg} - n_{wg}^{fail}) \times P_{wg} + (N_{pv} - n_{pv}^{fail}) \times P_{pv} \quad (5)$$

۳-۴- میکروتوربین

میکروتوربین در ریز شبکه هوشمند ۳ هنگامی توان تولید می کند که مقدار توان تولید شده توسط واحدهای خورشیدی و بادی و ذخیره ساز نتواند بار ریز شبکه هوشمند را تامین کند. در واقع مقدار توان تولید شده توسط میکروتوربین به مقدار توان تولیدی توسط این واحدها بستگی دارد که طبق رابطه (۶) محاسبه می شود. از آنجا که ساعات استفاده از میکروتوربین محدود می باشد در محاسبات از خروج اضطراری این تجهیز صرف نظر شده است.

$$P_{MT}(t) = \left(\frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right) - P_{ren}(t) - (E_{bat}(t) - E_{batmin}) \times \eta_{discharge} \quad (6)$$

چنانچه این توان مورد نیاز از توان نامی میکروتوربین بیشتر باشد، از شبکه توزیع برق خریداری می شود.

۳-۵- باتری

محدودیت انرژی ذخیره شده در باتری به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته می شود.

$$E_{batmin} \leq E_{bat}(t) \leq E_{batmax} \quad (7)$$

که در این رابطه E_{batmin} مینیمم ظرفیت ذخیره و E_{batmax} ماکزیمم ظرفیت ذخیره می باشد. مقدار حداقل انرژی ذخیره شده در باتری توسط حداکثر توانایی دشارژ باتری به صورت رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$E_{batmin} = (1 - DOD) \times E_{batmax} \quad (8)$$

در این رابطه DOD حداکثر توانایی دشارژ باتری می باشد. در این مقاله مقدار حداکثر توانایی دشارژ باتری برابر ۰/۸ در نظر گرفته می شود.

۳-۶- مبدل DC/AC

در نهایت نیز، یک مبدل DC/AC توان الکتریکی DC را جهت مصرف بار به توان AC با فرکانس مطلوب بار تبدیل می کند. اثر تلفات مبدل را می توان با بازدهی آن مدل نمود. مشخصات مبدل بکار رفته در مرجع [۱۸] قابل رویت می باشد.

۴- ارزیابی قابلیت اطمینان

در این بخش به بیان شاخص های قابلیت اطمینان، مدل قابلیت اطمینان سیستم و روش پیشنهادی برای ارزیابی قابلیت اطمینان خواهیم پرداخت.

۴-۱- شاخص های قابلیت اطمینان

مراجع شاخص های متعددی را برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم ها آرایه کرده اند [۲۳، ۱۹، ۲۲] که از جمله آنها می توان به شاخص هایی نظیر امید قطع بار^{۲۰} (LOLE)، امید از دست رفتن انرژی^{۲۱} (LOEE) و یا امید انرژی تامین نشده^{۲۲} (EENS)، احتمال از دست رفتن منبع^{۲۳} (LPSP)، ضریب قطع معادل^{۲۴} (ELF)، و موارد دیگری از

قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی ارایه می گردد که علیرغم کاهش حجم و زمان محاسبات، از دقت خوبی برخوردار می باشد. در این روش، پیشنهاد می شود که به جای در نظر گرفتن تک وضعیت های مربوط به خروج توربین های بادی و آرایه های خورشیدی و در نهایت محاسبه امید ریاضی شاخص های قابلیت اطمینان سیستم، از متوسط توان خروجی توربین های بادی و آرایه های خورشیدی استفاده گردد.

$$E[P_{ren}] = \sum_{s \in S} P_{ren}(s) \times f_p(s) \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$E[P_{ren}] = \sum_{n_{WG}^{fail}=0}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=0}^{N_{PV}} \{P_{ren}(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \times f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail})\} \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه (15) حاصل می شود:

$$E[P_{ren}] = \underbrace{\sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} \{(N_{WG} - n_{WG}^{fail}) \times P_{WG} \times f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail})\}}_A \quad (15)$$

$$+ \underbrace{\sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} \{(N_{PV} - n_{PV}^{fail}) \times P_{PV} \times f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail})\}}_B$$

از رابطه بالا روابط زیر بدست می آیند:

$$A = P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ (N_{WG} - n_{WG}^{fail}) \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\} \quad (16)$$

$$A = P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ N_{WG} \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) - n_{WG}^{fail} \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\} \quad (17)$$

$$A = P_{WG} \times N_{WG} \times \underbrace{\sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail})}_C - P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ n_{WG}^{fail} \times \sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} f_p(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \right\} \quad (18)$$

$$C = \left(\frac{N_{WG}}{n_{WG}} \right) \times A_{WG}^{N_{WG}-n_{WG}^{fail}} \times (1 - A_{WG}^{n_{WG}^{fail}}) \times \underbrace{\sum_{n_{PV}^{fail}=1}^{N_{PV}} \left\{ \left(\frac{N_{PV}}{n_{PV}} \right) \times A_{PV}^{N_{PV}-n_{PV}^{fail}} \times (1 - A_{PV}^{n_{PV}^{fail}}) \right\}}_D \quad (19)$$

با توجه به بسط دوجمله ای، $D=1$ در نتیجه:

$$A = P_{WG} \times N_{WG} - P_{WG} \times \sum_{n_{WG}^{fail}=1}^{N_{WG}} \left\{ n_{WG}^{fail} \times \left(\frac{N_{WG}}{n_{WG}} \right) \times A_{WG}^{N_{WG}-n_{WG}^{fail}} \times (1 - A_{WG}^{n_{WG}^{fail}}) \right\} \quad (20)$$

E با امید توزیع دوجمله ای بوده که با توجه به رابطه زیر [24]:

$$\sum_{x=0}^n x \times \binom{n}{x} \times p^x \times q^{n-x} = n \times p \quad (21)$$

رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$A = P_{WG} \times N_{WG} \times A_{WG} \quad (22)$$

با تکرار روابط فوق B نیز به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$B = P_{PV} \times N_{PV} \times A_{PV} \quad (23)$$

در نتیجه اثبات می شود که:

$$E[P_{ren}] = N_{WG} \times P_{WG} \times A_{WG} + N_{PV} \times P_{PV} \times A_{PV} \quad (24)$$

۵- مدل سازی تعیین ظرفیت اجزای ریز شبکه های هوشمند

در این بخش ظرفیت بهینه اجزای ریز شبکه هوشمند بطور همزمان مشخص می شود. تابع هدف این مساله مجموع هزینه های مربوط به تعیین ظرفیت بهینه بوده که در ادامه توضیح داده می شود.

۵-۱- طرح مساله تعیین ظرفیت بهینه

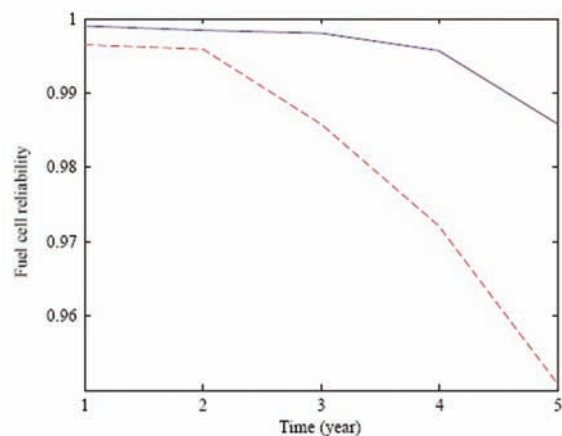
هدف این بخش یافتن اندازه اجزای ریز شبکه هوشمند، یعنی

با ۹۹/۸۹ درصد در نظر گرفته می شود که در مقایسه با توربین های بادی و آرایه های خورشیدی بسیار قابل اطمینان تر می باشد. در نهایت، با فرض تغذیه شدن بار توسط N_{inv} مبدل DC/AC نصب شده به طور موازی، احتمال خروج n_{WG}^{fail} توربین بادی، n_{PV}^{fail} آرایه خورشیدی، و n_{inv}^{fail} مبدل DC/AC از رابطه (۱۲) قابل محاسبه خواهد بود.

$$f_{system}(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}, n_{inv}^{fail}) = f_{ren}(n_{WG}^{fail}, n_{PV}^{fail}) \times \left(\frac{N_{inv}}{n_{inv}^{fail}} \right) \times A_{inv}^{N_{inv}-n_{inv}^{fail}} \times (1 - A_{inv}^{n_{inv}^{fail}}) \quad (12)$$

که در رابطه بالا، A_{inv} نشان دهنده احتمال دسترسی مبدل DC/AC می باشد.

شکل (۳) نیز احتمال دسترسی یک پیل سوختی طی یک دوره ده ساله را نشان می دهد [۳۰]. همان طور که مشاهده می شود، دسترسی پیل سوختی در طول ۵ سال اول (عمر مفید پیل سوختی) عمدتاً بالای ۹۹ درصد می باشد. از این رو در این رساله از خروج اضطراری پیل سوختی صرف نظر شده است.



شکل ۳: قابلیت اطمینان پیل سوختی بر حسب زمان (خط پیوسته: ۵ سال اول، خط چین: ۵ سال دوم) [۲۷].

۴-۳- روش پیشنهادی ارزیابی قابلیت اطمینان

جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم می بایست تمامی وضعیت های ممکن سیستم در نظر گرفته شده و شاخص های قابلیت اطمینان، با توجه به احتمال قرار گرفتن سیستم در هر وضعیت و همچنین میزان بار از دست رفته مربوط به آن وضعیت، محاسبه شود.

چنان که پیش تر نیز بدان اشاره گردید، در این مقاله تنها احتمال خروج توربین های بادی، آرایه های خورشیدی، و مبدل DC/AC در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستمی متشکل از ۱۴ توربین بادی و ۱۹۹ آرایه خورشیدی، لازم است که سیستم برای $6000 = 15 \times 200 \times 2$ وضعیت مختلف مورد بررسی قرار گیرد. به این ترتیب، اگر هدف تحلیل رفتار سالانه سیستم با گام های زمانی یک ساعته باشد، هر سال نیازمند بررسی $5256000 = 8760 \times 6000$ وضعیت خواهد بود. حال اگر بنا بر آن باشد که سیستم فوق با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهینه سازی گردد، و فرض شود که الگوریتم شامل ۳۰ ذره بوده که در ۲۰۰ تکرار به بهینه سازی سیستم می پردازند، لازم است که سیستم مورد نظر برای مدتی برابر با $6000 = 30 \times 200$ سال شبیه سازی و تحلیل شود. انجام محاسبات فوق بسیار زمان بر است (هر چند که زمان انجام این محاسبات در مقایسه با عمر سیستم بسیار کم می باشد) و یافتن یک روش تقریبی که بتواند سیستم بالا را، با دقت کافی، و در زمان کمتری بهینه کند، گزینه ای مطلوب خواهد بود.

با توجه به مطالب بالا، در ادامه یک روش پیشنهادی برای محاسبه

$P_{sell}(t)$ ، t میزان توان فروخته شده به شبکه توزیع در ساعت t و $Price_{buy}(t)$ و $Price_{sell}(t)$ به ترتیب هزینه هر کیلووات ساعت برق خریداری شده از شبکه توزیع و هزینه هر کیلووات ساعت برق فروخته شده به شبکه توزیع در ساعت t است. تابع هدف فوق باید با در نظر گرفتن قیود زیر بهینه گردد:

$$E[ELF] \leq ELF_{max} \quad (32)$$

$$0 \leq N_i \quad (33)$$

$$0 \leq \theta_{pv} \leq \frac{\pi}{2} \quad (34)$$

$$E_{tank}(0) \leq E_{tank}(8760) \quad (35)$$

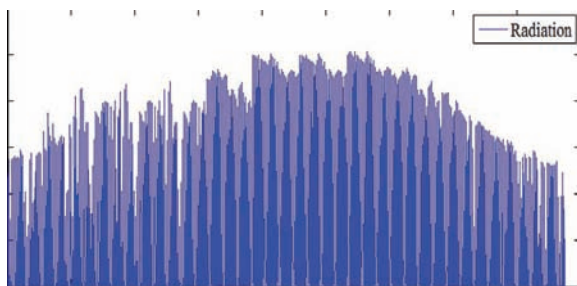
$$P_{sell}(t) \leq N_{TR}(\max) \quad (36)$$

$$P_{buy}(t) \leq N_{TR}(\max) \quad (37)$$

که θ_{pv} زاویه نصب آرایه‌های خورشیدی بوده و قید (۳۵) نیز بیانگر این نکته است که انرژی ذخیره شده در تانک در ابتدای سال نباید کمتر از انرژی اولیه آن باشد. این قید تضمین‌گر آن است که محاسبات قابلیت اطمینان برای بدترین وضع ممکن انجام می‌شوند. $N_{TR}(\max)$ حداکثر ظرفیت ترانس توزیع می‌باشد. در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات 16 (PSO) جهت بهینه‌سازی استفاده شده است.

۶- نتایج شبیه سازی تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزشبکه هوشمند

در این بخش تعیین ظرفیت بهینه سیستم ریزشبکه‌های هوشمند مدل شده محاسبه می‌شود. سیستم فوق با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهینه‌سازی شده است. برای این منظور نرم‌افزاری تحت محیط برنامه‌نویسی MATLAB آماده شده است. داده‌های سیستم شامل اطلاعات تابش و وزش سالیانه مربوط به شهرک اکباتان بوده که با دقت یک نمونه بر یک ساعت دقیقه برداشت شده‌اند. منحنی بار مصرف شهرک اکباتان برای هر فاز از شبکه توزیع دریافت گردیده است. منحنی‌های تابش خورشید، سرعت باد و منحنی بار نرمالیزه شده به صورت ساعتی به ترتیب در شکل‌های (۴) - (۶) نمایش داده شده‌اند. منحنی بار پایه بر اساس منحنی استاندارد IEEE در نظر گرفته شده است [۳۱]. قابل ذکر است جدول (۱) نیز شامل مشخصات نامی تجهیزات سیستم است که مدل آن‌ها در فصل گذشته تشریح شده است. برخی دیگر از ورودی‌های برنامه در جدول (۲) آورده شده‌اند. هزینه قطع بار نیز در حالت پایه با $5/6$ US\$/kWh در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: شدت تابش خورشید در شهرک اکباتان برای مدت یک سال

تعداد توربین‌های بادی، تعداد آرایه‌های خورشیدی، میکرو توربین، باتری و مبدل DC/AC می‌باشد. هزینه‌های سیستم شامل ارزش خالص فعلی 12 (NPC) سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری، سوخت و جایگزینی تجهیزات به اضافه هزینه‌های ناشی از وقفه در تامین بار در طول عمر ۲۰ ساله سیستم، هزینه تجهیزات هوشمند، تشویق‌های مالی جهت شرکت در برنامه‌های پاسخ گویی بار و هزینه خرید و فروش برق با شبکه توزیع می‌باشد. قید مساله نیز بیشینه مجاز برای شاخص قابلیت اطمینان ELF است. البته، شبیه‌سازی سیستم نیز دارای قیودی مانند رعایت بیشینه و کمینه توان و انرژی تولیدی تجهیزات می‌باشد. هزینه خالص فعلی تجهیز i را می‌توان طبق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$NPC_i = N_i \times (CC_i + RC_i \times K_i + O \& MC_i \times PWA(ir, R)) \quad (25)$$

در عبارت فوق، N تعداد (unit) یا ظرفیت (kg یا kW) تجهیز، CC هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (\$/unit)، RC هزینه هر بار جایگزینی (\$/unit)، $O \& MC$ هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (\$/unit) (yr) تجهیز بوده و R نیز طول عمر پروژه (در این مطالعه ۲۰ سال) می‌باشد. ir بهره واقعی 13 که در این مطالعه ۶ درصد در نظر گرفته شده است.

PWA و K نیز به ترتیب فاکتور ارزش فعلی پرداخت‌های سالیانه 14 و ثابت 15 بوده که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$PWA(ir, R) = \frac{(1 + ir)^R - 1}{ir(1 + ir)^R} \quad (26)$$

$$K_i = \sum_{n=1}^N \frac{1}{(1 + ir)^{n \times L_i}} \quad (27)$$

L و N به ترتیب تعداد جایگزینی‌ها و طول عمر مفید تجهیز مربوطه می‌باشند. هزینه از دست رفتن بار را می‌توان طبق رابطه زیر بدست آورد:

$$Cost_{shedd} = LOEE \times C_{shedd} \quad (28)$$

که C_{shedd} برابر است با متوسط ضرر ناشی از قطع هر کیلووات ساعت بار مصرفی (US\$/kWh).

تابع هدف مساله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$OF_{sizing} = \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_{trans}} NPC_{i,j} + \sum_{j=1}^{N_{shedd}} Cost_{shedd,j} + NPC_{trans} + \sum_n NPC_{SA,n} + \sum_n NPC_{incentive,n} + \sum_{j=1}^{N_{buy}} Cost_{buy,j} - \sum_{j=1}^{N_{sell}} Cost_{sell,j} \right\} \quad (29)$$

در عبارت فوق، i نشان‌دهنده اجزای ریزشبکه هوشمند مورد نظر بوده، و N_{year} مدت زمان پروژه بر حسب سال که $NPC_{SA,n}$ ارزش خالص فعلی هزینه مازاد سرمایه‌گذاری تجهیز هوشمند n ام می‌باشد. $\sum NPC_{trans}$ ارزش خالص فعلی هزینه ترانس توزیع بوده و $NPC_{incentive,n}$ ارزش خالص فعلی تشویق مالی تجهیز هوشمند n ام است. NPC_{buy} و NPC_{sell} ارزش خالص فعلی خرید انرژی از شبکه و فروش انرژی به شبکه می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Cost_{buy} = \sum_{t=1}^{8760} P_{buy}(t) \times Price_{buy}(t) \quad (30)$$

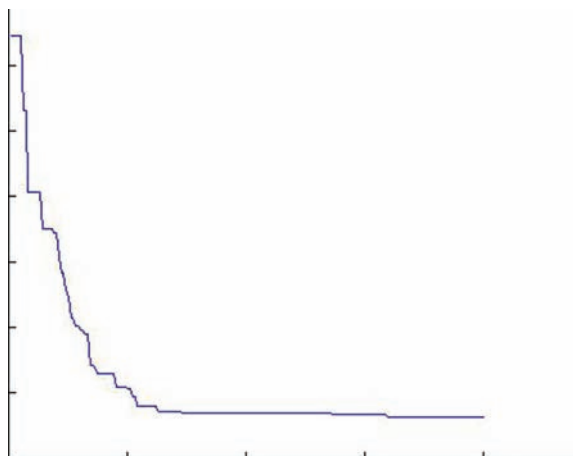
$$Cost_{sell} = \sum_{t=1}^{8760} P_{sell}(t) \times Price_{sell}(t) \quad (31)$$

که $P_{buy}(t)$ میزان توان خریداری شده از شبکه توزیع در ساعت

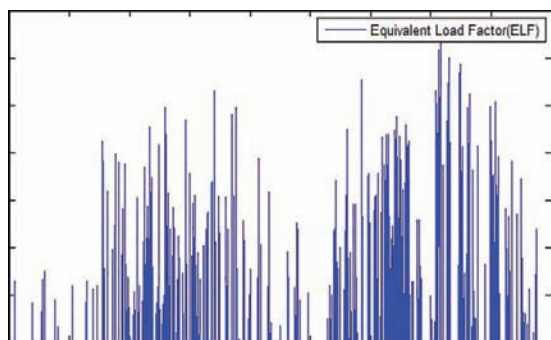
جدول ۴: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشبکه هوشمند

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۲/۹۶	۰/۰۰۸۸۱۵	۵۷/۳۷۲۶	۰/۰۰۸۳۶

که در آن N_{Wind} تعداد بهینه واحدهای توربین بادی، N_{pv} تعداد بهینه پانل‌های خورشیدی، N_{MT} ظرفیت بهینه میکروتوربین، N_{bat} ظرفیت بهینه باتری است.



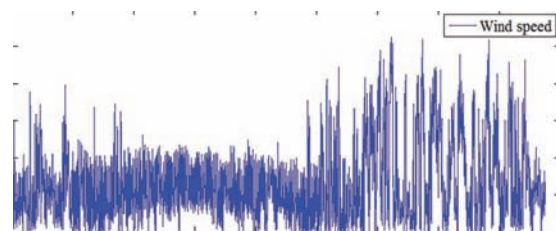
شکل ۷: منحنی همگرایی الگوریتم PSO



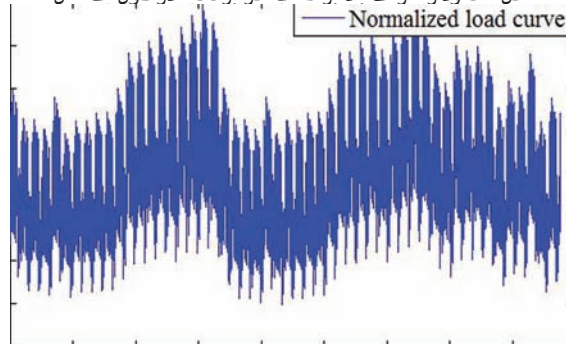
شکل ۸: مقدار ساعت به ساعت ELF

شکل (۸) ضریب قطع معادل (ELF) ریزشبکه هوشمند را نمایش می‌دهد. از آنجا که در ساعات ۲۰۰۰-۳۰۰۰ بار حداکثر بوده و مطابق با شکل (۵) سرعت باد نیز در این بازه زمانی کم می‌باشد لذا در این ساعات ضریب قطع معادل قابل توجه است. همچنین در ساعات ۶۰۰۰-۷۰۰۰ که پیک دیگر بار است مقادیر ضریب قطع معادل بزرگ می‌باشد.

برای مقایسه دقت روش تقریبی با روش دقیق، مدل تقریبی سیستم ریزشبکه هوشمند به ازای ترکیب بهینه بدست آمده از روش دقیق اجرا شده و جواب‌های زیر بدست می‌آید. زمان لازم برای یک بار اجرای مدل تقریبی در این حالت حدود ۰/۲۳ زمان لازم برای اجرای مدل دقیق سیستم است. بدین ترتیب میتوان انتظار داشت که در صورت استفاده از مدل تقریبی جهت بهینه‌سازی سیستم، زمان لازم از ۴۰ ساعت به حدود ۹ ساعت کاهش پیدا کند که کاهش قابل توجهی می‌باشد. نتایج بدست آمده نیز در جدول (۵) نمایش داده شده‌اند که مقایسه آن با نتایج موجود در جدول (۴) نشان دهنده دقت مناسب روش تقریبی پیشنهادی است. ذکر این نکته نیز لازم است که هزینه خالص فعلی سیستم و همچنین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه آن وابسته به ترکیب سیستم بوده و تفاوتی بین مقادیر بدست آمده برای آنها از روش



شکل ۵: نمودار سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه در طول یک سال



شکل ۶: منحنی بار نرمالیزه سالیانه

جدول ۱: مشخصات نامی تجهیزات مورد استفاده در ریزشبکه‌های مورد بررسی

تجهیز	هزینه اولیه (US\$/unit)	هزینه جاری (US\$/unit)	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (US\$/unit-yr)	عمر مفید (سال)	بازدهی (درصد)	دسترسی (درصد)
توربین بادی	۷۵۰۰۰	۴۰۰۰۰	۷۵۰	۲۰	-	۹۶
آرایه خورشیدی	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰	۲۰	-	۹۶
مبدل	۸۰۰	۷۵۰	۸	۱۵	۹۰	۹۹/۸۹
میکروتوربین	۴۰۰	۳۴۰	۲۰	۵	۳۰	۱۰۰
باتری	۵۰۰	۴۰۰	۲۵	۳	۸۵	۱۰۰

جدول ۲: دیگر داده‌های ورودی برنامه

ردیف	ورودی	مقادیر
۱	قیمت سوخت (\$/Mbtu)	۰/۱۲
۲	نرخ تورم	۰/۰۶
۳	عمر پروژه (سال)	۲۰
۴	تعداد جمعیت	۳۰
۵	تعداد تکرار	۲۰۰
۶	ELF_{max}	۰/۰۱

نتایج تعیین ظرفیت اجزای ریزشبکه هوشمند در جدول (۳) و شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. در جدول (۴) شاخص‌های قابلیت اطمینان ریزشبکه هوشمند نشان داده شده است. قابل ذکر است که در این حالت پاسخ گویی بار و رشد بار لحاظ نشده است. زمان لازم برای یک بار اجرای محاسبات بهینه‌سازی حدود ۴۰ ساعت بوده که به نسبت طولانی می‌باشد.

جدول ۳: نتایج تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریزشبکه هوشمند

	N_{Wind}	N_{pv}	N_{bat}	N_{MT}	تلفات (kW)	هزینه ریزشبکه (\$)
ریزشبکه هوشمند	۸۷	۳۷۸۰	۱۰۵۰۰	۲۰۵۰	۲/۲۵*۱۰۳	۸/۱۷۷۷*۱۰۷

جدول ۶: نتایج تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریز شبکه هوشمند
با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱

هزینه ریز شبکه (\$)	تلفات (kW)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	
۸/۳۱۳۲*۱۰ ^۷	۳/۱۲*۱۰ ^۳	۱۰۴۷	۱۰۶۲۱	۳۸۱۵	۹۱	ریز شبکه هوشمند

جدول ۷: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریز شبکه هوشمند
با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۱/۱	۰/۰۰۱۱	۶/۱۱۳۴	۰/۰۰۱۱

اصولاً دو راه برای بهبود قابلیت اطمینان یک سیستم وجود دارد، نخست استفاده از عناصری با قابلیت اطمینان بالاتر، و دوم تغییر ساختار سیستم. در اینجا نیز، یک راه بسیار ساده برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم مورد مطالعه، استفاده از دو مبدل DC/AC به‌طور موازی است که در این وضعیت حد پایین ضریب قطع معادل تا ۰/۰۰۰۰۰۱۲۱ کاهش می‌یابد. برای مشاهده کارایی روش نخست نیز، بهینه‌سازی سیستم با فرض در دسترس بودن تمام اجزای آن انجام شده و نتایج زیر بدست می‌آید (جدول (۸) و (۹)).

جدول ۸: تعیین ظرفیت بهینه اجزای ریز شبکه هوشمند
با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱ و عدم خروج اجزا

هزینه ریز شبکه (\$)	تلفات (kW)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	
۸/۱۱۴۳*۱۰ ^۷	۲/۱۴*۱۰ ^۳	۲۰۲۴	۱۰۲۳۰	۳۶۵۰	۸۷	ریز شبکه هوشمند

جدول ۹: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریز شبکه هوشمند
با قید ضریب قطع معادل ۰/۰۰۰۱ و عدم خروج اجزا

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۰/۲	۰/۰۰۰۱۵۷	۰/۰۷۴۳	۰/۰۰۰۱

۶-۱-۲- بهینه‌سازی بدون قید قابلیت اطمینان

ضرر ناشی از قطع هر کیلووات ساعت برق برای مشترکان خانگی چیزی حدود ۲ تا ۱۲ US\$، و برای مشترکان صنعتی بین ۵ تا ۴۰ US\$ بوده که به‌طور متوسط برابر با ۵/۶ US\$ در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت، هدف از این بخش پیدا کردن نقطه سربه‌سر^{۱۷} هزینه‌های تولید و هزینه‌های عدم تامین بار خواهد بود. انتظار می‌رود که در این نقطه هزینه نهایی^{۱۸} تولید انرژی با متوسط هزینه از دست رفتن بار برابر شود.

برای داشتن درک بهتری از هزینه‌های تامین بار، ترکیب بهینه سیستم بدون در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان، به ازای هزینه از دست رفتن بار ۲ و ۱۲ US\$/kWh (به ترتیب برابر با کمینه و بیشینه هزینه از دست رفتن انرژی برای مشترکان خانگی) محاسبه می‌گردد. نتایج به دست آمده در جدول‌های (۱۰) تا (۱۳) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱۰: ترکیب بهینه سیستم بدون قید قابلیت اطمینان ($C_{loss} = 2US$/kWh$)

هزینه ریز شبکه (\$)	تلفات (kW)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	
۸/۱۴۲۱*۱۰ ^۷	۲/۲۱*۱۰ ^۳	۱۸۷۹	۱۰۲۷۵	۳۵۶۳	۸۷	ریز شبکه هوشمند

دقیق و روش تقریبی وجود ندارد. درواقع تفاوت مدل تقریبی سیستم با مدل دقیق آن تنها در محاسبات قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد.

جدول ۵: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریز شبکه هوشمند

LOLE(hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۲/۱۷	۰/۰۰۸۷۴۲	۵۶/۱۲۵۳	۰/۰۰۸۲۸

نکته جالبی که در جدول (۵) به چشم می‌خورد، مقدار ضریب قطع معادل (ELF) بدست آمده در نقطه بهینه می‌باشد. همان‌طور که پیشتر ذکر گردید، قسمتی از تابع هدف تعریف شده با رابطه (۲۸) نشان‌دهنده عدم رضایت و یا زیان وارد شده به مشترکین در اثر قطع بارشان می‌باشد. علاوه بر تابع هدف، قید (۳۲) نیز بر میزان بار قطع شده اثر گذاشته و میزان آن را محدود می‌کند، در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم در سطح مطلوبی حفظ می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، که در جدول (۵) نیز نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که در نقطه بهینه، قید قابلیت اطمینان سیستم فعال نمی‌شود. در واقع، به علت بالا بودن هزینه‌های از دست رفتن بار در مقایسه با هزینه‌های بهبود قابلیت اطمینان سیستم، افزایش هزینه‌های ساخت، جایگزینی و تعمیر و نگهداری سیستم (در واقع طراحی سیستمی گران‌تر) از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد.

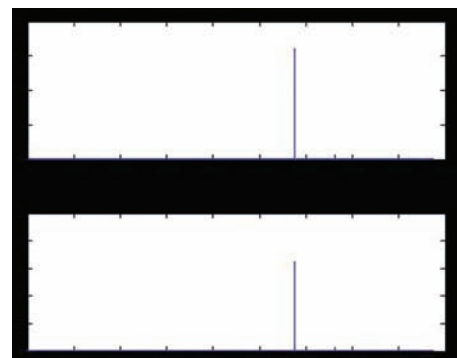
۶-۱-۱- آنالیز حساسیت نسبت به قید قابلیت اطمینان

در این بخش حساسیت سیستم ریز شبکه هوشمند نسبت به این قید ELF بررسی خواهد شد.

۶-۱-۱-۱- قید ضریب قطع بار ۰/۰۰۰۱

قید ضریب قطع معادل برابر با ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده و برنامه اجرا می‌شود، نتایج بدست آمده در جدول‌های (۶) و (۷) نشان داده شده‌اند. علاوه بر افزایش هزینه‌های سیستم نسبت به حالت پایه، مشاهده می‌شود که ELF به دست آمده برابر با ۰/۰۰۱۱ می‌باشد که قید مورد نظر را ارضا نمی‌کند! البته این امر بسیار منطقی بوده و به سادگی قابل توجیه می‌باشد.

مشاهده گردید که، احتمال دسترسی مبدل DC/AC برابر با ۰/۹۹۸۹ است. از طرف دیگر، مبدل DC/AC بصورت سری با بار قرار گرفته است. با توجه به تئوری قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان یک سیستم متشکل از عناصر سری برابر با حاصل ضرب قابلیت اطمینان تک‌تک عناصر آن می‌باشد. در نتیجه، قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی در این هیچگاه نمی‌تواند بیشتر از قابلیت اطمینان مبدل DC/AC گردد. درواقع، کمینه ضریب قطع بار ممکن این سیستم برابر با نرخ خروج مبدل، یعنی ۰/۰۰۱۱ خواهد بود. در شکل (۹) شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم در طول سال (با قید ضریب قطع بار معادل ۰/۰۰۰۱) نشان داده شده است.



شکل ۹: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریز شبکه هوشمند در طول سال
(با قید ضریب قطع بار معادل ۰/۰۰۰۱)

سیستم کمتر شده و در صورت تامین همه بار سیستم (سیستم ۱۰۰ درصد قابل اطمینان)، این دو مقدار با یکدیگر برابر می‌شوند که البته این امر نیز منطقی می‌باشد. در واقع تحت شرایطی که افزایش قابلیت اطمینان سیستم از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد، هزینه انجام شده جهت بهبود قابلیت اطمینان سیستم از ارزش بار تامین بیشتر می‌شود، در نتیجه متوسط هزینه تولید انرژی سیستم افزایش می‌یابد.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Exponent law
- 2 Loss of Load Expectation
- 3 Loss of Energy Expectation
- 4 Expected Energy Not Supplied
- 5 Loss of Power Supply Probability
- 6 Equivalent Loss Factor
- 7 Forced Outage Rate
- 8 Mean Time To Failure
- 9 Failure rate
- 10 Mean Time To Repair
- 11 Availability
- 12 Net Present Value
- 13 Real interest rate
- 14 Annual Payment Present Worth
- 15 Single payment present worth
- 16 Particle swarm optimization (PSO)
- 17 Break-even point
- 18 Marginal cost

مراجع

- [1] D. N. Lut, A. K. Raji, Optimal sizing of hybrid fuel cell-super-capacitor storage system for off-grid renewable applications, Energy, Pages 530-540, 2019.
- [2] G. Human, G. v. Schoor, K. R. Uren, Power management and sizing optimisation of renewable energy hydrogen production systems, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Pages 155-166, 2019.
- [3] I. Padrón, D. Avila, G. N. Marichal, J. A. Rodríguez, Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems to supplied energy to Autonomous Desalination Systems in two islands of the Canary Archipelago, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pages 221-230, 2019.
- [4] J. L. Duchaud, G. Notton, C. Darras, C. Voyant, Multi-Objective Particle Swarm optimal sizing of a renewable hybrid power plant with storage, Renewable Energy, Pages 1156-1167, 2019.
- [5] F. S. Abu-Mouti, M. E. El-Hawary, Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm, IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 26, Pages 2090-2101, 2011.
- [6] S. Bahramirad, H. Daneshi, Optimal sizing of smart grid storage management system in a microgrid, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Pages 1-7, 2012.
- [7] Z. Iverson, A. Achuthan, P. Marzocca, D. Aidun, Optimal design of hybrid renewable energy systems (HRES) using hydrogen storage technology for data center applications, Renewable Energy, Vol. 52, Pages 79-87, 2013.
- [8] J. Lagorse, D. Paire, A. Miraoui, Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by hybrid system using fuel cell, PV, and battery, Renewable Energy, Vol. 34, Pages 683-691, 2009.
- [9] C. H. Li, X. J. Zhu, S. Sui, M. R. Hu, Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology, Renewable Energy, Vol. 34, Pages 815-826, 2009.
- [10] A. Mellit, S. A. Kalogirou, M. Drif, Application of neural net-

« ادامه در صفحه ۳۴ »

جدول ۱۱: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریز شبکه هوشمند ($C_{loss} = 2US\$/kWh$)

LOLE (hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۱۲/۴۲	۰/۰۲۵۱۷	۱۶۱/۷۷۵۳	۰/۰۲۲۱۶

جدول ۱۲: ترکیب بهینه سیستم بدون قید قابلیت اطمینان ($C_{loss} = 12US\$/kWh$)

هزینه ریز شبکه (\$)	تلفات (kWh)	N_{MT}	N_{bat}	N_{PV}	N_{Wind}	
۸/۱۹۱۲۸۱۰۷	۲/۲۷۸۱۰۲	۲۰۷۴	۱۰۵۲۰	۳۷۸۰	۸۹	ریز شبکه هوشمند

جدول ۱۳: شاخص‌های قابلیت اطمینان ریز شبکه هوشمند ($C_{loss} = 12US\$/kWh$)

LOLE (hr/yr)	LPSP	LOEE (MWh/yr)	ELF
۱/۰۸	۰/۰۰۱۸۱۷	۶/۳۷۲	۰/۰۰۱۵۷۴

چنان‌که مشاهده می‌شود در صورت برابر بودن هزینه از دست رفتن بار با $2US\$/kWh$ ، تامین حدود ۹۷/۵ درصد از بار سیستم توجیه‌پذیر است. در حالی‌که با رسیدن هزینه از دست رفتن بار به $12US\$/kWh$ ، این مقدار به بیش از ۹۹/۸ درصد می‌رسد. جدول (۱۴)، نتایج مقایسه انجام شده بین متوسط هزینه‌های سیستم را نشان می‌دهد. در این جدول منظور از هزینه متوسط تولید انرژی، نسبت بین هزینه‌های انجام شده جهت تولید انرژی به کل بار تامین شده می‌باشد. منظور از هزینه متوسط سیستم نیز نسبت بین مجموع هزینه‌های تولید انرژی و عدم‌تامین بار به کل بار سیستم می‌باشد.

جدول ۱۴: متوسط هزینه‌های ۲۰ ساله سیستم

ELF	هزینه متوسط تولید انرژی (US\$/kWh)	هزینه متوسط سیستم (US\$/kWh)	هزینه از دست رفتن بار (US\$/kWh)	ELF _{max}
۰/۰۲۲۱۶	۰/۴۴۰۹	۰/۴۵۷۴	۲	۱
۰/۰۰۸۸۳۶	۰/۴۶۰۰	۰/۴۸۳۸	۵/۶	۱
۰/۰۰۱۵۷۴	۰/۴۸۳۷	۰/۴۹۵۲	۱۲	۱
۰/۰۰۱۱	۰/۵۰۰۳	۰/۵۰۳۲	۵/۶	۰/۰۰۰۱

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله از الگوریتم PSO برای اندازه‌یابی بهینه یک سیستم میکرو شبکه هوشمند، متشکل از واحدهای تولید کننده توربین بادی و آرایه خورشیدی، میکروتوربین و سیستم ذخیره‌سازی باتری استفاده می‌شود. داده‌های وزش و تابش مورد استفاده مربوط به نواحی شمال غرب ایران می‌باشد. هدف از بهینه‌سازی کمینه کردن هزینه‌های سیستم طی یک دوره کارکرد ۲۰ ساله با در نظر گرفتن قیود فنی و قابلیت اطمینان می‌باشد. با توجه به پیچیدگی و بزرگی سیستم مورد مطالعه، انجام محاسبات قابلیت اطمینان آن بسیار طولانی و وقت‌گیر می‌باشد. در این مقاله یک مدل تقریبی برای انجام محاسبات قابلیت اطمینان سیستم پیشنهاد شده و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به کارگیری این روش در عین داشتن دقت بالا، باعث کاهش چشمگیر در زمان و حجم محاسبات می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قابلیت اطمینان سیستم و یا افزایش هزینه بار از دست رفته، بر متوسط هزینه‌های سیستم افزوده می‌شود که با توجه به شرایط فرض در این مقاله این امر منطقی می‌باشد. نکته دیگر آن‌که در نقطه سربه‌سر اقتصادی متوسط هزینه سیستم از متوسط هزینه تولید انرژی بیشتر است. همچنین، در صورت محدود شدن شرایط سیستم، در اثر اعمال قید قابلیت اطمینان، اختلاف بین متوسط هزینه تولید انرژی و متوسط هزینه



مقاله علمی-ترویجی

آخرین دستاوردهای کنترل گلوکز پلاسمای خون در بیماران دیابتی با استفاده از گوشی‌های هوشمند

■ سحر دولت آبادی/ کارشناسی ارشد مهندسی برق/ گرایش کنترل/ موسسه آموزش عالی خراسان/ sahar.dolatabadi71@khorasan.ac.ir
■ علی کارساز/ استادیار/ مهندسی برق/ گروه کنترل/ موسسه آموزش عالی خراسان/ karsaz@khorasan.ac.ir

چکیده

بیماری دیابت یکی از بیماری‌های شایع در زندگی بشر امروز بوده که فرآیند تشخیص و درمان آن با چالش‌های متعددی روبرو است. هدف از کنترل گلوکز خون در بیماران دیابتی، نگه‌داشتن سطح گلوکز پلاسمای خون در حد طبیعی خود است. لوزالمعده در بدن شخص بیمار دیابتی نوع یک، توانایی تولید انسولین را نداشته از این رو بیمار نیازمند تزریق بیرونی انسولین جهت جذب گلوکز توسط سلول‌ها است. انجام این مهم با پیشرفت‌های صورت پذیرفته در مدل‌سازی سیستم برهم‌کنش گلوکز-انسولین و ارزیابی کنترل‌های مقاوم حلقه بسته در طول چند دهه گذشته منجر به ساخت پمپ تزریق خودکار انسولین یا لوزالمعده مصنوعی شده است. همچنین آخرین دستاوردهای کنترلی در این حوزه بر روی گوشی‌های هوشمند امروزی جهت نمایش و کنترل سطح گلوکز پلاسمای خون و تزریق خودکار انسولین توسط یک پمپ نصب شده بر روی بدن بیمار محقق شده است.

کلمات کلیدی: بیماری دیابت، مدل‌سازی ریاضی سیستم گلوکز-انسولین، کنترل حلقه بسته دیابت، لوزالمعده مصنوعی، گوشی‌های هوشمند کنترل قند خون.

The Latest Achievements of Blood Glucose Level Control in Diabetic Patients via Intelligent Mobile Phones

■ Sahar Dolatabadi/ M.Sc. Electrical and Bioelectric Engineering Department, Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran./ sahar.dolatabadi71@khorasan.ac.ir

■ Ali Karsaz/ Assistant Professor, Electrical and Bioelectric Engineering Department, Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran./ karsaz@khorasan.ac.ir

Abstract:

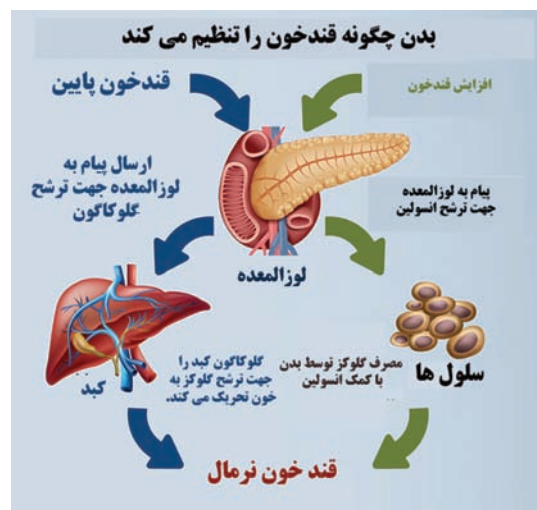
Diabetes is one of the important issues in today's human life in which its diagnostic and treatment process has several challenges. The blood glucose level stabilization to a normal level is the main purpose of the glucose control for diabetic patients. In type one diabetic patient, the ability to produce insulin by the pancreas is destroyed so the diabetic patients need to take externally insulin injection. To this end, some glucose-insulin modelling developments and close-loop robust control algorithms have been proposed over the last decades, lead to manufacturing automatic insulin injection pump or artificial pancreas. Also, the latest control technologies in this field are performed via the intelligence mobile phones for monitoring and control the blood glucose level and automatic insulin injection using an installed pump.

Keywords: Diabetic patient, Glucose-insulin mathematical model, Diabetic close-loop control, Artificial pancreas, Intelligence mobile phones for blood glucose control.

۱- مقدمه

دیابت^۱ یکی از شایع‌ترین و خطرناک‌ترین بیماری‌های شناخته شده حال حاضر دنیا است که به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و یا توسعه‌یافته جهان در حال گسترش است. در حال حاضر ۴۱۵ میلیون نفر از افراد بزرگسال بین سنین ۲۰ تا ۷۹ سال در سراسر دنیا مبتلا به بیماری دیابت هستند بر اساس پیش‌بینی دانشمندان این رقم تا سال ۲۰۴۰ به ۶۴۳ میلیون نفر خواهد رسید [۱]. با وجود این آمار نگران‌کننده، شواهد نشان می‌دهد که تشخیص زودهنگام و همچنین درمان به‌موقع این بیماری می‌تواند از پیشرفت آن جلوگیری کند [۲]. اما متأسفانه علی‌رغم گستردگی شیوع این بیماری هنوز یک روش قطعی به‌منظور ریشه‌کن کردن و از بین بردن آن در دنیا شناخته نشده است هر چند که روش‌های مختلفی جهت تشخیص و کنترل آن در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

دیابت یک اختلال متابولیکی (سوخت‌وساز) در بدن و از جمله شایع‌ترین بیماری‌های مزمن در جامعه مدرن امروزی محسوب می‌شود. در افراد مبتلا به دیابت، توانایی تولید انسولین توسط لوزالمعده از بین می‌رود و یا بدن در برابر انسولین مقاوم شده و بنابراین انسولین تولیدی نمی‌تواند عملکرد طبیعی خود را انجام دهد. محدوده طبیعی سطح قند خون در بدن شخص سالم، ۱۱۰-۷۰ میلی‌گرم بر دسی‌لیتر و یا ۶-۴ میلی‌مول بر لیتر است [۱]. در بیماری دیابت، سرعت و توانایی بدن در سوخت‌وساز کامل گلوکز خون کاهش می‌یابد. از این رو میزان قند خون افزایش یافته که از آن به عنوان هایپرگلیسمی^۲ یاد می‌شود. در صورت افزایش دراز مدت قند خون در بدن، عوارض جانبی طولانی مدتی همچون نابینایی، بیماری‌های کلیوی و بیماری‌های قلبی-عروقی ایجاد می‌گردد. لذا افراد مبتلا به دیابت نیاز به نظارت مداوم قند خون دارند [۴].



شکل ۱: نحوه عملکرد بدن در تنظیم سطح گلوکز خون. کاهش قند خون با ترشح انسولین توسط لوزالمعده و افزایش قند خون با ترشح گلوکاگون توسط کبد

علاوه بر هورمون انسولین، هورمون گلوکاگون^۳ نیز در تنظیم مقدار قند خون مؤثر است. این هورمون برعکس انسولین عمل می‌کند [۵]. به‌طوری‌که با کاهش گلوکز خون، ترشح گلوکاگون افزایش یافته و برعکس انسولین، موجب تجزیه گلیکوژن و افزایش گلوکز خون جهت دستیابی به سطح طبیعی می‌گردد [۵]. کبد به‌عنوان یک سیستم بافتری مهم برای گلوکز خون عمل می‌کند. به این معنی که هنگامی که سطح گلوکز خون به دنبال یک وعده غذا بالا می‌رود، میزان ترشح انسولین نیز افزایش می‌یابد حدود ۲/۳ گلوکز جذب شده از روده

بلافاصله به گلیکوژن تبدیل شده و در کبد ذخیره می‌شود. در ساعات بعد که غلظت گلوکز خون و نیز ترشح انسولین کاهش می‌یابد، کبد گلیکوژن را تجزیه و به گلوکز تبدیل می‌کند [۶]. شکل (۱) نحوه عملکرد بدن در تنظیم قند خون به کمک لوزالمعده و کبد را در دو وضعیت افزایش و یا کاهش قند خون نشان می‌دهد [۷].

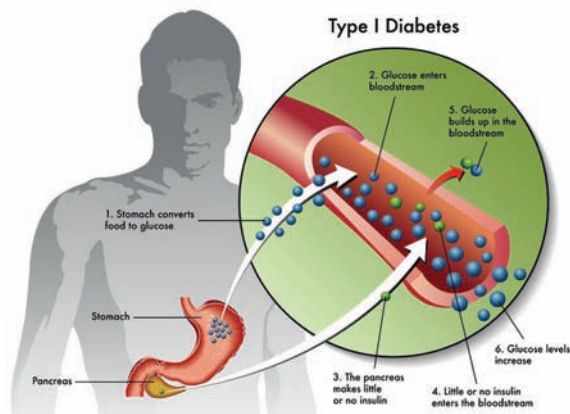
بخش‌های مختلف این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: انواع مختلف دیابت در بخش ۲ بررسی می‌گردد در بخش ۳ به موضوع عوارض ناشی از بیماری دیابت پرداخته می‌شود برخی از کاربردی‌ترین مدل‌های ریاضی ارائه شده برای سیستم تنظیم گلوکز-انسولین و به همراه روش‌های کنترلی ارائه شده در بخش ۴ بیان شده است و در نهایت در بخش ۵ به تشریح یک لوزالمعده مصنوعی و معرفی نرم‌افزار قابل بکارگیری توسط گوشی‌های هوشمند در نمایش، کنترل و اعلام سطوح مختلف هشدار کاهش یا افزایش قند پرداخته می‌شود.

۲- انواع دیابت

دیابت انواع مختلفی دارد که از حیث علت ابتلا و درمان با یکدیگر تفاوت دارند بیماری دیابت به سه دسته عمده طبقه‌بندی می‌شود: دیابت نوع یک^۴، دیابت نوع دو^۵ و دیابت حاملگی^۶.

۲-۱- دیابت نوع یک

دیابت نوع یک، دیابت وابسته به انسولین یا دیابت جوانی نامیده می‌شود که به‌طور معمول قبل از ۳۰ سالگی رخ می‌دهد. این نوع دیابت در نتیجه عوامل ژنتیکی، محیطی و ایمونولوژیک ایجاد می‌گردد. دیابت نوع یک از طریق تخریب خود ایمنی سلول‌های بتا در لوزالمعده ایجاد شده و موجب از دست رفتن تولید انسولین توسط این سلول‌ها می‌گردد. در افرادی که از نظر ژنتیکی مستعد هستند، در بدو تولد توده سلول‌های بتا طبیعی بوده اما با گذشت زمان و افزایش سن، تخریب خود ایمنی در بدن صورت گرفته و از تعداد سلول‌های بتا کاسته می‌شود. این فرایند تخریب خود ایمنی توسط تحریکات عفونی یا محیطی آغاز می‌شود. در واقع فرد مبتلا به دیابت نوع یک، برای ادامه حیات نیاز به تزریق مداوم انسولین دارد [۸].



شکل ۲: تخریب سلول‌های بتا و عدم توانایی تولید انسولین توسط لوزالمعده در بیماران دیابت نوع یک [۹]

۲-۲- دیابت نوع دو

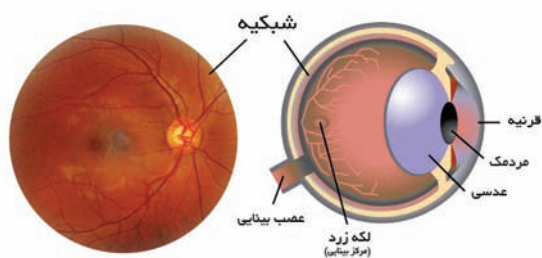
دیابت نوع دو از شایع‌ترین نوع دیابت است و ۸۵ تا ۹۵ درصد از افراد دیابتی را شامل می‌شود دیابت نوع دو، دیابت غیر وابسته به انسولین یا دیابت بزرگسال و یا دیابت مقاوم به انسولین نامیده می‌شود که در سنین بالای ۴۱ سال رخ می‌دهد. دیابت نوع دو به کاهش حساسیت بافتی نسبت به انسولین یا مقاومت نسبت به عمل

۲-۳-کتواسیدوز دیابتی (DKA)

کتواسیدوز دیابتی در اثر کمبود نسبی یا مطلق انسولین و افزایش سطح هورمون‌های مخالف آن (کتوکولامین^{۱۲}، گلوکاگون، هورمون رشد و کورتیزول^{۱۳}) ایجاد می‌شود. این تغییرات هورمونی سبب تشدید حالت کاتابولمیک^{۱۴} و افزایش تولید گلوکز در کبد و کلیه (با مکانیسم گلیکوزنولیز^{۱۵} و گلوکونئوژنز^{۱۶})، کاهش مصرف گلوکز توسط بافت‌های محیطی، لیپولیز (تجزیه چربی خون) و بروز کتواسیدوز می‌شود. علائم شایع آن شامل کم‌آبی شدید بدن، دل‌درد، افزایش کتون^{۱۷}، اسیدوز، خواب‌آلودگی و در نهایت کما و بدحالی شدید است.

۳-۳-رتینوپاتی دیابتی (عوارض چشمی دیابتی)

دیابت علت اصلی نابینایی در سنین ۲۰ تا ۷۴ سالگی در ایالات متحده به شمار می‌رود. تعداد افراد مبتلا به بیماری رتینوپاتی دیابتی از ۱۲۶/۶ میلیون نفر در سال ۲۰۱۰ به ۱۹۱ میلیون نفر در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید. هم‌چنین در بازه‌ی زمانی مذکور تعداد افراد مبتلا به رتینوپاتی دیابتی که در معرض نابینایی قرار دارند از ۳۷/۳ میلیون نفر به ۵۶/۳ میلیون نفر خواهند رسید [۱۴]. در بیماری دیابت با افزایش قند خون، رگ‌های بسیار ریز داخل شبکیه تخریب می‌شوند و این خود باعث تجمع خون و توده‌های چربی در شبکیه می‌گردد. هم‌چنین به دلیل از بین رفتن رگ‌های خونی که وظیفه خون‌رسانی به محیط شبکیه را بر عهده دارند، رگ‌های جدید و غیرطبیعی در شبکیه تشکیل می‌شود. رتینوپاتی دیابتی در دو نوع کلی تکثیری^{۱۸} (PDR) و غیرتکثیری (NoDR) طبقه‌بندی می‌شود. رتینوپاتی غیرتکثیری یا زمینه‌ای نخستین مرحله DR می‌باشد که در آن رگ‌های تخریب شده شروع به نشت خون و چربی در شبکیه می‌کنند [۲۸، ۲۹]. PDR اثرات جدی‌تری نسبت به NoDR برای بیمار ایجاد می‌نماید به دلیل اینکه به سرعت وارد مرحله‌ی پیشرفته شده و بینایی را کاهش می‌دهد [۱۵-۱۶]. شکل (۴) ساختار چشم به همراه نمایشی از یک تصویر شبکیه چشم را نشان می‌دهد.



شکل ۴: ساختار چشم به همراه یک تصویر شبکیه چشم شخص بیمار
شکل (۵) دید یک فرد سالم را در مقایسه با دید یک فرد مبتلا به رتینوپاتی دیابتی نشان می‌دهد.

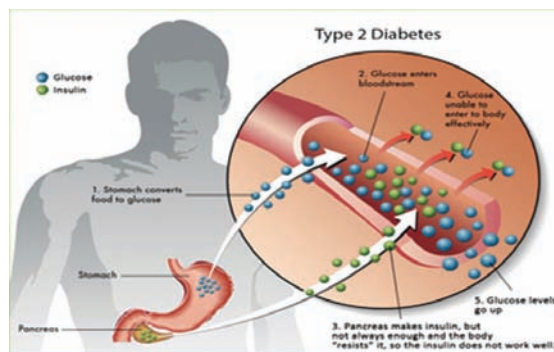


شکل ۵: (الف) دید شخص با چشم سالم، (ب) دید شخص مبتلا به بیماری دیابت چشمی [۲۹]

۴-۳-نفروپاتی دیابتی (عوارض کلیوی دیابتی)

نفروپاتی دیابتی مهم‌ترین عامل ابتلا و مرگ‌ومیر وابسته به دیابت به شمار می‌رود. به‌طور تقریبی ۲۵ درصد بیمارانی که سالیانه در ایالت

انسولین گفته می‌شود. در حالت طبیعی انسولین به گیرنده‌های خاصی در سطح سلول متصل می‌شود و مجموعه‌ای از واکنش‌های مربوط به متابولیسم گلوکز را در سلول آغاز می‌کند. در دیابت نوع دو سرعت این واکنش‌های داخل سلولی کاهش می‌یابد و در نتیجه کارایی انسولین در تحریک بافت‌ها برای جذب گلوکز از خون، کاهش پیدا می‌کند لذا فرد مبتلا به دیابت نوع دو است و به قرص‌های پایین آورنده‌ی قند خون نیاز دارد. شکل (۳) مقاومت بدن در برابر انسولین تزریق شده توسط لوزالمعده را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۳: مقاومت بدن در برابر انسولین تزریق از طریق لوزالمعده در دیابت نوع دو [۹]
تحقیقات نشان می‌دهند که عوامل ژنتیکی در بروز این بیماری نقش اساسی دارند. افرادی که یکی از والدین آن‌ها مبتلا به دیابت نوع دو می‌باشند، بی‌تردید در معرض خطر ابتلا به دیابت قرار دارند [۱۰]. در دیابت نوع یک سیستم ایمنی بدن به اشتباه به سلول‌های پانکراس که مسئول تولید انسولین هستند، حمله کرده و آن‌ها را تخریب می‌کند. در دیابت نوع دو پانکراس تحت حمله قرار نگرفته و معمولاً انسولین کافی تولید می‌کند اما به دلایل متعدد بدن توانایی استفاده موثر از این انسولین را ندارد [۱۱].

۲-۳-دیابت حاملگی

دیابت حاملگی به هرگونه اختلال در جذب گلوکز پلاسمای خون در طول دوران بارداری اطلاق می‌شود. افزایش قند خون در دوران بارداری به علت ترشح هورمون‌های جفتی صورت می‌پذیرد. امروزه برای زنان بارداری که یک یا چند معیار شامل: سن بالای ۲۵ سال، سن زیر ۲۵ سال و چاقی و یا سابقه فامیلی مثبت از نظر دیابت در میان بستگان درجه یک را دارند، توصیه می‌گردد که آزمون‌های غربال‌گری انتخابی را بین هفته ۲۴ تا ۲۸ حاملگی انجام دهند. سطح گلوکز خون زنان مبتلا به دیابت حاملگی پس از زایمان به حد طبیعی بر می‌گردد [۱۲].

۳-عوارض دیابت

از جمله عوارض مهم دیابت می‌توان به موارد هیپوگلیسمی^۷، کتواسیدوز دیابتی^۸، رتینوپاتی^۹، نفروپاتی دیابتی^{۱۰}، نوروپاتی دیابتی^{۱۱} و دیابتی اشاره نمود [۱۳].

۳-۱-هیپوگلیسمی

هیپوگلیسمی هنگامی که غلظت گلوکز خون به کمتر از ۵۰ تا ۶۰ میلی گرم بر دسی لیتر یا ۵/۲ تا ۵/۳ میلی مول بر لیتر برسد، گفته می‌شود. علت آن ممکن است مصرف بیش از حد انسولین یا قرص‌های ضد دیابتی خوراکی، مصرف غذای بسیار کم یا فعالیت‌های بدنی شدید باشد. هیپوگلیسمی در هر ساعت از شبانه‌روز ممکن است اتفاق بیفتد ولی به‌طور معمول قبل از وعده‌های غذایی احتمال رخداد بالاتری دارد، به‌خصوص اگر مصرف وعده‌های غذایی به تعویق بیفتد یا فرد از میان وعده‌ها استفاده نکند.

$$\dot{G}(t) = -K_{xgi}I(t)G(t) + \frac{T_{gh}}{V_g} \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt}(t) = -K_{xi}I(t) + \frac{T_{igmax}}{V_i}f(G(t - \tau_g)) + u(t) + d_I(t) \quad (2)$$

$$f(G) = \frac{(\frac{G}{G^*})^\gamma}{1 + (\frac{G}{G^*})^\gamma} \quad (3)$$

در روابط فوق، $G(t)$ و $I(t)$ به ترتیب مبین میزان گلوکز و انسولین پلاسماي خون و تابع غیرخطی $f(G)$ مدل سازی تأثیر تأخیری افزایش سطح گلوکز خون تا تزریق انسولین لوزالمعده می باشد. $u(t)$ و $d(t)$ به ترتیب به عنوان ورودی کنترل و اختلالات سیستم گلوکز-انسولین در نظر گرفته می شوند. جدول (۱) پارامترهای مدل غیرخطی تأخیری پالمبو را توصیف می کند. هدف از قانون کنترلی، نگه داشتن سطح گلوکز خون در سطح طبیعی می باشد که از طریق تزریق انسولین داخل رگ امکان پذیر است [۲۳].

جدول ۱: پارامترهای مدل سازی سیستم گلوکز-انسولین براساس مدل تأخیری پالمبو ارائه شده در سال ۲۰۰۷ [۲۳]

پارامتر	تعریف
$G(t)$	غلظت گلوکز خون (mM)
$I(t)$	غلظت انسولین موجود در پلاسما خون (pM)
V_g	نرخ آشکار توزیع گلوکز پلاسما (L/kgBW)
K_{xi}	نرخ ناپدید شدن انسولین مرتبه اول (min^{-1})
T_{igmax}	حداکثر نرخ ترشح انسولین (min^{-1} (pmol/kgBW))
V_i	نرخ آشکار توزیع انسولین (L/kgBW)
K_{xgi}	نرخ جذب گلوکز خون وابسته به انسولین توسط بافت ها ($\text{min}^{-1}\text{pM}^{-1}$)
T_{gh}	شاخص تعادل میان گلوکز کبدی و گلوکز مستقل (min^{-1} (mmol/kgBW))
τ_g	تأخیر زمانی موجود در ترشح انسولین از پانکراس (min)
$u(t)$	نرخ انسولین تزریقی در هر دقیقه (pM/min)
G^0	میزانی از گلوکز پلاسما که ترشح انسولین به نیمی از مقدار ماکزیمم رسیده (mM)
γ	توانایی عکس العمل پانکراس در عملکرد گلوکز موجود در پلاسما

۴-۲- روش های کنترلی در تنظیم سطح قند خون

هم زمان با توسعه روش های مدل سازی تنظیم گلوکز-انسولین در بیماران دیابتی، روش های کنترلی متعددی توسعه و گسترش یافتند که در ادامه به شکل خلاصه به برخی از مهم ترین این روش ها اشاره می گردد:

الف- روش کنترل فازی-PID [۲۴]

علاوه بر بکارگیری روش های کنترل مبتنی بر PID کلاسیک، در سال های اخیر روش های تلفیقی با استفاده از کنترل کننده های PID و منطق فازی و در حضور اغتشاش سیستم و عدم قطعیت پارامتری، موفق به تنظیم سطح گلوکز خون در بیماران مبتلا به دیابت شده اند. کنترل کننده فازی-Fuzzy-PID ارائه شده شامل یک کنترل کننده PID کلاسیک و یک کنترل کننده منطق فازی جهت تنظیم پارامترهای کنترل PID می باشد. در این روش کنترلی پارامترهای کنترل کننده PID اعم از K_d , K_i , K_p در حضور اغتشاشات ورودی، عدم قطعیت پارامتری، تأخیر و اختلالات سیستم به صورت آنلاین توسط کنترل منطق فازی تنظیم شده است [۲۴].

متحدۀ آمریکا به علت بیماری کلیوی پیشرفته به دیالیز یا پیوند کلیه نیاز پیدا می کنند، افراد دیابتی می باشند. افراد مبتلا به دیابت نوع دو در عرض ۱۰ سال پس از تشخیص دیابت به بیماری کلیوی گرفتار می شوند. درمان مطلوب این عارضه، پیشگیری به کمک کنترل قند خون هست.

۳-۵- نوروپاتی (پای دیابتی)

نوروپاتی دیابتی یکی دیگر از عوارض شایع دیابت است که به دلیل آسیب دیدگی های عصبی ناشی از دیابت به وجود می آید. یکی از عوارض این بیماری فقدان حس در پاها می باشد که منجر به آسیب دیدن پا می گردد و بیمار متوجه این آسیب دیدگی نمی شود از این رو این بیماری، با نام پای دیابتی نیز شناخته می شود.

۳-۶- بیماری های قلبی-عروقی

در بیماران مبتلا به دیابت نوع یک و دو شیوع بیماری های قلبی-عروقی افزایش می یابد. انجمن قلب آمریکا دیابت را هم ردیف سیگار کشیدن، به عنوان یک عامل خطر ساز عمده در ایجاد بیماری های قلبی-عروقی در نظر گرفته است. به عنوان مثال به دنبال کنترل تمامی عوامل خطر ساز شناخته شده قلبی-عروقی، باز هم دیابت نوع دو میزان مرگ قلبی-عروقی را دو برابر در مردان و چهار برابر در زنان افزایش می دهد.

۳-۷- عفونت

عفونت در میان مبتلایان به دیابت از شیوع و شدت بیشتری برخوردار است. دلایل این افزایش عبارت اند از ناهنجاری های ایمنی با واسطه سلولی و کاهش رگ سازی هستند. شایع ترین تغییرات پوستی دیابت شامل زخمی شدن پوست و تأخیر در بهبود زخم می باشند. میزان ابتلا و مرگ و میر ناشی از عوارض مرتبط با دیابت را می توان با اجرای اقدامات کمکی دایمی و به موقع، به میزان زیادی کاهش داد.

۴-۴- مدل سازی سیستم گلوکز انسولین، روش های کنترل حلقه بسته

در طول چند دهه گذشته تلاش های زیادی جهت توسعه دانش کنترل سطح گلوکز خون بیماران دیابتی صورت گرفته است. مهم ترین بخش از این تلاش ها به موضوع مدل سازی سیستم بر هم کنش گلوکز-انسولین به دهه هشتاد میلادی باز می گردد. پس از آن و در دهه نود میلادی نظریه کنترل خودکار تزریق انسولین به وسیله یک پمپ تزریق خارجی مطرح گردید در ادامه به برخی از مهم ترین مدل سازی های سیستم گلوکز و انسولین اشاره شده سپس روش های کنترل حلقه بسته در طول چند دهه گذشته مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۱- مدل ریاضی گلوکز-انسولین

برخی از مهم ترین مدل های ارائه شده جهت توصیف سیستم بر هم کنش گلوکز-انسولین در بیماران دیابتی نوع یک شامل، مدل حداقل برگمن در سال ۱۹۸۱ [۱۹]، مدل سورنسن در سال ۱۹۸۵ [۲۰]، مدل کانگ در سال ۲۰۰۶ [۲۱] و مدل دالامن در سال ۲۰۰۷ [۲۲] می باشند. در سال های اخیر مدل های غیرخطی تأخیر دار بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. به عنوان مثال مدل ریاضی ارائه شده توسط پالمبو و همکاران در سال ۲۰۰۷ یکی از معروف ترین و پر کاربردترین مدل های ارائه شده است [۲۳]. معادلات دیفرانسیل براساس مدل غیرخطی تأخیر دار پالمبو به صورت زیر قابل بیان است:

ب- روش کنترل شبه خطی سازی و ESDRE^{۱۹} [۲۵].

در این روش، با استفاده از روش شبه خطی سازی بر روی مدل ریاضی غیرخطی تاخیر دار پالمبو، سطح گلوکز خون بیماران مبتلا به دیابت کنترل می گردد. سیستم غیرخطی در روش شبه خطی سازی به صورت یک سیستم خطی که در آن ماتریس حالت سیستم به متغیرهای حالت آن وابسته می باشد، در نظر گرفته می شود. روش جدید ارائه شده برای کنترل بهینه سیستم های غیرخطی تاخیری موسوم به ESDRE می تواند خروجی سیستم را به مقدار مطلوب برساند [۲۵].

ج- روش کنترل تطبیقی [۲۶].

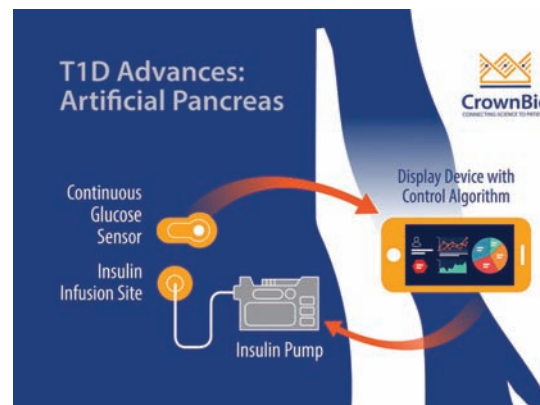
روش کنترل تطبیقی مدل مرجع با پیش بین اسمیت برای تنظیم قند خون در یک بیمار دیابت نوع یک، بر اساس مدل ریاضی دالامن ارائه شده است. کنترل تطبیقی مدل مرجع یکی از انواع کنترل کننده های تطبیقی هست که در این روش رفتار مطلوب فرایند از طریق یک مد مرجع مشخص می گردد. در اینجا اختلاف میان خروجی سیستم و خروجی مدل مرجع به عنوان خطا در نظر گرفته شده است. در این کنترل کننده از روش پیش بین اسمیت برای دفع اغتشاشات و تأخیر استفاده می گردد [۲۶].

د- روش کنترل مقاوم [۲۷-۲۸].

کنترل کننده مقاوم بر روی مد گلوکز-انسولین به گونه ای طراحی شده است که سطح گلوکز خون بیمار مبتلا به دیابت را از طریق تزریق پیوسته انسولین به سطح نرمال می رساند. در این روش میان تلاش کنترلی صورت پذیرفته و کاهش خطای ردیابی مصالحه به عمل می آید. این مصالحه به عنوان حساسیت در نظر گرفته شده و راه حل بهینه از نظر کمترین بهره میان اختلال ورودی و خطای خروجی از طریق روش کنترل بهینه به دست می آید [۲۷-۲۸].

۵- ساخت لوزالمعده مصنوعی و بکارگیری آخرین تکنولوژی ها از طریق گوشی های هوشمند

پیشرفت مدل های تنظیم گلوکز-انسولین پلاسمای خون و موفقیت پیاده سازی کنترل های حلقه بسته در ردیابی سطح گلوکز مطلوب، دانشمندان را برای پیاده سازی یک لوزالمعده مصنوعی بیشتر و بیشتر ترغیب نمود. شکل (۶) طریقه عملکرد و نصب یک سنسور تشخیص قند خون به همراه یک پمپ تزریق خودکار انسولین در بیماران دیابتی نوع یک را نشان می دهد.

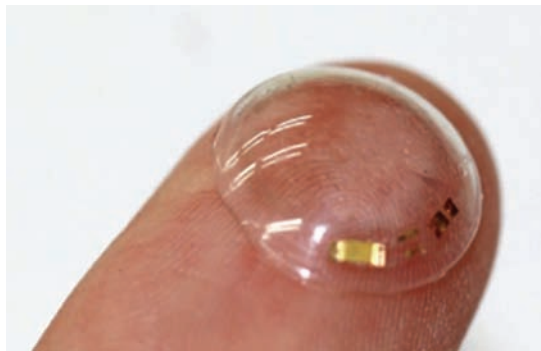


شکل ۶: لوزالمعده مصنوعی شامل: سنسور تشخیص گلوکز خون، سیستم بی سیم ارسال اطلاعات، تجهیز کنترل حلقه بسته و پمپ تزریق انسولین [۲۹]

یکی از حوزه های جدید در زمینه بکارگیری گوشی های هوشمند به موضوع اندازه گیری و نمایش سطح گلوکز خون باز می گردد شکل (۷) نحوه اندازه گیری و نمایش را به کمک گوشی آیفون که یکی از شرکت های پیشتاز در موضوعات سلامت پزشکی است، نشان می دهد. تلاش های جدیدی در زمینه حذف سوزن اندازه گیری و امکان سنجش میزان قند خون به شکل غیردخولی و یا غیر تهاجمی^{۲۰} صورت پذیرفته است. لنز گلوکز که به اندازه گیری گلوکز خون با استفاده از اشک چشم می پردازد از جمله این نمونه اختراعات است (شکل (۸)).



شکل ۷: سنسور تشخیص سطح گلوکز خون با قابلیت نمایش روی گوشی همراه [۳۰]



شکل ۸: اندازه گیری غیردخولی قند خون به کمک لنز گلوکز و ارسال اطلاعات به سامانه هوشمند [۳۱]



شکل ۹: سامانه نمایش، کنترل و اعلام هشدار مورد استفاده در گوشی های هوشمند جهت کنترل سطح گلوکز خون برای بیماران دیابت نوع یک [۳۰]
همراهی پیوسته نمایش، کنترل و تزریق انسولین با بیمار در طول ساعات شبانه روز، ایده پیاده سازی روش های نمایش و کنترل

- in Type 1 Diabetes", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 60, NO. 8, AUGUST 2013.
- [8] S. H. Ling, Member, IEEE, Nuryani, and H. T. Nguyen, Senior Member, IEEE, "Evolved Fuzzy Reasoning Model for Hypoglycaemic Detection", 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS Buenos Aires, Argentina, August 31 - September 4, 2010
- [9] P. Palumbo et al. (2012). "Glucose Control by Means of an Observer-Based Control Law". University of L'Aquila
- [۱۰] امیری امیر، وحید رفیع و حیدر جعفرزاده، «ارائه الگوریتمی ترکیبی برای تشخیص بیماری دیابت های»، اولین همایش منطقه ای فناوری اطلاعات برق پالایش، گچساران، مرکز علمی کاربردی گچساران، ۱۳۹۳.
- [11] Y. Wang et al. (2014). "Intelligent Closed-Loop Insulin Delivery Systems for ICU Patients". IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 18, pp. 290-299.
- [۱۲] ملیحه حبیبی، علیرضا احمدی فرد، «انتخاب ویژگی با استفاده از جستجوی تابو، الگوریتم ژنتیک و KNN برای تشخیص بیماری دیابت»، دوازدهمین کنفرانس سیستم های هوشمند ایران، بهمن، مجتمع آموزشی عالی بیم، ۱۳۹۲
- [13] S. Kang et al. (2015). "An efficient and effective ensemble of support vector machines for anti-diabetic drug failure prediction", Expert Systems with Applications 42 4265–4273
- [14] D. Antonelli et al. (2013). "Analysis of diabetic patients through their examination history". Mathematical Biosciences and Engineering. 12, pp. 455-468.
- [15] B. a. Antal and A. a. Hajdu, "An ensemble-based system for automatic screening of diabetic retinopathy," Knowledge-Based Systems, Elsevier, vol. 60, pp. 20-27, April 2014.
- [16] L. Ryan, T. Y. Wong, and C. Sabanayagam. "Epidemiology of diabetic retinopathy, diabetic macular edema and related vision loss," Eye and Vision 2 (2015): 17. PMC. Web. 5 Sept. 2017.
- [17] V. Heydari et al. (2016). "Fuzzy-Genetic Control of Blood Glucose Level in Diabetic Patients Based on Palumbo Delayed Model". International Conference on New Research Achievements in Electrical and Computer Engineering
- [18] Y. Pu et al. (2015). "Randomness in the Hybrid Modeling and Simulation of Insulin Secretion Pathways in Pancreatic Islets". Tsinghua Science and Technology. 20, pp. 441-452.
- [19] Bergman. Richard. N, Phillips. Lawrence. S, Cobelli. Claudio, "Physiologic evaluation of factors controlling glucose tolerance in man," J.Clin. Invest, 1981, vol. 68, pp. 1456-1467.
- [20] Sorensen. John. Thomas, "A Physiologic Model of Glucose Metabolism in Man and Its Use to Design and Assess Improved Insulin Therapies for Diabetes," Massachusetts Institute of Technology, 1985.
- [21] Li. Jiaxsu, Kuang. Yang, and Mason. Clinton. C, "Modelling the glucose-insulin regulatory system and ultradian insulin secretory oscillations with two explicit time delays," Journal of Theoretical Biology, 2006, vol. 242, pp. 722-735.
- [22] Dalla Man. Chiara, Rizza. Robert. A, and Cobelli. Claudio, "Meal simulation model of the glucose-insulin system," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007, vol. 54, pp. 1740-1749.
- [23] Palumbo. Pasquale, Panunzi. Simona, and De Gaetano. Andrea, "Qualitative behavior of a family of delay-differential models of the glucose-insulin system," Discrete Continuous. Dynamical. Systems. Series. B, 2007, vol. 7, pp. 399-424.
- [24] M. Al-Fandi et al. (2012). "Optimal PID-Fuzzy Logic Controller for Type 1 Diabetic Patient". IEEE International Symposium on Mechatronics and its Applications. pp. 1-7.
- [25] M.S. Akhyani, H. Khaloozadeh. (2015). "Optimal Glucose-Insulin Regulatory System in Type 1 Diabetic Patients Based on the Nonlinear Time Delay Models". Iranian Journal of Control. 8, pp. 31-41
- [26] Z. Tashakorizade et al. (2014). "Glucose Regulation in Type 1 Diabetes Mellitus with Model Reference Adaptive Control and Modified Smith Predictor". Iranian Journal of Biomedical Engineering. 8, pp. 159-171
- [27] P. Colmegna, R. S. Sánchez Peña, R. Gondhalekar, E. Dassau and F. J. Doyle III, "Reducing risks in type 1 diabetes using H_{∞} control," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 61, no. 12, pp. 2939-2947, 2014.
- [28] P. Palumbo, P. Pepe, S. Panunzi and A. Gaetano, "Robust closed-loop control of plasma glycemia: A discrete-delay model approach," Discrete and Continuous Dynamical Syst. - Series B, vol. 12, no. 2, pp. 455-468, 2009.
- [29] "Events » UF Diabetes Institute", Diabetes.ufl.edu, 2019. [Online]. Available: <https://diabetes.ufl.edu/category/events/>. [Accessed: 27-Jun- 2019].
- [30] "Diabetes related images", World Health Organization, 2019. [Online]. Available: <https://www.who.int/diabetes/global-report/diabetes-images/en/>. [Accessed: 27-Jun- 2019].
- [31] "404: خبرگزاری علم و فناوری: Stnews.ir, 2019. [Online]. Available: <http://www.stnews.ir/content/news>. [Accessed: 29-Jun- 2019].

را با استفاده از قابلیت های بالای گوشی های هوشمند در طول چند سال گذشته تحقق بخشیده است. به گونه ای که هم اکنون برخی از شرکت های سازنده تجهیزات پزشکی موفق به پیاده سازی عملیاتی سیستم نمایش و کنترل با استفاده از گوشی های هوشمند در سطح کلینیکی شده اند. پمپ انسولین X_2 یکی از این نمونه سامانه های هوشمند است. این پمپ انسولین توسط شرکت «Tandem Diabetes Care» توسعه داده شده است و توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده آمریکا نیز مورد تایید قرار گرفته است. شکل (۹) نمونه ای از این دستگاه و نرم افزار پیاده سازی شده در گوشی هوشمند که وظیفه نمایش، کنترل و اعلام هشدار را بر عهده دارد، نشان می دهد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله پس از تعریف بیماری دیابت و بیان جایگاه آن در زندگی بشر امروز به عنوان یک بیماری خطرناک که می تواند عوارضی از نارسایی های قلبی-عروقی تا نابینایی را داشته باشد، به تشریح مدل های ریاضی ارائه شده جهت توصیف سیستم بر هم-کنش گلوکز-انسولین پرداخته شد. هم چنین برخی از مهم ترین روش های کنترلی حلقه بسته جهت تنظیم سطح گلوکز پلاسما خون در طول چند دهه گذشته بیان گردید و معادلات ریاضی مرتبط با مدل غیرخطی تاخیری پالمبو به عنوان یک روش موفق ارائه شد. آخرین پیشرفت ها در ساخت لوزالمعده مصنوعی و نرم افزارهای کاربردی این حوزه بر روی گوشی های همراه، آخرین مبحث مورد بررسی در این مقاله بود.

پی نوشت ها

- 1 Diabetes
- 2 hyperglycemia
- 3 Glucagon
- 4 Type 1 Diabetes
- 5 Type 2 Diabetes
- 6 Gestational Diabetes
- 7 Hypoglycemia
- 8 Diabetic ketoacidosis
- 9 Retinopathy
- 10 Diabetic nephropathy
- 11 Diabetic neuropathy
- 12 Catecholamine
- 13 Cortisol
- 14 Catabolism
- 15 Glycogenesis
- 16 Gluconeogenesis
- 17 Ketone
- 18 Proliferative
- 19 Extended State Dependent Riccati Equation
- 20 Noninvasive diagnostic

مراجع

- [1] American Diabetes Association, "Standards of Medical Care in Diabetes—2014," Diabetes Care, vol. 37, pp. S14–S80, 2014.
- [2] I. Pagkalos et al. (2014). "Bio-Inspired Glucose Control in Diabetes Based on an Analogue Implementation of a Cell Mode", IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. 8, pp. 186-195.
- [3] A. Hariri, L.Y. Wang. (2011). "Identification and Low Complexity Regime Switching Insulin Control of Type I Diabetic Patients". Journal of Biomedical Science and Engineering. 4, pp. 297-314.
- [4] Patricio Colmegna, Ricardo S. Sanchez "Reducing Risks in Type 1 Diabetes Using H_{∞} Control", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 61, NO. 12, DECEMBER 2014.
- [5] A. Haidar, L. Legault, M. Dallaire, A. Alkhateeb, A. Coriat, V. Messier, P. Cheng, M. Millette, B. Boulet and R. Rabasa-Lhoret, "Glucose-responsive insulin and glucagon delivery (dual-hormone artificial pancreas) in adults with type 1 diabetes: a randomized crossover controlled trial," Canadian Medical Association J., vol. 185, no. 4, pp. 297-305, 2013.
- [6] Chiara Dalla Man, Robert A. Rizza, and Claudio Cobelli, "Meal Simulation Model of the Glucose-Insulin System," IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 54, NO. 10, 2007.
- [7] A. Revert, F. Garelli, J. Pico, H. De Battista, P. Rossetti, J. Vehi, and J. Bondia "Safety Auxiliary Feedback Element for the Artificial Pancreas



مقاله علمی-ترویجی

چالش‌های موجود و راهکارهای ارایه شده در مسیر توسعه فناوری دیود ساطع کننده نور آلی

■ زهرا کچوئی/ گروه پژوهشی شیمی و فرآیند/ پژوهشگاه نیرو/ تهران- ایران/ zahrakachoei@gmail.com

■ فرزانه هاشمی نصر/ گروه پژوهشی شیمی و فرآیند/ پژوهشگاه نیرو/ تهران- ایران/ f.hasheminasr@gmail.com

■ مهدی صالحی راد/ گروه پژوهشی شیمی و فرآیند/ پژوهشگاه نیرو/ تهران- ایران/ msalehirad@nri.ac.ir

■ فرهاد اکبری برومند/ گروه الکترونیک دانشکده برق/ دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی/ تهران- ایران/ boroumand@eetd.kntu.ac.ir

چکیده

دیودهای ساطع نوری آلی با توجه به مزایای هزینه ساخت پایین، مصرف انرژی کم، ولتاژ آستانه پایین، سازگاری با محیط زیست، سبک بودن و انعطاف پذیری به سرعت نسل جدید منابع نوری خواهند شد. تجاری سازی روشنایی های دیود ساطع نوری آلی وابسته به موفقیت در رفع چالش های موجود در روش تولید صنعتی، بازدهی و طول عمر سیستم است. در این مطالعه به شرح چالش های پیش رو و پیشرفت های اخیر در زمینه رفع این چالش ها در جهت توسعه دیودهای ساطع نوری آلی پرداخته شده است. بسترهای پلاستیکی انعطاف پذیر مورد استفاده، روش یکنواخت کردن الکتروود شفاف ITO، الکتروودهای رسانای شفاف جایگزین ITO، کاهش آسیب بین لایه ای، افزایش شدت نور و روش افزایش طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه بررسی شده اند. مورد توجه ترین روش های ساخت سیستم OLED صنعتی از قبیل چاپ غلتک به غلتک، چاپ گراوو و چاپ جوهرافشان نیز مورد بحث و مقایسه قرار گرفته اند.

کلمات کلیدی: دیودهای ساطع کننده نور آلی (OLED)، چالش، راهکار، منابع نوری، انعطاف پذیر

Current Challenges and Presented Solutions in the Path of Development of Organic Light-Emitting Diodes Technology

■ Zahra Kachoei/Chemistry and Process Department /Niroo Research Institute/Tehran ,Iran/ zahrakachoei@gmail.com

■ Farzaneh Hashemi Nasr/ Chemistry and Process Department /Niroo Research Institute /Tehran ,Iran/ f.hasheminasr@gmail.com

■ Mehdi Salehirad/Chemistry and Process Department /Niroo Research Institute /Tehran ,Iran/ msalehirad@nri.ac.ir

■ Farhad Akbari Boroumand/Assistant Prof. of Electronic Eng. K.N .Toosi University of Technology (KNTU)/ Tehran ,Iran/ boroumand@eetd.kntu.ac.ir

Abstract

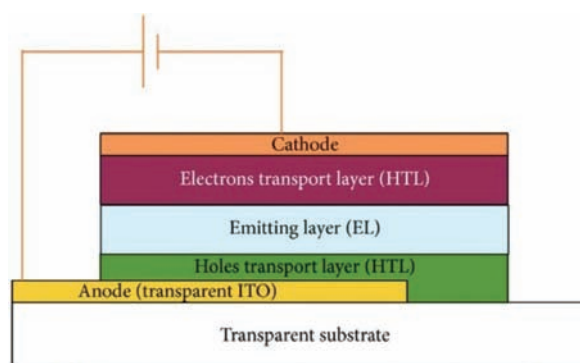
organic light-emitting diodes (OLEDs) are quickly becoming the next generation of lighting sources due to the following advantages: low-cost manufacture methods, low power consumption, environment compatibility, light and flexibility. Commercialization of organic light-emitting diode lightings will depend on the success of overcoming current challenges in industrial manufacture method, efficiency and life time of system. In this study, current developments

in the field of types of materials and preparation method of organic light-emitting diodes are discussed. Plastic substrates used in OLEDs, ITO smoothing method, transparent conductive electrodes replacing ITO, encapsulation methods and increasing light intensity are investigated. Most interesting manufacturing methods of OLED system such as roll-to-roll printing, gravure printing and inkjet printing are discussed and compared.

Keywords: organic light-emitting diodes (OLED), challenges, solution, lighting sources, flexible

۱- مقدمه

دیودهای ساطع کننده نور آلی (OLED) نسل جدید منابع نوری هستند که در ساختار آن یک لایه تشکیل شده از ترکیبات آلی در پاسخ به ولتاژ الکتریکی، نور منتشر می کند [۱-۴]. در حالت کلی، ساختار این سیستم ها شامل بستر، الکترود رسانای شفاف، لایه انتقال دهنده حفره، لایه نشر دهنده، لایه انتقال دهنده الکترون و کاتد می باشد (شکل ۱).



شکل ۱: ساختار کلی سیستم OLED

هزینه ساخت پایین، مصرف انرژی کم، ولتاژ آستانه پایین [۵-۶]، سازگاری با محیط زیست، سبک بودن و قابلیت ساخت آنها روی بسترهای انعطاف پذیر از جمله مزایای فناوری OLED هستند که موجب شده است این فناوری به شدت مورد توجه محققان قرار گیرد. علی رغم ویژگی های مثبت فناوری OLED، هنوز چالش هایی مربوط به انعطاف پذیری، پایداری و طول عمر قطعه، روش فرآیند آنها، حساسیت به رطوبت و... وجود دارد که باید قبل از تجاری سازی قطعات با کارکرد طولانی مدت، این چالش ها شناسایی شده و برطرف شود. در حال حاضر، مشکلات و موانع توسعه دیودهای نشر نور آلی انعطاف پذیر را می توان به چندین دسته کلی تقسیم کرد: ۱- انعطاف پذیری و پایداری حرارتی بسترهای مورد استفاده؛ ۲- ناهمواری سطح ماده ITO؛ ۳- انعطاف پذیری و پایداری مکانیکی الکترود رسانای شفاف (TCE)؛ ۴- آسیب های بین لایه ای؛ ۵- تکنولوژی استخراج نور؛ ۶- طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه؛ ۷- تکنولوژی ساخت قطعه؛

در ادامه به شرح موارد ذکر شده و توسعه پیشرفت های انجام شده در جهت کاهش این مشکلات پرداخته شده است.

۲- انعطاف پذیری و پایداری حرارتی بسترهای مورد استفاده

انواع مختلفی از بسترهای پلاستیکی که خواص مکانیکی و نوری مورد نیاز برای تهیه قطعات ساطع کننده نور آلی سبک و انعطاف پذیر را برآورده می کنند، توسعه یافته اند [۸-۷]، اما هنوز این گونه قطعات تجاری نشده اند. شکل (۲) تصویر OLED انعطاف پذیر را نشان می دهد.

گرچه بیشتر بسترهای پلاستیکی با شفافیت و انعطاف پذیری بالا تهیه

می شوند، اما دمای تخریب حرارتی ($100-150^{\circ}\text{C}$) آنها در مقایسه با بسترهای سخت به نسبت کم است. بسترهای پلاستیکی که پایداری حرارتی بالایی نشان می دهند، مانند پلی ایمیدها (PI)، به اندازه کافی شفاف نیستند. شفافیت مورد نیاز در ناحیه مرئی باید بیشتر از ۹۵٪ باشد. بسترهای شفاف مانند پلی کربنات (PC) نیز مقاومت حلال به نسبت کمی را نشان می دهند. اگرچه هنوز بستر انعطاف پذیر کاملی شناخته نشده است، اما پلیمرهای پلی اتیلن ترفتالات (PET) و پلی اتیلن نفتالات (PEN) در حال حاضر با موفقیت در الکترونیک های انعطاف پذیر به کار می روند که این به دلیل خواص مکانیکی و نوری عالی آنها و همچنین مقاومت در برابر حلال و پایداری حرارتی به نسبت خوب و همچنین جذب رطوبت پایین و جذب اکسیژن ضعیف آنها است.

علی رغم مزایای استفاده از بسترهای پلاستیکی کم هزینه، چالش اصلی آنها انبساط حرارتی و تخریب آنها طی استفاده از فرآیندهای ساخت با دماهای بالاتر از 100°C است. چنانچه اصلاح حالت های نشاندن لایه در طی رشد لایه ها صورت نپذیرد، می تواند باعث ایجاد ریزساختار آمورف لایه های اکسیدی شود. لایه های آمورف با مقاومت ورق های بیشتر نسبت به فاز بلوری مشخص می شوند که همین موجب افزایش ولتاژ آستانه OLED می شود.

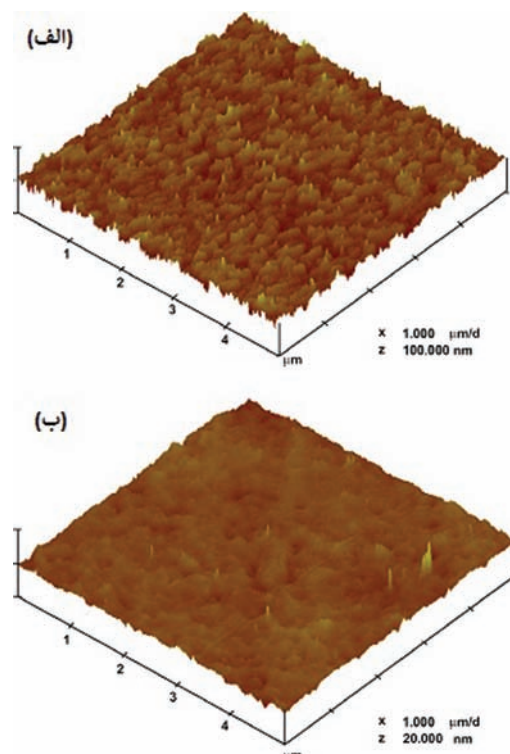


شکل ۲: تصویر OLED انعطاف پذیر

۳- ناهمواری سطح ماده ITO

اکسیدهای رسانای شفاف مانند ITO به دلیل پایداریشان نسبت به گذشت زمان از اهمیت و کارایی بالایی برخوردارند. لایه های ITO به طور گسترده ای به عنوان الکترود شفاف در انواع ابزارهای اپتوالکترونیکی مختلف مانند دیودهای ساطع نور آلی (OLEDs) به کار می رود. با این حال، برخی از مشکلات مانند تشکیل برآمدگی ها و فرورفتگی ها طی روش های ساخت سطح لایه نازک ITO گزارش شده است که موجب تخریب کیفیت رنگ، کاهش طول عمر دستگاه و اتصالی کردن به دلیل تاثیر موضعی ولتاژ می شود. همچنین، وابستگی شدیدی بین مورفولوژی سطح لایه و خواص انعکاسی آن وجود دارد. به عنوان مثال، در لایه های نازک ITO مورفولوژی سطح نقش مهمی در انتقال الکترون روی سطح لایه دارد. روش مسطح کردن به عنوان

فرآیند بهبود حالت صاف و یکنواختی مواد نیمه‌رسانا تعریف شده است. یکی از روش‌های معرفی شده برای یکنواخت کردن ITO، روش پولیش شیمیایی مکانیکی^۲ (CMP) آن است [۹]. تصویر AFM از لایه نازک ITO قبل و بعد از فرآیند پولیش شیمیایی و مکانیکی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: تصویر AFM از لایه نازک ITO قبل و بعد از فرآیند پولیش شیمیایی و مکانیکی: قبل از CMP (الف) و بعد از CMP (ب) [۹].

۴- انعطاف پذیری و پایداری مکانیکی الکتروود رسانای شفاف (TCE)

استفاده از ایندیوم در قطعات اپتوالکترونیک برخی معضلات مانند کمبود ایندیوم روی زمین و افزایش فزاینده قیمت آن در آینده نزدیک، شکنندگی شدید مکانیکی و چسبندگی ضعیف به بسترهای پلاستیکی را به دنبال دارد، که باعث می‌شود الکتروودهای ITO برای قطعات الکترونیکي انعطاف پذیر نامناسب باشند [۱۰]. در نتیجه، پیشرفت در زمینه جایگزینی الکتروود ITO سنتی با الکتروودهای رسانای شفاف انعطاف پذیر که دارای انعطاف پذیری مکانیکی، هدایت الکتریکی و شفافیت نوری هستند، در دستور کار پژوهشگران قرار گرفته است.

الکتروود رسانای شفاف انعطاف پذیر، به‌طور معمول لایه‌های نازک تهیه شده بر روی بسترهای انعطاف پذیر به‌منظور عبور دادن نور و انتقال جریان الکتریکی به‌طور هم‌زمان هستند [۱۱]. الکتروودهای شفاف مختلف با انعطاف پذیری بسیار عالی، از قبیل پلیمرهای رسانا، نانولوله‌های کربنی چند دیواره، گرافن و لایه‌های نانولوله کربنی تک دیواره، در تلاش برای تحقق OLED بسیار انعطاف پذیر و بادوام مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال، مقاومت سطحی این الکتروودها هنوز به‌دلیل طبیعت آنها محدود است. اگرچه در حال حاضر لایه‌هایی با مقاومت سطحی کمتر از $100 \Omega/\text{square}$ و عبور نوری در حدود ۸۵٪ ساخته شده‌اند [۱۲]، اما هنوز این پارامترها باید بیشتر بهبود یابند.

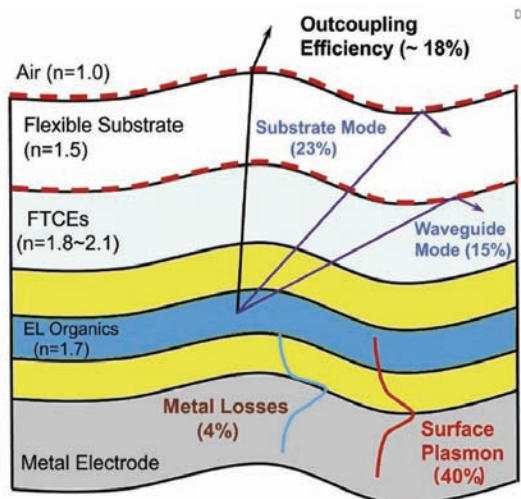
راهکار پیشنهادی جدید، دستیابی به گرافن تک لایه سنتز شده با روش CVD در مقیاس بزرگ، با استفاده از پلیمر فروالکتریک غیرفرار است که مقاومت سطحی پایین دارد. در ساختار این کامپوزیت، ورق‌های گرافن توسط پلی (وینیلیدین فلوئوراید-کو-تری فلوئورو اتیلن)^۲ (P(VDFTrFE)) دوپ شده و مقاومت سطحی کم بدست می‌آید. در این ساختار هیبریدی، مقاومت سطحی در حد $120 \Omega/\text{square}$ در شرایط محیطی به دست آمده و به‌دلیل طبیعت بسیار شفاف پلیمر فروالکتریک، عبور بیش از ۹۵٪ را در محدوده مرئی نشان می‌دهند [۱۳]. علاوه بر آن، به دلیل انعطاف پذیری مکانیکی عالی، واکنش ناپذیری شیمیایی و نیز فرآیند ساخت ساده پلیمرهای فروالکتریک، الکتروودهای شفاف گرافن-فروالکتریک مسیر جدیدی را برای گسترش الکتروودهای شفاف پایه گرافنی در مقیاس بزرگ باز کرده‌اند.

۵- آسیب‌های بین لایه‌ای

چالش‌های دیگر در روند تولید OLED با روش غلتک به غلتک، شامل آسیب‌های بین لایه‌ای، حفظ تمیزی محیط انجام فرآیند و غیره است. انتخاب مواد با ضرایب انبساط حرارتی مشابه در هنگام تشکیل لایه‌های آلی روی بستر بسیار مهم است [۱۴]. عدم تناسب ضرایب انبساط حرارتی باعث ترک خوردن و در نتیجه شکست لایه‌های آلی نشانده شده در طی چرخه دمایی خواهد شد. همچنین، محافظت از تنش‌های لایه‌های متصل به هم و حفظ خلوص لایه‌های آلی اهمیت دارد.

۶- تکنولوژی استخراج نور

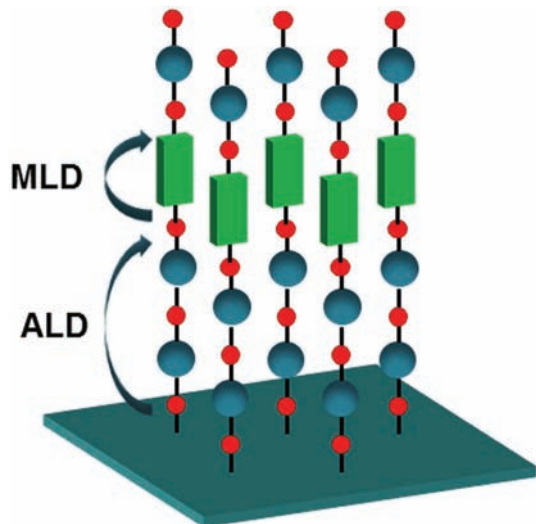
متاسفانه، بیشتر فوتون‌های تولید شده در ساطع‌کننده‌های آلی OLEDهای انعطاف پذیر، به‌دلیل تفاوت زیاد شاخص‌های انعکاسی (n) لایه‌های آلی / TCE ($n_{\text{org}} \sim 1/2 - 7/1$)، بسترهای پلاستیکی ($n_{\text{sub}} \sim 7/1 - 5/1$) و هوا ($n_{\text{air}} \sim 1$) درون لایه آلی، TCE، و بستر جذب می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، بخشی از نور جذب شده، جذب الکتروود فلزی می‌شود [۱۵].



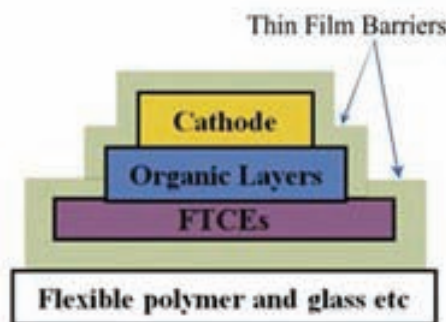
شکل ۴: حالت‌های مختلف اتلاف نور در OLED انعطاف پذیر.

افزایش شدت تابش نور، از چالش‌های مهم پیش رو در توسعه OLED است که نیازمند اصلاح ساختار درونی OLED می‌باشد. تاکنون اقدامات متعددی به‌منظور افزایش شدت تابش نور درون لایه‌های ITO/آلی صورت پذیرفته است. به‌عنوان مثال راهکارهای استفاده

هان^۸ و همکارانش از مواد هیبریدی اپوکسی - سیکلوالیفاتیک قابل پخت با اشعه UV^۹ (hybrimer) به عنوان یک لایه بافر برای پوشش دادن OLEDهای انعطاف پذیر انکپسوله استفاده کرد [۲۱]. این فرآیند بسیار ساده، سریع، کم هزینه و مقیاس پذیر است و مسیری بالقوه برای انکپسولاسیون موثر الکترونیک های انعطاف پذیر فراهم می کند.



شکل ۵: ساختار لایه نازک آلی / معدنی هیبریدی ساخته شده با استفاده از تکنیک ALD/MLD [۱۹].



شکل ۶: لایه نازک OLED انکپسوله شده روی بستر انعطاف پذیر و انکپسوله شده با لایه سدکننده

۸- تکنولوژی ساخت قطعه

۸-۱- تبخیر حرارتی در خلاء

تا به امروز، بیشتر ساطع کننده های آلی در OLEDهای کوچک مولکول مانند الکترودهای ذکر شده در قسمت بالا معمولاً از طریق تبخیر حرارتی در خلاء برای نمونه های آزمایشگاهی OLED و نیز برای تولید صنعتی قطعات تجاری لایه نشانی می شوند. با وجود اینکه تکنیک تبخیر حرارتی در خلاء^{۱۰} (VTE) برای دستیابی به نمایشگرهای OLED تمام رنگی با کیفیت بالا آسان و مؤثر می باشد، محدودیت هایی در زمینه کنترل فرآیند، قابلیت مقیاس پذیری و قابلیت تولید با هزینه های مؤثر وجود دارد [۲۲]. به خصوص به دلیل پایداری حرارتی به نسبت ضعیف بسترهای پلاستیکی OLEDهای انعطاف پذیر، روش های تولید با درجه حرارت بالا مشکل آفرین خواهد بود.

۸-۲- فرآیند پذیری محلول

فرآیند پذیری محلول ممکن است یک راهکار مقرون به صرفه و

از بسترهای با شاخص انعکاس بالا ($n \geq 1.1$) به جای شیشه استاندارد ارایه شده است [۱۶].

بسترهای با شاخص انعکاس بالا، به طور مؤثری انعکاس درونی بالا در فصل مشترک بستر/ITO را کاهش داده و اجازه می دهد که نور بیشتری از قطعه خارج شود.

۷- طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه

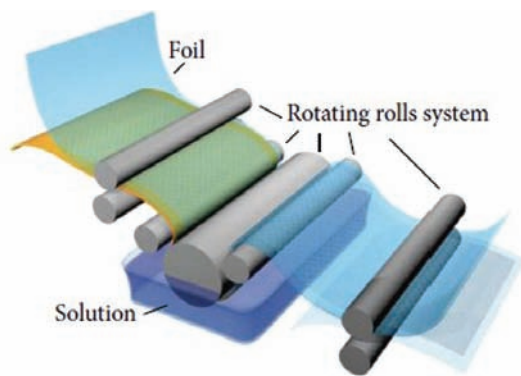
به جز کارایی، پایداری عملکرد قطعه یکی دیگر از چالش های جدی پیش رو برای توسعه OLEDهای انعطاف پذیر با کارایی بالا است. طول عمر دستگاه OLED به عنوان زمان متوسطی محاسبه می شود که میزان روشنایی به نصف کاهش یابد. T_{50} به عنوان مدت زمانی که کاهش روشنایی از شدت اولیه تا حد ۵۰٪ اولیه برسد، تعریف شده است. درخشندگی OLEDها با گذشت زمان کاهش می یابد و طول عمر پنل ها محدود است.

مطالعات کنونی نشان می دهد که واکنش های الکتروشیمیایی یا فتوشیمیایی، مهاجرت گونه های یونی، اثرات فصل مشترک، تخریب گونه مولکولی خاص، نقش مهمی در تخریب ذاتی قطعه OLED دارند [۱۷-۱۸]. مساله تخریب با عامل خارجی را می توان به ذرات گرد و غبار رسوب شده در طول فرآیند ساخت OLED و نفوذ بخار آب و اکسیژن نسبت داد. ناخالصی ها مناطق حساس برای حمله رطوبت فراهم می کنند که منجر به کاهش الکتروشیمیایی آب در فصل مشترک الکتروود فلزی/آلی شده و در نتیجه توسط هیدروژن آزاد شده در زیر سطح الکتروود حباب هایی ایجاد می کند. علاوه بر آن، نفوذ اکسیژن باعث اکسیداسیون الکتروود و لایه آلی و همچنین جدا شدن لایه الکتروود می شود.

روش مؤثر به منظور جلوگیری از تخریب ناشی از رطوبت/اکسیژن، انکپسولاسیون مناسب OLED انعطاف پذیر است. امروزه، انکپسولاسیون لایه نازک^۴ (TFE) به عنوان امیدوارکننده ترین روش برای محافظت قطعات انعطاف پذیر پیشنهاد شده است [۱۹]. این روش می تواند با استفاده از تکنیک های لایه نشانی مختلف در دمای پائین مانند انکپسولاسیون چند لایه، لایه نشانی اتمی^۵ (ALD) / لایه نشانی مولکولی^۶ (MLD)، فرآیندهای ALD افزایش یافته پلاسمایی^۷ (PEALD) انجام شود. انکپسولاسیون چند لایه شامل لایه های مجزای Al_2O_3 و پلی اکریلات (دوتایی) در هر دو طرف پایین و بالای لایه های تشکیل دهنده قطعه به عنوان لایه انکپسولاسیون است که با ایجاد حالت سدکنندگی موجب پایداری دراز مدت آن می شود (شکل ۵) [۱۹].

فرآیندهای ALD/MLD به طور کلی شامل واکنش های متناوب واکنش دهنده ها و پیش ماده های فلزی است که فرآیندهای ALD و MLD را تکرار می کند، این فرآیندهای متناوب منجر به رشد لایه - لایه می شود. در حالت ایده آل، یک ماده لایه نازک لایه تشکیل شده است. برای قرار دادن لایه های ضخیم تر، چرخه ALD/MLD چندین بار تکرار می شود تا به ضخامت لایه مورد نظر برسد. چند لایه های آلی / معدنی نه تنها به عنوان مانع اکسیژن و رطوبت با کیفیت بالا عمل می کنند، بلکه بستر پلاستیکی را صاف می کنند به طوریکه آسیب مکانیکی را کاهش داده و پایداری حرارتی دستگاه را افزایش می دهد. فرآیندهای ALD به وسیله در معرض قرار گرفتن سطح پوشش دهی شونده با پیش ماده آلی / فلزی با یک واکنش دهنده (H_2O , O_3 , NH_3 و غیره) انجام می شود. به این ترتیب، انواع مختلفی از لایه های انکپسولاسیون نازک مانند Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Si_3N_4 و SrO_2 می توانند لایه نشانی شوند (شکل ۶) [۲۰].

بعدی چاپ، سرعت چاپ را محدود می‌کند. یکی دیگر از چالش‌های پیش‌رو در این تکنیک، دستیابی به توزیع یکنواخت جریان قطره روی سطح بستر انعطاف‌پذیر است که بیشتر طبیعت آن هیدروفوب است. به این منظور اصلاح اولیه سطوح پلاستیکی از طریق پلاسما، حلال یا اشعه ماوراء بنفش باید صورت پذیرد که باعث بهبود خاصیت ترشوندگی^{۱۷} الگوهای چاپ شده می‌شود. به‌تازگی، لایه‌های مختلفی مانند الکتروگرافن، الکترو نانو سیسم نقره و لایه فعال آلی با چاپ جوهر افشان لایه نشانی شده‌اند.



شکل ۷: نشان دادن رول به رول لایه‌های آلی روی فویل.

چاپ گراوو^{۱۸} یکی دیگر از تکنیک‌های بسیار محبوب برای قرار دادن لایه‌های انتقال حفره و ساطع کننده و انتقال الکترون در OLED های بر روی بستر پلاستیکی است که در مقایسه با فرآیندهای چاپ رول به رول، سرعت بیشتری دارند [۲۵]. غلتک چاپ، جوهر را از مخزن برداشته و حفره‌ها را برای الگوگذاری سطح حکاکی می‌کند. شکل حفره و تراکم نقش و اثر می‌تواند متفاوت باشد. تیغه‌های مخصوص میزان اضافی جوهر را برمی‌دارد تا توزیع جوهر در هر حفره یکنواخت باشد. چالش عمده‌ای که با این روش همراه است، بازدهی نشر پایین OLED ساخته شده است، هر چند برخی از مطالعات نتایج امیدوار کننده و بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهند.

ساختارهای چند لایه که توسط تکنیک‌های فرآیند محلول لایه نشانی شده‌اند، یک مشکل پیچیده دارند و آن است که پوشش لایه‌ی بالایی که بر پایه محلول است، می‌تواند لایه‌ی پایینی را حل کند. این مساله چالش انگیز نیازمند انتخاب دقیق مواد و حلال‌ها برای عدم حل‌شوندگی لایه‌های مجاور است.

۹- نتیجه‌گیری

دیویدهای ساطع نوری آلی با توجه به مزایای گوناگونی که نسبت به دیویدهای ساطع نوری غیر آلی دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ساختار دیویدهای ساطع نوری آلی یک لایه تشکیل شده از ترکیبات آلی در پاسخ به جریان الکتریکی نور منتشر می‌کند. در مسیر توسعه دیویدهای ساطع نوری آلی چالش‌های متعددی وجود دارد که باید بر آنها غلبه شود. مهم‌ترین چالش‌های مطرح شده در زمینه تجاری شدن دیویدهای ساطع نوری آلی به ۷ دسته تقسیم شده‌اند: ۱- انعطاف‌پذیری و پایداری حرارتی بسترهای مورد استفاده، ۲- ناهمواری سطح ماده ITO، ۳- انعطاف‌پذیری و پایداری مکانیکی الکترو رسانی شفاف (TCE)، ۴- آسیب‌های بین لایه‌ای، ۵- تکنولوژی استخراج نور، ۶- طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه و ۷- تکنولوژی ساخت قطعه. راهکارهای ارایه شده در راستای برطرف شدن این چالش‌ها در این مطالعه بررسی

مقیاس‌پذیر را برای تولید انبوه پانل‌های OLED انعطاف‌پذیر و با مساحت زیاد ارایه دهد. پوشش‌دهی چرخشی به‌عنوان یک فناوری فرآیند معتبر است که به‌طور معمول در لایه نشانی لایه‌های پلیمری استفاده می‌شود. به‌طور تقریبی تمام OLED های انعطاف‌پذیر پلیمری که تاکنون در مقالات علمی گزارش شده‌اند، با ترکیبی از پوشش‌دهی چرخشی و لایه نشانی بخار در خلاء که شامل یک پوشش‌دهی و روش تابکاری حرارتی برای بدست آوردن لایه‌های پلیمری یکنواخت و پس از آن لایه نشانی الکترودهای فوقانی در خلاء می‌باشد، بدست می‌آیند. اگر چه مواد پلیمری برای فرآیند محلول مناسب هستند، آنها در قابلیت تکرارپذیری قطعه کاربردی به‌علت تغییرات وزن مولکولی، پلی دیسپرسیته، ناحیه گزینی^{۱۱} و خلوص با مشکلات قابل ملاحظه‌ای مواجه می‌شوند. با توجه به این که مولکول‌های کوچک دارای یک ساختار مولکولی دقیقاً معینی هستند و قابلیت تولید دوباره را نیز فراهم می‌کنند، مولکول‌های کوچک قابل فرآیند توسط روش محلول که با فرآیند پوشش‌دهی چرخشی سازگار هستند، به‌تازگی برای ساخت OLED ها توسعه یافته‌اند. با این حال، فرآیند پوشش‌دهی چرخشی دارای محدودیت برای لایه نشانی‌های چند لایه است، زیرا پوشش‌دهی بر پایه محلول از یک لایه می‌تواند لایه زیری آن را حل کند. محدودیت‌های دیگر در فرآیند محلول عبارتند از: سرعت پایین مصرف مواد، لایه نشانی در مساحت بزرگ و الگوگذاری لایه افقی. از آنجایی که روش کلی پوشش‌دهی چرخشی به‌طور کامل با تولید مقیاس بالا سازگار نیست، بسیار مطلوب است که فرآیند محلولی که می‌تواند در یک فرآیند پیوسته برای تولید صنعتی انجام شود، گسترش یابد. به‌منظور تولید صنعتی OLED، پژوهشگران به دنبال فرآیند محلولی هستند که قادر به ساخت OLED های انعطاف‌پذیر در شرایط محیطی بوده و بنابراین هزینه‌های تولید را بسیار کاهش دهد. فرآیند تولید مورد استقبال در سال‌های اخیر، پرینت رول به رول^{۱۲} لایه‌های پلیمری (R2R) روی بسترهای PET بوده است (شکل ۷). ایده اصلی این است که قرارگیری جوهرهای آلی در مکان تعیین شده به‌طور مستقیم بر روی بسترهای قابل رول شدن در طی یک مرحله صورت پذیرد تا الگو شکل بگیرد [۲۳]. خط تولید غلتک به غلتک به‌طور پیوسته می‌تواند با استفاده از ترکیبی از تمیز کردن، چاپ و پوشش‌دهی ساخته شود، به‌طوری که تولید قطعات OLED مساحت بزرگ، مقرون به‌صرفه و سرعت بالا را بر روی بسترهای انعطاف‌پذیر مقدور سازد. مانند فرآیند محلول، فرآیند غلتک به غلتک نیز از چندین تکنیک چاپ و پوشش‌دهی تشکیل شده است، مانند چاپ جوهر افشان، چاپ گراوو^{۱۳}، چاپ پرده‌ای^{۱۴}، پوشش‌دهی تیغ‌های^{۱۵}، پوشش‌دهی روزنه شبیری^{۱۶}، غیره [۲۴]. این تکنیک‌های چاپ و پوشش‌دهی بر اساس همان اصل انتقال جوهر به بستر است که با موفقیت برای تولید لایه‌های کاربردی و الکترودها برای OLED های بر پایه پلیمرها و نیز مولکول‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. چاپ جوهر افشان تکنیکی است که از سر نازل برای پاشیدن جوهرهای با ویسکوزیته کم استفاده می‌کند. قطره‌های خروجی می‌تواند به‌علت تولید اولتراسونیک جریان آئروسول، مانند برخی سیستم‌های الکترواسپری بسیار ریز باشد. لایه‌ها در محدوده چند نانومتری می‌توانند به آسانی قابل تنظیم باشند، به طوری که کنترل میزان حجم پیکولتر برای سر چاپگر قابل دستیابی است. با این حال، چون حلالیت مواد توسط نوع حلال و فراریت کنترل می‌شود، نقص‌های مختلف لایه مانند ترک‌خوردگی، تنش ذاتی و پیوسته پیوسته شدن طی خشک شدن ممکن است رخ دهد [۲۵]. سرعت تبخیر حلال باقیمانده به‌منظور متراکم کردن لایه، قبل از مرحله

properties of indium tin oxide thin film using chemical mechanical polishing technique, *Microelectronic Engineering*, 2007, 84, 2896-2900.

- [10] S. De, P. E. Lyons, S. Sorel, E. M. Doherty, P. J. King, W. J. Blau, P. N. Nirmalraj, J. J. Boland, V. Scardaci, J. Joimel, J. N. Coleman, Transparent, flexible, and highly conductive thin films based on polymer-nanotube composites, *ACS Nano*, 2009, 3, 714-720.
- [11] K. Ellmer, Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes, *Nature Photonics*, 2012, 6, 809-817.
- [12] M. Aleksandrova, N. Kurtev, V. Videkov, S. Tzanova, S. Schintke, Material alternative to ITO for transparent conductive electrode in flexible display and photovoltaic devices, *Microelectronic Engineering*, 2015, 145, 112-116.
- [13] G.X. Ni, Y. Zheng, S. Bae et al., Graphene-ferroelectric hybrid structure for flexible transparent electrodes, *ACS Nano*, 2012, 6, 3935-3942.
- [14] SZ Zardareh, FA Boroumand, MR Fathollahi, Interface Effects on Operation of Multilayer Organic Light Emitting Diodes, Interfaces and Interphases in Multicomponent Materials (IIMM 2010).
- [15] K. Hong, J. L. Lee, Review paper: Recent developments in light extraction technologies of organic light emitting diodes, *Electronic Materials Letters*, 2011, 7, 77-91.
- [16] Y. Luo, C. Wang, L. Wang, Y. Ding, L. Li, B. Wei, J. Zhang, Flexible organic light-emitting diodes with enhanced light out-coupling efficiency fabricated on a double-sided nano-textured substrate, *ACS Applied Mater. Interfaces*, 2014, 6, 10213-10219.
- [17] FA Boroumand, Degradation in organic light emitting diodes, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 38, 274-277.
- [18] FA Boroumand, A Hammiche, G Hill, DG Lidzey, Characterizing Joule Heating in Polymer Light Emitting Diodes Using a Scanning Thermal Microscope, *Advanced Materials*, 2004, 16 (3), 252-25.
- [19] Z. Chen, H. Wang, X. Wang, P. Chen, Y. Liu, H. Zhao, Y. Zhao, Y. Duan, Low-temperature remote plasma enhanced atomic layer deposition of ZrO₂/zirconia nanolaminate film for efficient encapsulation of flexible organic light-emitting diodes, *Scientific Reports*, 2016, 7, 40061.
- [20] R. P. Xu, Y. Q. Li, J. X Tang, Recent advances in flexible organic light-emitting diodes, *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4, 9116-9142.
- [21] Y. C. Han, E. G. Jeong, H. Kim, S. Kwon, H.G. Im, B.-S. Bae, K. C. Choi, Reliable thin-film encapsulation of flexible OLEDs and enhancing their bending characteristics through mechanical analysis, *RSC Advances*, 2016, 6, 40835-40843.
- [22] S. R. Forrest, The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic, *Nature*, 2004, 428, 911-918.
- [23] J. Jensen, H. F. Dam, J. R. Reynolds, A. L. Dyer, F. C. Krebs, Manufacture and demonstration of organic photovoltaic powered electrochromic displays using roll coating methods and printable electrolytes, *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2012, 50, 536-545.
- [24] Y. Luo, C. Wang, L. Wang, Y. Ding, L. Li, B. Wei, J. Zhang, Flexible organic light-emitting diodes with enhanced light out-coupling efficiency fabricated on a double-sided nano-textured substrate, *ACS Applied Mater. Interfaces*, 2014, 6, 10213-10219.
- [25] M. Aleksandrova, Specifics and Challenges to Flexible Organic Light-Emitting Diodes, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 4081697.

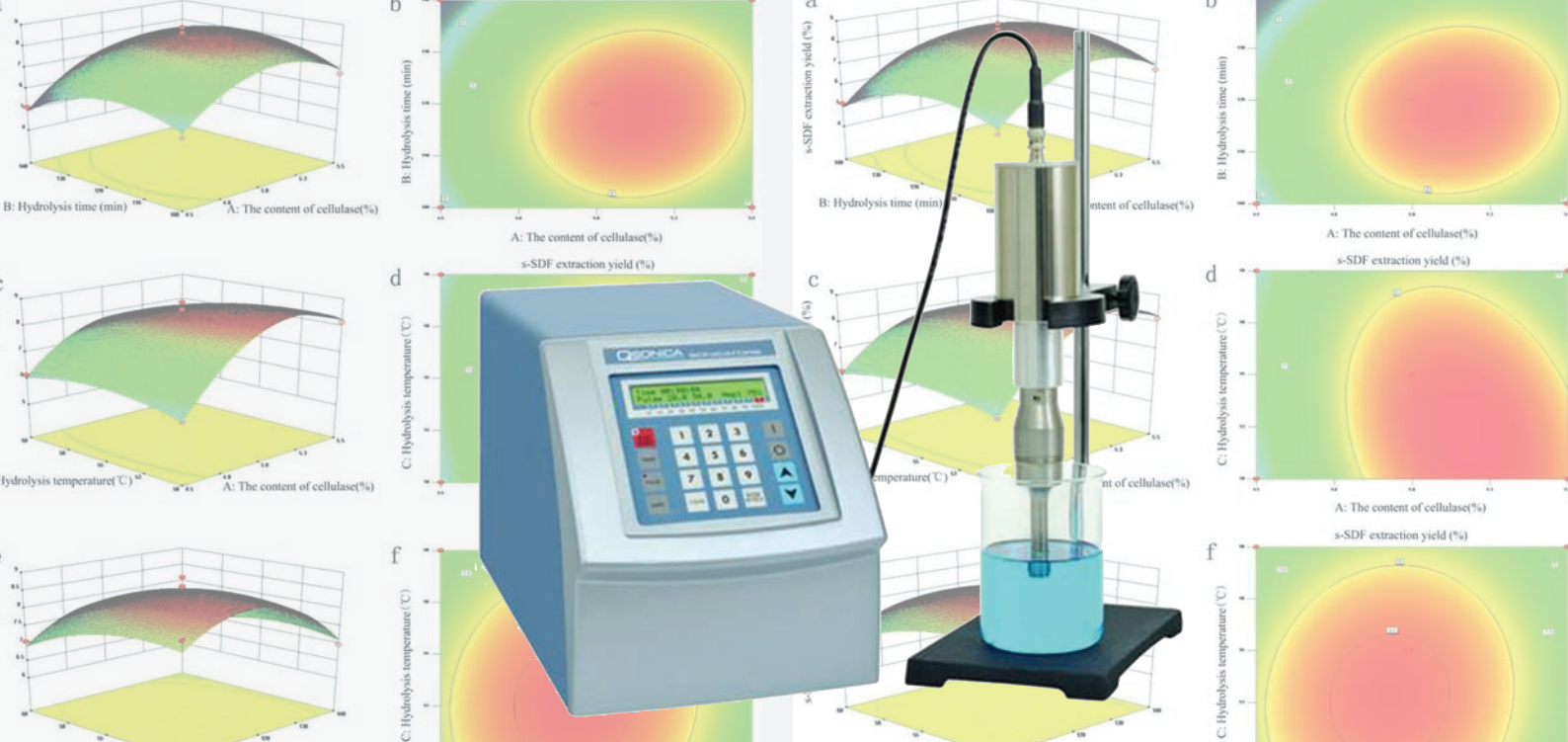
شده است. با توجه به اهمیت بارز دیودهای ساطع نوری آلی و حجم گسترده مطالعات انجام شده در این زمینه انتظار می‌رود که طی دهه آتی شاهد تجاری شدن دیودهای ساطع نوری آلی و جایگزین شدن LED با OLED در صنعت روشنایی باشیم.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Fractal properties
- 2 Chemical mechanical polishing technique
- 3 Poly (vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene)
- 4 Thin film encapsulation
- 5 Atomic layer deposition
- 6 Molecular layer deposition
- 7 Plasma enhanced ALD
- 8 Han
- 9 UV-curable cycloaliphatic-epoxy hybrid materials
- 10 Vacuum thermal evaporation
- 11 Regioregularity
- 12 Roll-to-Roll (R2R) printing
- 13 Gravure printing
- 14 Screen printing
- 15 Blade coating
- 16 Slot-die coating
- 17 Wetting
- 18 Gravure printing

مراجع

- [1] M Mohsennia, MM Bidgoli, FA Boroumand, A Khademi, Use of a New Blue Emitter in Color-Stable, Flexible, Polymeric White Light-Emitting Diodes with a Simple Structure, *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44 (8), 1-9.
- [2] MN Rezaie, N Manavizadeh, FD Nayeri, MM Bidgoli, E Nadimi, Effect of seed layers on low-temperature, chemical bath deposited ZnO nanorods-based near UV-OLED performance, *Ceramics International*, 2018, 44 (5), 4937-494.
- [3] M Nouri Rezaie, MM Bidgoli, N Manavizadeh, E Nadimi, FA Boroumand, Influence of ZnO nanorods on the performance of MEH-PPV based OLED in near UV range, 3rd International Conference on Nanotechnology (ICN2015), Istanbul, Turkey.
- [4] MR Fathollahi, FA Boroumand, Fabrication and simulation of polyfluorene-based organic light-emitting diodes, *Electrical Engineering (ICEE)*, 2012 20th Iranian Conference on, 77-81.
- [5] M Mohsennia, M Massah Bidgoli, FA Boroumand, Low driving voltage in polymer light-emitting diodes with CdS nanoparticles as an electron transport layer, *Journal of Nanophotonics*, 2015, 9, 093081-1 093081-9.
- [6] MM Bidgoli, M Mohsennia, FA Boroumand, Low driving voltage characteristics of polyaniline-silica nanocomposites as hole-injection material of organic electroluminescent devices, 2015, *Materials Research Bulletin* 72, 29-34.
- [7] N Manavizadeh, FA Boroumand, E Asl-Soleimani, F Raissi, Influence of substrates on the structural and morphological properties of RF sputtered ITO thin films for photovoltaic application, *Thin Solid Films*, 2009, 517 (7), 2324-2327.
- [8] W. S. Wong, A. Salleo, *Flexible electronics: materials and applications*, Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, 2009.
- [9] Y. Seo, G. Choi, W. Lee, Evaluation of electrical and optical



مقاله علمی-ترویجی

بررسی عملکرد و بهینه‌سازی دستگاه همگن‌ساز فراصوت به منظور ارتقا توان

■ هانی حسن نیا/ گروه الکترونیک/ واحد شهر قدس/ دانشگاه آزاد اسلامی/ تهران- ایران/ h.hassannia@gmail.com
 ■ مزده مهدوی/ گروه الکترونیک/ واحد شهر قدس/ دانشگاه آزاد اسلامی/ تهران- ایران/ m.mahdavi@qodsiau.ac.ir
 ■ مهدی زارع/ گروه الکترونیک/ واحد شهر قدس/ دانشگاه آزاد اسلامی/ تهران- ایران/ m.zare@gmail.com

چکیده

دستگاه‌های هموژنایزر اولتراسونیک برای همگن‌سازی محلول‌ها به کار می‌روند. اساس کار این دستگاه‌ها، تبدیل یک جریان الکتریکی به یک جریان ارتعاش مکانیکی و ایجاد امواج شدید فشاری صوتی در محیط‌های مایع می‌باشد. تحت شرایط مناسب، امواج فشاری در مایع، جریان‌هایی را بوجود آورده و موجب تشکیل سریع میکرو حباب‌ها می‌شود. رشد و یکی شدن این حباب‌ها تا رسیدن به اندازه بیشینه و در نهایت ترکیدن آنها، حرارت شدیدی ایجاد می‌کند و موجب پدیده کاواتاسیون می‌شود. تکرار عمل کاواتاسیون موجب همگن‌سازی محلول توسط این دستگاه می‌شود. این دستگاه در بسیاری از صنایع مانند داروسازی و غذایی کاربرد دارد. این دستگاه در بازار با توان‌های مختلفی در دسترس است که دارای ایرادهای اساسی است. از جمله ایرادهایی که می‌توان در دستگاه‌های مشابه خارجی یافت، توانایی کم در برابر حرارت ایجاد شده از افزایش توان و برخی ایرادات در تعامل با کاربر می‌باشد. در همین راستا در این مقاله به طراحی و ساخت بهینه یک دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک پرداخته شده که در آن، ضمن افزایش توان به پیاده‌سازی راهکارهایی برای مقاومت بیشتر دستگاه در برابر اثرات حرارتی افزایش توان پرداخته شده است. مهمترین ویژگی دستگاه طراحی شده ارتقا توان آن تا ۶۰۰ وات است که نسبت به نمونه‌های خارجی بهبود چشمگیری داشته است.

کلمات کلیدی: اولتراسونیک هموژنایزر، کاواتاسیون، همگن‌سازی، افزایش توان.

Functional Analysis and Optimization of an Ultrasonic Homogenizer for Fower Enhancement

■ Hani Hassannia/ Department of Electronics, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran./h.hassannia@gmail.com
 ■ Mojdeh Mahdavi/ Department of Electronics, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran./m.mahdavi@qodsiau.ac.ir
 ■ Mahdi Zare/ Department of Electronics, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran./m.zare@gmail.com

Abstract

Ultrasonic homogenizer devices are used to homogenize solutions. The basic functionality of these devices is the conversion of an electric current into a mechanical vibration current and the formation of intense pressure waves in liquid media. Under proper conditions, the pressure waves in the fluid create flow and cause rapid formation of micro bubbles. The growth and consolidation of these bubbles create intense heat and cause the cavitation phenomenon until they reach the maximum size and ultimately burst. The repetition of cavitation leads to homogenize the solution with this device. This device may be utilized in many industries such as pharmacy and food and is available in the market

with a variety of power delivery. In this paper, an optimal design and implementation of an ultrasonic homogenizer system has been proposed, in which, while increasing the power, the implementation solutions for increasing the resistance of the device to the thermal effects of increased power are introduced. Upgrading the power to 600 watts is the most important feature of the designed device, which has been improved dramatically in accordance to other devices.

Keywords: Ultrasonic Homogenizer, Cavitation, Homogenization, Power Enhancement.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر از همگن‌سازی^۱ در صنعت‌های گوناگونی استفاده شده است. همگن‌سازی، آمیختن شدید برای یکدست نمودن ذرات در دو ماده مرتبط به هم یا گروهی از مواد مربوط به هم برای ایجاد یک فرم ثابت از وجه‌های مختلف نامحلول برای به دست آوردن سوس پانسیون^۲ یا امولسیون^۳ است [۱].

همگن کردن فرایندی برای دستیابی به یکنواختی کامل در حد اندازه ذرات یک محصول است. همگن‌سازی شامل حوزه بسیار وسیعی از کاربردها و روش‌هاست. مفهوم همگن‌سازی، ترکیب کردن، مخلوط کردن، هم زدن، امولسیون‌سازی، پخش کردن، تکان دادن و غیره می‌باشد. همگن بودن مفهومی مرتبط با ویژگی‌های فیزیکی یکنواخت است. هرچند یک ماده ممکن است در مقیاس بزرگ‌تر همگن باشد در حالی که در مقیاس کوچک‌تر در داخل همان ماده ناهمگن است [۱].

نخستین دستگاه همگن‌ساز در سال ۱۸۹۹ توسط Gaulin ثبت اختراع شد. این اختراع شامل یک پمپ پیستونی بود که در آن ماده از طریق یک یا چند لوله موئین تحت فشار قرار می‌گرفت [۱].

همگن‌سازها را میتوان به سه دسته کلی تقسیم نمود. ۱- همگن‌ساز تحت فشار ۲- همگن‌ساز مکانیکی ۳- همگن‌ساز فراصوتی.

در روش تحت فشار که به طور معمول در نمونه‌های مایع استفاده می‌شود، تجهیزات خاصی به کار می‌رود. عمده کاربرد این روش در صنایع غذایی، لبنی، دارویی، شیمیایی و بیوتکنولوژی است [۲]. در این روش به وسیله پیستون‌های رفت و برگشتی، نمونه‌ها پشت یک شیر فشار قوی که در آن برای عبور ذرات، فاصله قابل تنظیمی وجود دارد، فشرده می‌شوند. ذراتی که از این محل عبور می‌کنند، به واسطه اختلاف فشاری که بین دو طرف شیر وجود دارد، دچار یک تلاطم شده و در اثر برخورد با سرعت بالا با یکدیگر باعث خرد شدن تمام ذرات می‌شوند. هدف از چنین عملی، تولید ترکیبات همگن و امولسیون با ذرات ریز آسیاب شده است. مطمئناً خروجی این روش تغییری در مشخصات مواد از قبیل رنگ، مقداریر طبیعی، قابلیت حلالی و پایداری پدید نخواهد آورد [۳]. دستگاه همگن‌ساز مکانیکی جهت ترکیب و همگن کردن مواد، طراحی شده که با پراکندن ذرات جامد در مایع، تشکیل امولسیون، سوسپانسیون یا محلول کامل، می‌دهد [۴]. به همین علت دارای طیف وسیع کاربرد در صنایع داروسازی، غذایی، بهداشتی، شیمیایی و نساجی جهت ساخت محلول‌ها، روکش‌های مواد، ساخت رنگ و فراورده‌های خوراکی می‌باشد [۵].

سومین نوع و از جمله مهمترین انواع همگن‌سازی، همگن‌ساز فراصوت^۴ میباشد. یکی از روشهایی که به طور گسترده برای تخریب سلول و همگن‌سازی استفاده می‌شود، همگن‌سازی فراصوت است. دستگاه همگن‌ساز فراصوت با ایجاد امواج شدید فشاری در یک محیط مایع کار می‌کند. امواج فشاری باعث ایجاد جریان در مایع شده و تحت شرایط مناسب، موجب تشکیل سریع میکرو حباب می‌گردد که رشد و یکی شدن این حباب‌ها تا رسیدن به اندازه بیشینه

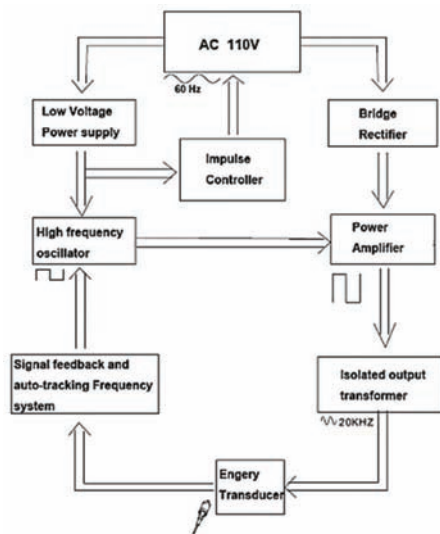
و در نهایت ترکیدن آنها حرارت شدیدی ایجاد می‌نماید. به این پدیده کاویتاسیون^۵ گفته می‌شود [۶]. انفجار حباب‌ها تولید موج ضربه‌ای با انرژی کافی کرده به طوری که قدرت این انرژی تا حد شکستن پیوند کووالانسی بین اتم‌ها است [۷]. این انرژی موجب شکسته شدن و در واقع از هم پاشیدن مولکول‌ها می‌شود. نیروی شدید حاصل از انفجار حباب و همچنین جریان‌های اغتشاشی ناشی از ارتعاش صوتی برای همگن‌سازی و تخریب سلول استفاده می‌شود. این فرآیند می‌تواند به پاشش مایع با سرعتی در حدود ۴۲۰ کیلومتر در ساعت و ایجاد فشاری معادل ۲۰۰ بار در آن شود [۷].

همگن‌ساز فراصوت دستگاهی به منظور تبدیل یک جریان الکتریکی به یک ارتعاش مکانیکی است که سبب همگن شدن محلول میشود. در سالهای اخیر شرکت‌های مختلفی به طراحی و ساخت همگن‌ساز فراصوت با ویژگی‌های مختلف پرداختند. این دستگاه‌ها در بازار با توان‌های مختلفی در دسترس هستند، اما بسیاری از آنها توانایی کمی در برابر حرارت ایجاد شده از افزایش توان دارند. در همین راستا در این مقاله به طراحی و ساخت یک دستگاه همگن‌ساز فراصوت پرداخته شده است که در آن، ضمن افزایش توان از طریق افزایش فاصله هوایی در سلف‌ها، به پیاده‌سازی راهکارهایی برای مقاومت بیشتر دستگاه در برابر اثرات حرارتی افزایش توان پرداخته شده است. در ادامه مقاله مشاهده می‌شود که دستگاه پیشنهادی در مقایسه با دستگاه‌های مشابه خارجی در پارامترهای عمده که هدف بهبود آن پارامترها است (مانند توان، حجم محلول اولتراسونیک شده، تعامل بهتر با کاربر و جلوگیری از خسارت به دستگاه و اطراف آن) بهتر عمل کرده است. مهمترین ویژگی دستگاه طراحی شده ارتقا توان آن تا ۶۰۰ وات است که نسبت به نمونه‌های خارجی بهبود چشمگیری داشته است.

در بخش ۲ این مقاله به شرح عملکرد دستگاه همگن‌ساز فراصوت پرداخته و پس از آن در بخش ۳ ساختار دستگاه پیشنهادی شرح داده شده است. در بخش ۴ نتایج حاصل، تحلیل شده و در بخش ۵ نتیجه‌گیری نهایی مقاله آمده است.

۲- اولتراسونیک هموژنایزر

دستگاه‌های اولتراسونیک هموژنایزر دستگاه‌هایی چندتابعی و چندهدفه می‌باشند که از ویژگی صوت فرکانس بالا استفاده می‌کنند. استفاده از این نوع صوت، به منظور ایجاد حفره در مایع برای دسترسی به تولید انرژی بالا انجام می‌پذیرد. در شکل (۱) شماتیک کلی از یک دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر نمایش داده شده است. دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر، از یک منبع تغذیه و یک مبدل اولتراسونیک تشکیل شده است. منبع تغذیه اولتراسونیک انرژی الکتریکی ۲۲۰ ولت AC و ۶۰ هرتز تک‌فاز را به یک سیگنال الکتریکی ۶۰۰ ولت و ۲۰ تا ۲۵ کیلوهرتز تبدیل می‌کند. بخش‌های مختلف مدار الکتریکی یک دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر نیز از اجزایی مانند



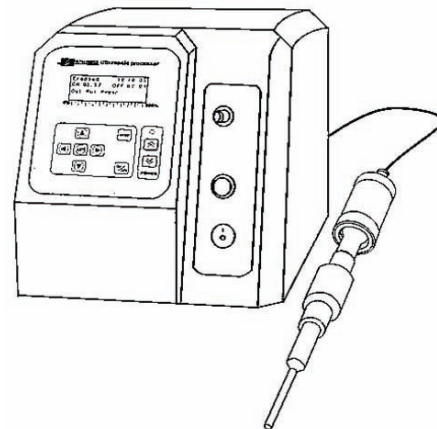
شکل ۲: دیاگرام الکتریکی اولتراسونیک هموژنایزر [۷].

۳- سیستم پیشنهادی

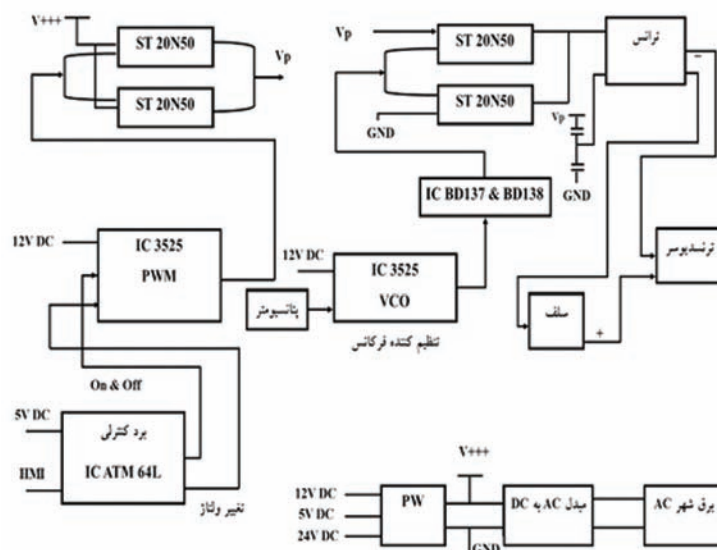
در این بخش به شرح ساختار سیستم پیشنهادی جهت طراحی دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر می‌پردازیم. ویژگی‌های مهم دستگاه ارایه شده در این مقاله را می‌توان به صورت ذیل خلاصه کرد:

- برخورداری از یک HMI¹⁰ برای تعامل بیشتر و راحت تر با کاربر
- برخورداری از تنظیم خودکار در راستای پردازش راحت و بهره‌وری بیشتر
- نشانگر دما و کنترل کننده آن
- توانایی کار مداوم تا ۹۹ ساعت و برخورداری شمارنده برای این واحد زمانی
- جبران‌ساز دامنه اتوماتیک

در شکل (۳) نیز بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی و نحوه ارتباط اجزا آن با یکدیگر نشان داده شده است. یک مبدل AC به DC با سه سطح تولید ولتاژ ۱۲، ۵ و ۲۴ ولت برای راه‌اندازی و تغذیه بخش‌های



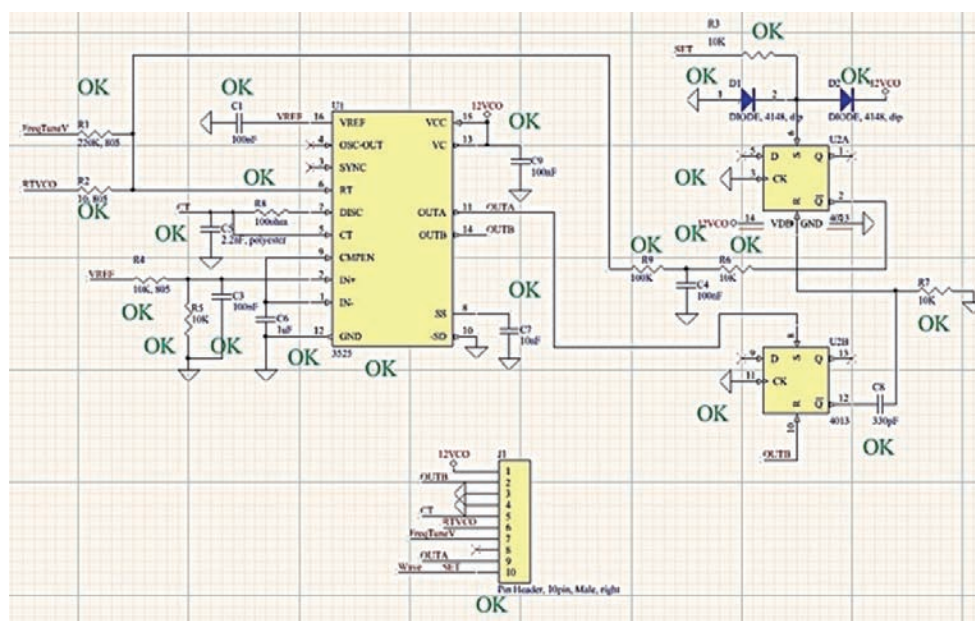
شکل ۱: شماتیک کلی از یک دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر [۷].



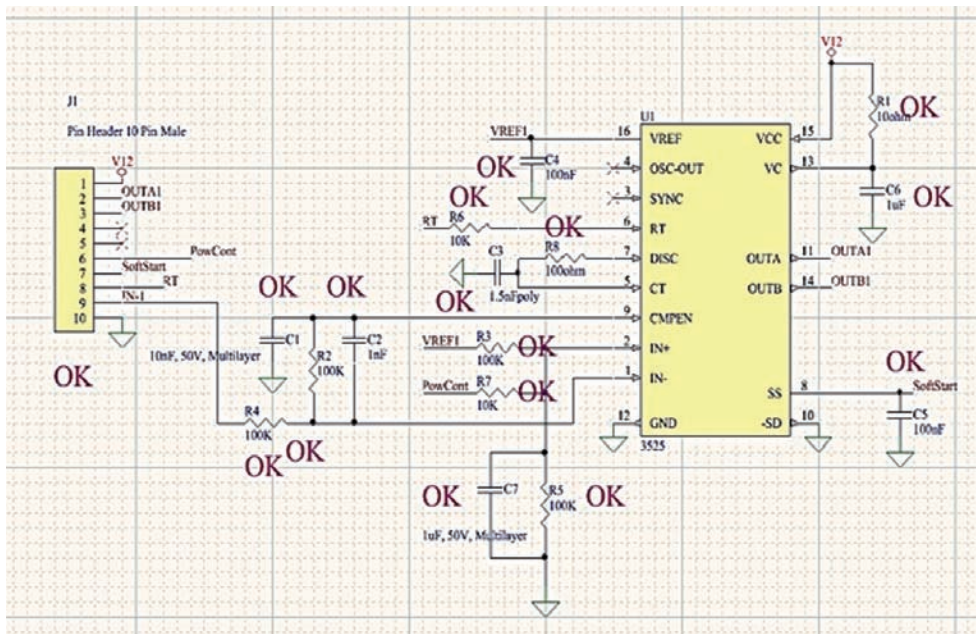
شکل ۳: بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی

همان‌گونه که در شکل (۵) قابل ملاحظه است، پایه‌های ۱ و ۲ تراشه که به ورودی‌های مثبت و منفی اختصاص دارد، به ترتیب به ورودی کنترل توان و ولتاژ رفرنس متصل هستند. در واقع معیار کنترل توان در این شماتیک، همان ورودی پایه یک تراشه خواهد بود. دو خروجی

خروجی PWM در شماتیک شکل (۳) همان گونه که ملاحظه می‌شود، وارد گیت ترانزیستورهای ماسفت می‌شود. ورودی ماسفت‌های موازی، یک ورودی V^{++} که به منزله ورودی ۲۲۰ ولت است و یک ورودی دیگر نیز از برد PWM می‌باشد. خروجی این دو ماسفت موازی یک V_p می‌باشد که این ولتاژ ورودی دو ماسفت سری نشان داده شده در شکل (۴) خواهد بود. خروجی ماسفت‌های سری به یک سر ترانس وارد می‌شود. ورودی دیگر ترانس از یک مقسم خازنی گرفته می‌شود. خروجی ترانس از یک سر به ترنسدیوسر و از سر دیگر وارد سلف می‌شود که با افزایش و در واقع تنظیم فاصله هوایی آن به افزایش



شکل ۴: شماتیک مدار VCO



شکل ۵: شماتیک بخش PW

وارد کردن عدد توان مد نظر در کادر روبروی میله توان، مقدار توان دلخواه را به دستگاه معرفی نمود که به نوبه خود در دستگاه‌های مشابه موجود نیست.

OutB1 و OutA1 نیز خروجی‌های مدار PW هستند که با توجه به دو ورودی In^+ و In^- تغییر می‌کنند.

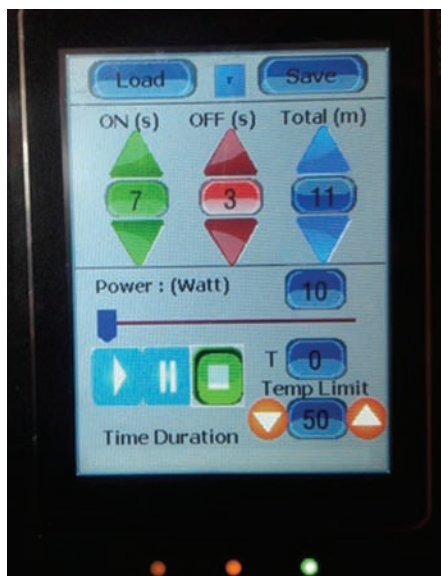
همچنین با تعبیه یک HMI امکان برقراری ارتباط آسان‌تر با کاربر نیز فراهم گردیده است. همچنین امکان تنظیم زمانی برای دوره تناوب پالس ترنسیدوسر و همچنین تنظیم بازه زمانی on و off پالس تولید شده نیز در سیستم پیشنهادی تعبیه شده است که در نسخه‌های پیشین کمتر مشاهده شده است.

۳- تحلیل نتایج

یکی از مزایای مهم دستگاه پیشنهادی که در دستگاه‌های مشابه وجود ندارد، صفحه نمایش لمسی بصورت HMI می‌باشد. بدین ترتیب که با تعبیه یک صفحه نمایش در این دستگاه که به صورت لمسی عمل می‌کند، امکانات مختلفی در آن گنجانده شده است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود. شکل (۶) شمای کلی از صفحه نمایش را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است برد برنامه‌نویسی صفحه نمایش لمسی HMI برد ATMEGA64 می‌باشد. با بررسی نسخه‌های پیشین از این دستگاه می‌توان ملاحظه نمود که بیشتر نسخه‌های این دستگاه از حالت‌های دکمه‌ای به جای لمسی برای راه‌اندازی دستگاه استفاده می‌کردند که همان گونه که در تصویر نشان داده شده است، با اضافه کردن صفحه نمایش HMI به این دستگاه نقطه تمایزی میان دستگاه پیشنهادی با دستگاه‌های دیگر ارایه شده است که واسط مناسبی بین کاربر و دستگاه می‌باشد.

از جمله قابلیت‌هایی که این صفحه نمایش برای کاربران ایجاد نموده است، (علاوه بر قابلیت Play و Stop که در نسخه‌های قبلی موجود بود)، یک قابلیت Pause نیز به آن اضافه شده است که امکان توقف مقطعی و موقتی در عملکرد دستگاه را فراهم می‌سازد. علاوه بر این قابلیت، یک قابلیت میله توان نیز به این صفحه نمایش اضافه شده است. این میله قابلیت تغییر توان وارده به پروپ برای اعمال به محلول را تا ۶۰۰ وات فراهم می‌سازد. علاوه بر تغییر دستی میله توان که در کادر مقابل آن مقدار توان وارده نشان داده می‌شود، می‌توان با

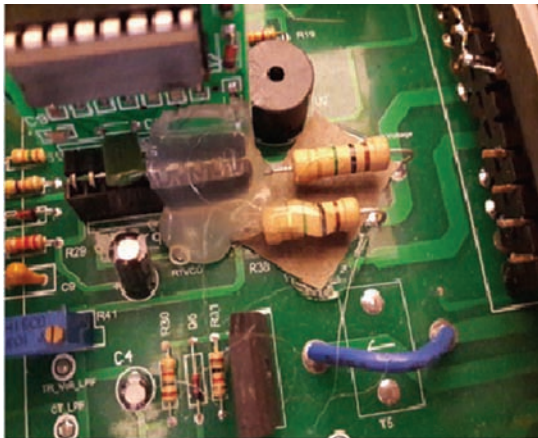


شکل ۶: صفحه نمایش لمسی دستگاه پیشنهادی

تا بدین جا مزیت‌هایی که با استفاده از صفحه نمایش لمسی HMI به دستگاه پیشنهادی اضافه شده است، تشریح شد. در ادامه با توجه به اینکه ایده اصلی ما در این دستگاه، افزایش توان دستگاه بوده است، تکنیک‌های مداری به کار رفته جهت افزایش توان و بازدهی دستگاه نشان داده خواهد شد. شکل (۷) سلف و هسته آن را در برد اصلی نشان می‌دهد. در این جزء مدار، با افزایش فاصله یا گپ هوایی سلف از طریق چسباندن چند لایه چسب به یکی از هسته‌های کناری سلف، اندوکتانس^{۱۵} سلف را پایین آورده و به تبع آن توان دستگاه را افزایش داده‌ایم. بنابراین یکی از عوامل افزایش توان دستگاه پایین

در حالت ابتدایی مقدار توان مقاومت برابر ۱ وات بود که با بهبود مدار به ۲ وات رساندیم.

یکی دیگر از مواردی که با افزایش توان دستگاه ایجاد مشکل مینمود، سوختن ترانزیستورهای ماسفت بکار رفته در دستگاه پایه بود. بدین ترتیب که پس از افزایش توان دستگاه و ایجاد گرما در ترانزیستورهای ماسفت، گرمای ایجاد شده از طریق خنک‌کننده‌های موجود در پشت ترانزیستورهای ماسفت دفع نمی‌گردید، از این رو باعث سوختن آنها می‌شد.

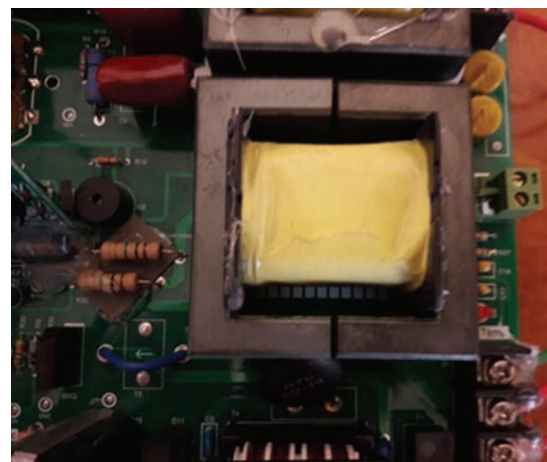


شکل ۸: مقاومت فیدبک سیستم پیشنهادی

ترانزیستورهای بکار رفته در دستگاه پایه از نوع 20N50 (۲۰ آمپر ۵۰۰ وات) می‌باشند. از این رو برای رفع این مشکل و با توجه به شماتیک مداری دستگاه، و همچنین با توجه به عناصر موجود در بازار ایران، از ترانزیستور 48N6۰ (۴۸ آمپر ۶۰۰ وات) استفاده شد که مشکل داغ شدن و سوختن ترانزیستورهای 20N50 را کاملاً برطرف نمود.

پس از رفع مشکل ناشی از ترانزیستورها، عامل بعدی که موجب مشکلاتی پس از افزایش توان بود، ورود لحظه‌ای ولتاژ به فیوز و سوختن آن بود. با توجه به اینکه فیوز بکار رفته در دستگاه پایه، ۳ آمپر بود و باتوجه به اینکه افزایش توان فیوز قادر است به خود سیستم آسیب برساند، بنابراین توان فیوز نسبت به دستگاه پایه تغییری نکرد، اما برای رفع مشکل از قطعه NTC استفاده شد. قرار دادن این عنصر در ورودی پل دیودها موجب جلوگیری از اعمال ناگهانی ولتاژ و در واقع شیبدار شدن ورودی ولتاژ که پیشتر به صورت لحظه‌ای بود، می‌شود. با توجه به اینکه NTC با توان بالا در بازار ایران موجود نبود، از این رو اقدام به موازی کردن دو NTC از نوع 5D20 کردیم. این عمل موجب افزایش توان NTC‌های بکار رفته در سیستم شد. موازی کردن این دو NTC موجب افزایش توان NTC شده و باعث شد ایراد بوجود آمده از اعمال لحظه‌ای توان به فیوز و پل دیودها نیز به‌طور کامل برطرف شود. پس از برطرف کردن ایرادهای ناشی از ورودی و قسمت‌های میانی دستگاه که در اثر افزایش توان دستگاه حاصل شده بود، نوبت به بررسی اثرات این افزایش توان در خروجی دستگاه می‌رسد. لازم به ذکر است که ورودی ولتاژ در این دستگاه برابر ۲۰۰۰ ولت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد. این ولتاژ طبیعتاً بر سر پیزوالکتریک اعمال خواهد شد که این امر به زبان ساده به این معنی خواهد بود که پیزوالکتریک در هر ثانیه ۲۰۰۰ بار ضربه خواهد زد. لذا این موضوع قدرت نوسان پیزوالکتریک را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. نوسان خروجی از طریق یک مبدل، تقویت شده و به سر پروپ می‌رسد، خروجی راه انداز، (که بر سر

آوردن اندوکتانس سلف از طریق افزایش فاصله هوایی آن می‌باشد. اما امر بدیهی این که صرف افزایش توان، تبعاتی از نظر افزایش جریان و ولتاژ اعمالی به اجزای مختلف مدار خواهیم داشت که به‌طور قطع نیازمند کنترل می‌باشد. پس از ایجاد گپ هوایی، مقدار اندوکتانس سلف کاهش پیدا کرده و توان دستگاه رو به افزایش خواهد گذاشت. بدیهی است نخستین اثر افزایش جریان و ولتاژ اعمالی به اجزای مختلف و در واقع نخستین اثر افزایش توان دستگاه، گرم شدن سلف و ترانس دستگاه می‌باشد که در صورت عدم کنترل آن موجب به بار آوردن خسارات به دستگاه خواهد شد. در واقع افزایش توان دستگاه عملاً کار سختی به حساب نمی‌آید، بلکه کنترل تبعات ناشی از آن بیشترین سختی را در پی خواهد داشت. از جمله تبعات افزایش توان میتوان به گرم شدن سلف و ترانس دستگاه اشاره کرد که این دو مورد می‌تواند به کوتاه شدن عمر سلف و ترانس و در گذر زمان به سوختن این دو قطعه بیانجامد که با افزایش تعداد لایه سیم، سلف و ترانس قادر شدیم، ظرفیت گرمایی این دو را افزایش دهیم. از جمله اقدامات دیگری که برای رفع مشکلات ناشی از افزایش توان انجام شد میتوان به تعویض ترانزیستورها (به نسبت افزایش آمپر جریان و ولتاژ)، ایجاد خنک کننده (برای خنک نمودن ترانسدایوسر)، تعبیه سنسور دما، درب راه انداز و در نهایت استفاده از قطعه DVR^{۱۶} (اصلاحگر دینامیکی ولتاژ) [۸]، تقویت NTC^{۱۷} (ترمیستورهای ضریب دمایی منفی) و مقاومت فیدبک، اشاره نمود که در بخش‌های بعدی کاربرد این دو قطعه آمده است.



شکل ۷: سلف و هسته سیستم پیشنهادی

برای بهبود ظرفیت گرمایی سلف و مقابله با گرمای ناشی از کاهش اندوکتانس و افزایش توان، تعداد لایه‌های سیم‌پیچی را از ۹ لایه به ۱۱ لایه افزایش دادیم. همچنین برای جلوگیری از داغ شدن ترانس نیز باید تعداد لایه‌های سیم‌پیچی افزایش می‌افتد که به علت نبود فضا برای انجام این عمل بر روی ترانس، یک ترانس مشابه با ترانس نخست با آن موازی شده است تا از داغ شدن ترانس جلوگیری به عمل آید.

یکی دیگر از مشکلاتی که برای سیستم پیشنهادی در اثر افزایش توان بوجود می‌آمد، داغ کردن و در نهایت سوختن مقاومت فیدبک بوده است که برای جلوگیری از این امر، توان مقاومت را بالا برده‌ایم. شکل (۸)، مقاومت فیدبک مذکور را نشان می‌دهد. مقاومت اولیه در توان ۴۰۰ وات، توانایی کافی در برابر گرما را داشت، اما با افزایش توان دستگاه به ۶۰۰ وات، تحمل میزان گرمای ناشی از آن را نداشته و می‌سوخت. بنابراین مقدار توان این مقاومت را دو برابر افزایش دادیم.

ترانسدیوسرها و پیزوالکتریک، اعمال می‌شود، به دلیل اعمال توان افزایش یافته بر سر پروپ تیتانیومی، صدمه خواهد دید. این خرابی موجب ایجاد یک فیدبک به سلف و ترانس شده که موجب داغ شدن و سوختن آنها و در نهایت وارد شدن خسارت به دستگاه می‌شود. در راستای برطرف کردن این ایراد نیز، از قطعه DVR استفاده شد. کاربرد قطعه DVR در این دستگاه در زمان خرابی نوک پروپ و خارج نشدن توان خروجی است، به‌صورتی که به‌واسطه DVR، خروجی به سرعت اتصال کوتاه شده و عملکرد دستگاه قطع می‌گردد به‌نجوی که فیدبک برگشتی، به سلف و ترانس آسیب نزند.

از جمله مشکلات دیگری که در خروجی بوجود می‌آید، ایجاد گرما در اثر افزایش دامنه ولتاژ و به تبع آن افزایش قدرت ضربه زدن ترانسدیوسر می‌باشد. بدیهی است که چون سیستم ضربه زدن ترانسدیوسر یک سیستم مکانیکی می‌باشد، افزایش دامنه ولتاژ که افزایش تحرک را در آن به دنبال دارد، موجب افزایش گرمای بوجود آمده ناشی از افزایش توان دستگاه خواهد شد. بنابراین برای جلوگیری از این داغ شدگی، از یک خنک‌کننده برای خنک کردن ترانسدیوسر استفاده شده است.

خروجی ولتاژ راه‌انداز الکترونیکی دستگاه با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز روی پیزوالکتریک، نوسان کرده و ایجاد موج می‌نماید. این نوسان توسط مبدل، تقویت شده و از طریق نوک ترانسدیوسر (پروپ) تیتانیومی، به‌صورت عمودی به محلول ضربه می‌زند و موجب ایجاد حباب در محلول شده و با ترکیدن حباب در محلول، محلول در ابعاد نانو ریز شده و با یکدیگر ترکیب می‌شود. شایان ذکر است که این امواج مافوق صوت هستند.

با افزایش قدرت ضربات ترانسدیوسر و افزایش دما، دمای محلول (که از سیستم پیشنهادی برای همگن‌سازی آن استفاده شده است) نیز افزایش خواهد داشت. بنابراین قرار دادن یک محدودیت دمایی در این سیستم برای محلول نیز از جمله ضروریات خواهد بود. بدین ترتیب که در صورت رسیدن دمای محلول به یک مقدار معین تعیین شده توسط کاربر، دستگاه عمل کاواتاسیون را قطع نموده و از کار بیفتد. در همین راستا از یک سنسور PT100 که یک سنسور دما می‌باشد، استفاده شده است. با استفاده از برنامه‌نویسی بر روی میکروکنترلر، دمای محلول استخراج شده و با مقدار محدودیت تنظیم شده توسط کاربر مقایسه می‌شود. در صورتی که این دما بیشتر از محدودیت دمایی تنظیم شده باشد، عمل کاواتاسیونی که پروپ بر روی محلول انجام می‌دهد، قطع می‌شود.

قابلیت بعدی اضافه شده به دستگاه پیشنهادی، حس گر^{۱۸} درب جعبه دستگاه، می‌باشد. با توجه به افزایش توان دستگاه و ایجاد خطرهای احتمالی به تبع آن، یک حس گر به سیستم اضافه شده است. این حس گر بدین‌صورت عمل می‌کند که پس از باز شدن درب جعبه، عملکرد دستگاه خود به خود متوقف می‌شود. این قابلیت در سیستم‌های قبلی موجود نبوده است.

پس از افزودن تمامی قابلیت‌های مذکور و کنترل اثرات ناشی از افزایش توان در دستگاه پیشنهادی، آزمایش‌هایی پیرامون قابلیت‌های دستگاه جدید، انجام پذیرفت تا ظرفیت‌های مختلف دستگاه بررسی شده و بتوان برای مقایسه دستگاه مذکور با دستگاه‌های مشابه، اقدام نمود. در ادامه نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف ذکر خواهد شد.

در جدول (۱) ویژگی‌های دستگاه طراحی شده، آمده است. مشاهده می‌شود که جریان ورودی سمت چپ ۶ تا ۱۰ آمپر و توان خروجی سمت چپ ۶۰۰ تا ۹۰۰ وات می‌باشد. همچنین سیستم پیشنهادی دارای محفظه‌ای عایق صوتی بوده و قابلیت استفاده منقطع پالسی و تنظیم دامنه ولتاژ را دارد. اما توانایی تنظیم فرکانس را ندارد.

دستگاه پایه‌ای که در این پژوهش مقایسه نسبت به آن انجام می‌شود، هموژنایزر اولتراسونیک مدل UP400ST [۹-۱۰] ساخت شرکت Hielscher آلمان می‌باشد که از بهترین نوع دستگاه همگن‌ساز در دسترس در بازار ایران است. جدول (۲) مقادیر توان، فرکانس، قطر سونوترو^{۱۹} و چند پارامتر دیگر را برای سیستم پیشنهادی و دو مدل UP200HT و UP400ST [۱۱-۱۲] نشان داده شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های دستگاه پیشنهادی

جریان ورودی سمت چپ	۶ تا ۱۰ آمپر
توان خروجی سمت چپ	۶۰۰ - ۹۰۰ وات
محفظه عایق صوتی	دارد
قطر انتهایی تقویت‌کننده	۲۵-۳ میلی‌متر
قابلیت استفاده منقطع پالسی	دارد
قابلیت تنظیم فرکانس	ندارد
قابلیت تنظیم دامنه ولتاژ	دارد

جدول ۲: مقایسه مشخصات اصلی دستگاه پیشنهادی با دو مدل UP200HT و UP400ST

مشخصات دستگاه	UP200HT	UP400ST	دستگاه پیشنهادی
توان	۲۰۰ وات	۴۰۰ وات	۶۰۰ وات
فرکانس	۲۶ کیلوهرتز	۲۴ کیلوهرتز	۲۰ کیلوهرتز
قطر سونوترو	۳ تا ۴۰ میلی‌متر	۳ تا ۴۰ میلی‌متر	۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر
مدت زمان استفاده	۲۴ ساعته/هفت روز هفته	۲۴ ساعته/هفت روز هفته	۲۴ ساعته/هفت روز هفته
حجم اولتراسونیک شده در روز	۱۸۰ لیتر با توجه به کاربرد	۲۰۰ لیتر با توجه به کاربرد	۳۰۰ لیتر با توجه به کاربرد
حجم مناسب محلول جهت عملیات	۰.۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر	۵ تا ۴۰۰۰ میلی‌متر	۱۰ تا ۶۰۰۰ میلی‌لیتر

همان‌گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، دستگاه پیشنهادی در مقایسه با دستگاه‌های مشابه خارجی در پارامترهای عمده که هدف بهبود آنها را داشتیم (مانند توان و حجم محلول اولتراسونیک شده) بهتر عمل کرده است. همچنین علاوه بر این مزیت عمده، یک سری ویژگی‌هایی در سیستم پیشنهادی اعمال شد که در مشابه خارجی آن وجود ندارد. مانند صفحه HMI که حاوی قابلیت‌های متعددی مانند ذخیره کردن عملکردهای پرتکرار دستگاه و همچنین میله توان می‌باشد که در دستگاه‌های مورد مقایسه در این مقاله وجود ندارد. در دستگاه پیشنهادی از محدوده دمایی با استفاده از حسگر PT100 استفاده شده است که در صورت رد شدن از این محدوده، دستگاه عملکرد خود را متوقف می‌کند. همچنین حسگر درب نیز از جمله دیگر امکاناتی است که در پژوهش‌های مشابه یافت نمی‌شود. بنابراین دستگاه پیشنهادی علاوه بر این که توان دستگاه‌های اولتراسونیک هموژنایزر را بیشتر کرده است قابلیت‌های جدیدی را نیز به آن اضافه کرده است که در سیستم‌های قبلی یافت نمی‌شود. از جمله پارامترهایی که در دستگاه‌های مشابه بیشتر از دستگاه پیشنهادی بوده است، فرکانس دستگاه بود که در دستگاه پیشنهادی جهت مقابله با گرمای ناشی از افزایش فرکانس، نسبت پژوهش‌های مشابه کمتر در نظر گرفته شد. به‌عنوان مثال فرکانس در دستگاه‌های UP400ST و UP200HT به ترتیب ۲۴ و ۲۶ کیلوهرتز است، که در دستگاه پیشنهادی به دلیل فوق، به ۲۰ کیلوهرتز کاهش داده شده است. از نظر حجم محلول در روز نیز، بسته به کاربرد، دستگاه پیشنهادی عملکرد مناسب‌تری دارد.

- works and genetic algorithms for sizing of photovoltaic systems. Renewable Energy, Vol. 35, Pages 2881-2893, 2010.
- [11] AB. Kanase-Patil, RP. Saini, MP. Sharma, Integrated renewable energy for off grid rural electrification of remote area, Renewable Energy, Vol. 35, Pages 1342-1349, 2010.
- [12] FO. Hocaoglu, ON. Gerek, M.A. Kurban, novel hybrid (wind-photovoltaic) system sizing procedure, Solar Energy, Vol. 83, Pages 2019-2028, 2009.
- [13] ES. Sreeraj, K. Chatterjee, S. Bandyopadhyay, Design of isolated renewable hybrid power systems. Solar Energy, Vol. 84, Pages 1124-1136, 2010.
- [14] BE. Turkey, AY. Telli, Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems, Renewable Energy, Vol. 36, Pages 1931-1943, 2011.
- [15] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/wind energy conversion system, Solar Energy, Vol. 85, Pages 2407-2420, 2011.
- [16] BO. Bilal, V. Sambou, PA. Ndiaye, CMF. Kebe, M. Ndong, Optimal design of hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP). Renewable Energy, Vol. 35, Pages 2388-2390, 2010.
- [17] A. Kashefi Kaviani, H.R. Baghaee, G.H. Riahy, Design and Optimal Sizing of a Photovoltaic/Wind-generator System Using Particle Swarm Optimization, Proceedings of the 22nd Power System Conference (PSC), 2007.
- [18] <http://www.yinglisolar.com>. Available at: 2018/12/10.
- [19] R. Karki, R. Billinton, Reliability/cost Implications of PV and Wind Energy Utilization in Small Isolated Power Systems, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 16, Pages 368-373, 2001.
- [20] <http://www.windpowercn.com/products/11.html>. Available at: 2019/1/15.
- [21] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Wiley, ISBN 0-471-28060-7, 2004.
- [22] R.S. Garcia, D. Weissner, A Wind-diesel System with Hydrogen Storage: Joint Optimization of Design and Dispatch, Renewable Energy, Vol. 31, Pages 2296-2320, 2006.
- [23] Bagen, R. Billinton, Evaluation of Different Operating Strategies in Small Stand-alone Power Systems, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, Pages 654-660, 2005.
- [24] R. Billinton, R.N. Allan, Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2nd edition, Plenum Press, New York, 1992.
- [25] M. Marchesoni, S. Savio, Reliability Analysis of a Fuel Cell Electric City Car, European Conference on Power Electronics and Applications, Page10, 2005.
- [26] M.K. Khairil, S. Javanovic, Reliability Modeling of Uninterruptible Power Supply Systems using Fault Tree Analysis Method, European Transaction on Electrical Power, Vol. 19, Pages 258-273, 2007.
- [27] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis, Methodology for Optimal Sizing of Stand-alone Photovoltaic/Wind-generator Systems using Genetic Algorithms, Solar Energy, Vol. 80, Pages 1072-1088, 2006.
- [28] K. Strunz, E.K. Brock, Stochastic Energy Source Access Management: Infrastructure-integrative Modular Plant for Sustainable Hydrogen-electric Co-generation, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 31, Pages 1129-1141, 2006.
- [29] D. Menniti, A. Pinnarelli, A Method To Improve Micro grid Reliability By Optimal Sizing PV/WIND Plants And Storage Systems, 20th International Conference on Electricity Distribution, Page 1, 2009.
- [30] M. Tanrioven, M.S. Alam, Reliability Modeling and Analysis of Stand-alone PEM Fuel Cell Power Plants, Renewable Energy, Vol. 31, Pages 915-933, 2006.
- [31] V. P.Gountis, A. G.Bakirtis, Efficient Determination of Cournot Equilibria in Electricity Markets, IEEE transaction on power system, Vol. 19, Pages 1837-1844, 2004.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن طراحی و ساخت یک دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر، به بهبود نقاط ضعف دستگاه‌های مشابه در پژوهش‌های قبلی برای بومی‌سازی دستگاه بهینه در ایران پرداخته شد. در این ساختار، به پیاده‌سازی راه‌کارهایی برای مقاومت بیشتر دستگاه در برابر اثرات حرارتی افزایش توان پرداخته شد. با تعبیه یک رابط در این دستگاه، امکان تعامل گرافیکی با کاربران نیز مهیا گردیده است. همچنین قابلیت‌های بیشتری مانند سنسور دما و فن خنک‌کننده نیز نسبت به دستگاه‌های مشابه اضافه شد که در صورت رسیدن دستگاه به یک دمای معین، ادامه کار آن را متوقف می‌سازد. فرکانس در دستگاه‌های مشابه خارجی ۲۴ و ۲۶ کیلوهرتز است، که در دستگاه پیشنهادی به جهت مقابله با گرمای ناشی از افزایش فرکانس، به ۲۰ کیلوهرتز کاهش داده شده است. این درحالی است که توان در دستگاه پیشنهادی از ۴۰۰ وات در نمونه خارجی به ۶۰۰ وات افزایش یافته است. حجم مایع همگن شده برای بهترین دستگاه خارجی موجود در بازار، ۲۰۰ لیتر در روز بوده در حالیکه برای دستگاه پیشنهادی به ۳۰۰ لیتر در روز افزایش یافته است.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Homogenization
- 2 Suspension
- 3 Emulsion
- 4 Ultrasonic Homogenizer
- 5 Cavitation
- 6 Phase Locked Loop
- 7 Transducer
- 8 Resonator
- 9 Probe
- 10 Human Machine Interface(HMI)
- 11 Pulse-width modulation
- 12 Duty Cycle
- 13 Power Supply
- 14 Voltage-controlled oscillator
- 15 Inductance
- 16 dynamic voltage restorer (DVR)
- 17 Negative Temperature Coefficient (NTC)
- 18 Sensor
- 19 Sonotrode

مراجع

- [1] E. Ensminger, D. Stulen, Ultrasonics: data, equations and their practical uses. CRC Press, pp. 150-151, 2008.
- [2] H. Barraza, D. Toro-Sanchez, R. Cruz, "Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins" Elsevier Trans. Ultrasonics sonochemistry, Vol. 31, No. 1, pp. 558-562, 2016.
- [3] P. Paquin "Technological properties of high pressure homogenizers: the effect of fat globules, milk proteins, and polysaccharides", Int. Dairy Journal, Vol. 9. No.3: pp. 329-335, 1999.
- [4] P. Dhankhar, "Homogenization Fundamentals," IOSR Journal of Engineering. Vol. 04, No. 05, pp. 01-08, 2014.
- [5] G. Pollet, "Let's not ignore the ultrasonic effects on the preparation of fuel cell materials homogenization Fundamentals," SPRINGER Trans. Electro catalysis, Vol. 5, No. 4, pp. 330-343, 2014.
- [6] J. Wang, "Ultrasonic Machining," intechopen.75170 Open access peer-reviewed chapter, 2018.
- [7] D. Ensminger, L. J. Bond, "Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications", CRC Press. pp. 10-12, 2011.
- [8] H.M. Shertukle, Distributed Photovoltaic Grid Transformers. CRC press, pp. 10-12, 2017.
- [9] http://www.imlab.com/hielscher/UP400St_SPEC_HIELSCHER_IMLAB_eng.pdf
- [10] R. Ranjbarzadeh, "Preparing and Investigation a New Nanofluid for Employing in Machining Process: Synthesis and Characterization of Graphene Oxide Nanoparticles", Journal of Advanced Materials and Processing, Vol. 5, No. 4, pp. 3-11, 2017.
- [11] <http://www.maneko.cz/data/Hielscher/UP200Ht.pdf>
- [12] P. Daniella, A. Fabiano-Tixier, and F. Chemat. "An improved ultrasound Clevenger for extraction of essential oils." Food Analytical Methods, pp. 91-95, 2014.



مقاله علمی-ترویجی

تشخیص استرس از سیگنال قطر مردمک به کمک شبکه عصبی

■ محمد طاهری/کارشناس ارشد مهندسی برق/ گرایش الکترونیک/ mhdth@chmail.ir

■ هادی سمیعی/ کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات/ پژوهشکده فارابی/ hsam2016@chmail.ir

چکیده

در این کار، هدف تشخیص رخداد استرس در افراد با استفاده از رصد تغییرات سیگنال اندازه قطر مردمک است، که با طراحی یک آزمایش پرسش و پاسخ روی گروهی از افراد انجام شده است. اثرگذاری عملکرد سیستم عصبی خودکار بر روی رفتارهای غیرارادی نظیر قطر مردمک، نرخ ضربان قلب، نرخ تنفس، فشار خون و غیره باعث شده تا محققان قادر به شناسایی برخی رخدادها نظیر استرس در سیستم عصبی افراد از طریق رصد اینچنین رفتارها در طول زمان باشند. استخراج سیگنال قطر مردمک نسبت به دیگر سیگنال‌های فیزیولوژیک ارزان‌تر است که می‌تواند به صورت غیرتهاجمی کسب شده و به راحتی در کنار دیگر اندازه‌گیری‌های فیزیولوژیکی استفاده شود. به علاوه استخراج سیگنال قطر مردمک را می‌توان روی گستره وسیعی از افراد انجام داد. به منظور دسته‌بندی سیگنال‌ها ما از شبکه باور عمیق استفاده می‌کنیم. شبکه عصبی باور عمیق تشکیل شده از لایه‌های ماشین بولتزمن محدود شده توانایی خوبی در استخراج ویژگی سیگنال و دسته‌بندی آن دارد. نتایج حاصله و مقایسه آن با دیگر کارهای مشابه نشان می‌دهد که سیگنال قطر مردمک توانایی بالایی در نشان دادن حالات روانی افراد از نظر قرارگیری در شرایط آرامش و استرس دارد.

کلمات کلیدی: تشخیص استرس، قطر مردمک، شبکه عصبی، شبکه عصبی باور عمیق

Stress Detection from Pupil Diameter Signal Using Neural Network

■ Mohammad Taheri/ Master of Electrical Engineering, Electronics/ mhdth@chmail.ir

■ Hadi Samiee/ master of electrical Engineering, telecommunications, Researcher at Farabi Institute/ hsam2016@chmail.ir

Abstract

In this work, the goal is to diagnose the occurrence of stress in individuals by observing the changes of pupil diameter signal that done by conducting a question and answer experiment on a group of people. The effect of autonomic nervous system function on involuntary behaviors, such as pupil diameter, heart rate, respiration rate, blood pressure, etc. has made it possible for researchers to identify certain events, such as stress in the nervous system of individuals, by observing these behaviors throughout time. Extraction of the pupil diameter signal is cheaper than other physiological signals, which can be acquired noninvasively and can easily combined with other physiological measurements. In addition, extraction of the pupil diameter signal can be done on a wide range of people. In order to classify the signals, we use the deep-belief neural network. the deep-belief neural network consists of restricted Boltzmann machine's layers has a good ability to extract signal characteristics and then classify them. The results and comparison them with other similar works indicate that the pupil diameter signal has a high ability to show the mental states of people in terms of relaxation and stress.

Keywords: stress detection, pupil diameter, neural network, deep-belief neural network.

است. اما امروزه به لطف پیشرفت در تصویربرداری دیجیتال و همچنین توسعه تکنیک‌های کارآمد پردازش تصویر در حوزه علوم بینایی ماشین، این امر ممکن و تسهیل شده است.

در این کار تلاش شده است تا استرس از طریق ثبت و پردازش سیگنال قطر مردمک تشخیص داده شود. مردمک‌سنجی یک ابزار مناسب برای مطالعه فرآیندهای شناختی و احساسی است [۸] که بر خلاف دیگر سیگنال‌های فیزیولوژیکی می‌تواند توسط سیستم ردیاب چشم به صورت مخفیانه و بدون نیاز به تماس مستقیم فیزیکی و به صورت غیر تهاجمی ثبت شود. همچنین در مقایسه با دیگر اندازه‌گیری‌های فیزیولوژیکی ارزان‌تر است و به راحتی می‌تواند با سیگنال‌هایی نظیر مغزنگاری الکتریکی^۷، مغزنگاری مغناطیسی^۸ و تصویربرداری تشدید مغناطیسی کارکردی^۹، جفت شود. مردمک‌سنجی برای گستره وسیعی از جمعیت می‌تواند به کار گرفته شود.

۲- مردمک‌سنجی

اندازه مردمک توسط دو مجموعه ماهیچه صاف در عنبیه کنترل می‌شود. ماهیچه‌های تنگ‌کننده یا منقبض‌کننده قطر آن را کاهش داده و ماهیچه‌های متسع‌کننده قطر آن را افزایش می‌دهند. نقش اولیه این تغییرات در قطر، تنظیم و تعدیل میزان نور رسیده به شبکیه برای داشتن یک دید بهینه است. این حالت از عملکرد مردمک با عنوان پاسخ نوری مردمک شناخته می‌شود و استفاده کلینیکی آن با این عنوان که تغییر در سایز مردمک می‌تواند مشکلات عصبی یا مسمومیت دارویی را نشان دهد، می‌باشد [۹].

برای بیش از ۵۰ سال است که محققان به این حقیقت که تغییر در قطر مردمک می‌تواند عملکرد شناختی و ادراکی را مشخص کند، علاقه‌مند شده‌اند. به‌طور کلی، هنگامی که افراد در شرایط افزایش توجه یا بارشناختی، یا انگیزتی عاطفی یا شناختی قرار می‌گیرند، مردمکشان گشاد می‌شود. مردمک‌سنجی مطالعه چنین تغییراتی در قطر مردمک بعنوان تابعی از فعالیت‌های شناختی است [۱۰].

قطر مردمک از ۱/۵ تا ۹ میلی‌متر متغیر بوده و در مدت ۲۰۰ میلی‌ثانیه به برانگیختگی واکنش نشان می‌دهد. در شرایط نوری استاندارد قطر مردمک ۳ میلی‌متر است. ماهیچه متسع‌کننده تحت تاثیر بخش سمپاتیک سیستم عصبی خودکار و ماهیچه منقبض‌کننده تحت تاثیر بخش پاراسمپاتیک سیستم عصبی خودکار قرار دارد. اگر بخش سمپاتیک سیستم عصبی خودکار در نتیجه تلاش ذهنی و استرس روانی فعال شود قطر مردمک افزایش پیدا می‌کند و سپس بعد از آن با فعال شدن بخش پاراسمپاتیک به‌طور طبیعی مردمک منقبض شده و به سایز قبلی خود برمی‌گردد [۱۱، ۱۲].

در تحقیقات مختلف قطر مردمک به‌عنوان شاخصی از عملکرد سیستم عصبی خودکار در نظر گرفته شده است و محققان سعی بر آن داشته‌اند تا با استفاده از این سیگنال استرس روانی در فرد را مشخص کنند.

۳- پیشینه تحقیق

در [۱۳]، Pedrotti و همکارانش، شرکت‌کنندگان را در حین یک تست رانندگی، تحت ۴ مورد مختلف فشار روانی ناشی از صدا و تصویر قرار داده‌اند. آنها بیان کرده‌اند که شرایط ایجاد شده باعث بروز استرس در افراد می‌شود و سعی بر آن داشته‌اند تا با استفاده از ثبت و پردازش سیگنال قطر مردمک و به کمک طراحی یک شبکه عصبی باینری، استرس ناشی از ۴ نوع محرک مختلف را از هم جدا کنند و بیان کرده‌اند که در واقع سعی در جداسازی سطوح مختلف استرس

امروزه افراد به علل مختلف در شرایط استرس قرار می‌گیرند که این شرایط می‌تواند سلامت فرد و جامعه را با خطر مواجه کند. استرس اثری مخرب روی جنبه‌های خوب زندگی فردی دارد به طوری که اثبات شده است نه تنها استرس بلند مدت بلکه استرس کوتاه مدت نیز می‌تواند ارتباط بین سلول‌های مغزی را مختل کند. از این رو تشخیص زود هنگام استرس ضروری به نظر می‌رسد. همچنین به لحاظ امنیتی نیز تشخیص خودکار استرس می‌تواند موجب افزایش امنیت شود (در بانک‌ها یا فرودگاه‌ها) و یا در پرونده‌های جنایی به منظور کشف فریب، کمک کننده باشد. بنابراین یکی از دغدغه‌های محققان کشف قرارگیری افراد در شرایط استرس است. یکی از راه‌های کشف استرس، استفاده از برخی سیگنال‌های فیزیولوژیکی^۱ است که توسط سیستم عصبی خودکار کنترل شده و به نوعی منعکس‌کننده فعالیت‌های سیستم عصبی خودکار هستند [۱]. سیستم عصبی سمپاتیک^۲ و پاراسمپاتیک^۳ دو قسمت از سیستم عصبی خودکار هستند. از مطالعات روان‌فیزیولوژی^۴ مشخص شده است که وقتی احساسی در فرد ایجاد می‌شود تعادل میان قسمت سمپاتیک و پاراسمپاتیک تغییر می‌کند [۲]. فعالیت بخش سمپاتیک ممکن است موجب افزایش قطر مردمک، نرخ ضربان قلب، فشار خون، عرق کردن و تغییرات تنفس شود که موجب افزایش واکنش‌های تهاجمی و گریزی در فرد می‌شود. از طرف دیگر کارکرد بخش پاراسمپاتیک با آرامش بدن مرتبط است و فعالیت آن موجب بازگشت اندام‌ها به حالت عادی می‌شود. فعالیت بخش پاراسمپاتیک ممکن است نرخ ضربان قلب را کاهش دهد، ایجاد آرامش کند، ترشحات بزاقی را افزایش دهد و ... با اینکه بخش سمپاتیک و پاراسمپاتیک از سیستم عصبی خودکار عملکرد متضاد دارند، اما فعالیت آنها در تضاد با هم نیست و در کنار هم است [۳، ۱]. به طور کلی، استرس به‌عنوان یک عکس‌العمل، به گذار از یک حالت آرام به حالت هیجانی به منظور حفظ یکپارچگی ارگانیسم شناخته می‌شود. برای یک ارگانیسم به‌عنوان یک موجود اجتماعی بسیار توسعه یافته و مستقل از محیط بیشتر عوامل استرس‌زا، فکری، عاطفی و ادراکی هستند. طبق این تعریف می‌توان بیان کرد که ممکن است یک ارتباط نزدیک بین استرس و فرآیندهای شناختی وجود داشته باشد. به این معنی که یک افزایش در مطالبات شناختی می‌تواند فرد را در شرایط استرس قرار دهد. در مقابل، آرامش یک حالت بدون تنش است که در آن درگیری‌های داخلی و احساساتی نظیر اضطراب، خشم و ترس وجود ندارد [۴].

یکی از جنبه‌های کلیدی در سنجش استرس به ضبط پارامترهای فیزیولوژیکی که ثابت شده است توسط سیستم عصبی خودکار تنظیم می‌شوند، مربوط می‌شود. امروزه بیشتر سیگنال‌های فیزیولوژیکی نظیر الکتروکاردیوگرام^۵، فشارخون، دمای پوست، پاسخ گالوانیک پوست^۶، پالس حجم خون و اطلاعات مردمک‌سنجی که می‌توانند واکنش سیستم عصبی خودکار را نشان دهند، به‌منظور ارزیابی قرارگیری افراد در حالت استرس و آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرد. علیرغم پیشرفت فناوری در ثبت سیگنال‌های فیزیولوژیکی، استنباط مفاهیم روانشناختی از سیگنال‌های فیزیولوژیکی همچنان یک چالش مهم است، زیرا تجزیه و تحلیل سیگنال فیزیولوژیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۵]، و می‌توان گفت که نتایج این شناخت به سطح مورد انتظار نرسیده است [۷، ۶]. در این بین عدم توجه به مردمک‌سنجی بیشتر از بقیه موارد مشاهده می‌شود. دلیل اصلی این امر در گذشته عدم توسعه لوازم تصویربرداری با قابلیت تصویربرداری سریع بوده

را دارند. در این کار، آنها گزارش کرده‌اند که سیگنال قطر مردمک نسبت به سیگنال فعالیت الکترودرمی^{۱۰} شاخص مناسب‌تری برای سنجش فعالیت سیستم عصبی خودکار است.

در [۴] آقای PENG REN و همکارانش یک روش جدید برای نظارت بر وضعیت روحی افراد برای تفکیک دو حالت آرامش و استرس بر مبنای قطر مردمک ارائه کرده‌اند. همچنین آنها برای اثبات کارایی روش خود در طول آزمایش، سیگنال پاسخ گالوانیک پوست را نیز رصد کرده‌اند. در مورد استفاده از سیگنال قطر مردمک آنها به دقت کلاس‌بندی ۸۷ درصد رسیده‌اند و همین دقت را هنگام بکارگیری پاسخ گالوانیک پوست، ۶۴ درصد بیان کرده‌اند. به گفته آنها سیگنال قطر مردمک برای مشخص کردن حالات روحی افراد (آرامش و استرس) نسبت به پاسخ گالوانیک پوست موثر و قوی‌تر است.

در [۱۴] نیز Thomas M. Gabl و همکارانش مقایسه‌ای روی نرخ ضربان قلب و سائیز مردمک به‌عنوان شاخصی از بارذهنی هنگام رانندگی انجام داده‌اند. آنها بیان کرده‌اند که هر دو معیار در بررسی اولیه انتظارات آنها را برآورده کرده است اما در بررسی‌های بیشتر بیان کرده‌اند که قطر مردمک نسبت به نرخ ضربان حساسیت بیشتری به تغییرات در بارذهنی دارد.

در [۱۵] نویسندگان یک رویکرد موثر را برای تشخیص استرس توسعه داده‌اند. آنها از سه سیگنال قطر مردمک، الکتروکاردیوگرام و فوتوپلتیسموگراف^{۱۱} برای کلاس‌بندی دو حالت آرامش و استرس استفاده کرده‌اند. آنها بیان کرده‌اند که استرس تاثیر بارزی روی هر سه سیگنال مورد استفاده می‌گذارد. همچنین بیان کرده‌اند قطر مردمک در مقایسه با دو سیگنال دیگر، شاخص قدرتمندتری است.

با بررسی‌های بیشتر در تحقیقات روانشناختی، متوجه این امر می‌شویم که قطر مردمک می‌تواند به‌عنوان شاخص قابل قبولی از فعالیت عصبی افراد در نظر گرفته شود، که امکان جمع‌آوری داده آن بصورت غیر تهاجمی و ارزان نیز وجود دارد. در ادامه به بیان روند انجام کار و نتایج حاصله می‌پردازیم.

۴- روند انجام کار

استرس را می‌توان به‌عنوان واکنش سیستم عصبی به گذار از حالت آرام به حالت برانگیخته در نظر گرفت. استرس بر روی برخی رفتارهای فیزیولوژیک نظیر اندازه قطر مردمک اثرگذار است که این امکان را برای ما فراهم می‌آورد تا از رخداد استرس در افراد آگاهی پیدا کنیم. یکی از مواردی که باعث می‌شود فرد در شرایط استرس قرار بگیرد فریب است. در این کار فرد مورد آزمایش در پاسخ به پرسش‌های مطرح شده در طی آزمایش در شرایط فریب‌کاری قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود که سیستم عصبی فرد در هنگام فریب‌کاری نسبت به زمان راستگویی بیشتر تحریک شده و ما نیز بتوانیم با اتکا به این مساله فریب‌کاری را تشخیص دهیم.

شرکت‌کنندگان در این آزمایش ۱۷ نفر از دانشجویان مرد دوره‌ی کارشناسی دانشگاه بوعلی سینای همدان گروه فنی و مهندسی با میانگین سنی ۲۰ و انحراف از معیار ۱ سال بوده‌اند. نحوه انجام آزمایش بدین صورت است که ۱۶ عدد مکعب به ابعاد ۱×۱×۱ سانتی‌متر، در چهار رنگ (به تعداد مساوی) قرمز، آبی، سبز و زرد، در برابر افراد قرار گرفته است. شرکت‌کنندگان ابتدا می‌بایست یک مکعب به‌غیر از قرمز را برداشته و نزد خود نگه دارند. در مرحله بعد یک فرد که مسئول جمع‌آوری داده و کنترل ضبط تصاویر چشم است، شروع به پرسیدن سوال به‌ترتیب زیر می‌کند:

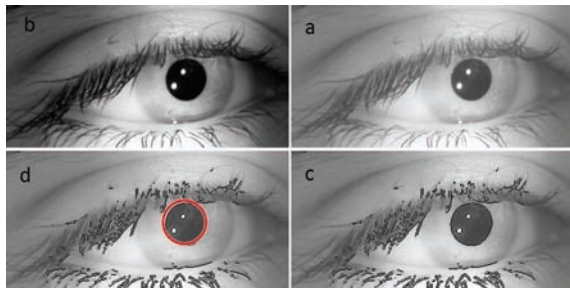
- آیا رنگ قرمز را برداشته‌اید؟

- آیا رنگ سبز را برداشته‌اید؟
- آیا رنگ زرد را برداشته‌اید؟
- آیا رنگ آبی را برداشته‌اید؟

پاسخ تمام پرسش‌های فوق از طرف شرکت‌کنندگان در آزمایش، «خیر» است با این توضیح که در سه مورد پاسخ صادقانه است و یک مورد پاسخ غیرصادقانه است. هدف از طراحی این آزمون، قرار دادن افراد در شرایط استرس به‌هنگام فریب است و انتظار از این آزمایش هم توانایی تشخیص رخداد استرس در افراد است. از آنجایی که لازم است یک میزان پایه از قطر مردمک داشته باشیم، پرسش نخست برای تمام شرکت‌کنندگان پاسخی صادق دارد.

برای ضبط تصاویر چشم از یک وبکم HD ساخت شرکت مایکروسافت با توانایی ضبط ویدئو با سرعت ۳۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است. همچنین برای تسهیل در امر استخراج تصویر مردمک از تصویر چشم، در کنار وبکم از تابش مادون قرمز نیز استفاده شده است. مدت زمان هر پرسش و پاسخ ۷ ثانیه و به‌طور تقریبی ۲۰۰ فریم است. در طول فرآیند ضبط تصاویر، پردازش و استخراج ویژگی و سپس کلاس‌بندی از نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

بعد از ضبط تصاویر نوبت به استخراج قطر مردمک می‌رسد. برای این منظور ابتدا تصاویر را فراخوانی کرده و با تکنیک‌های پردازش تصویر عملیات کاهش نویز و سپس بهبود کیفیت رنگ روی تصاویر انجام می‌شود. سپس توسط تکنیک‌های لبه‌یابی ناحیه مردمک مشخص می‌شود و قطر آن قابل محاسبه خواهد بود. در شکل (۱) تصویر دریافتی از دوربین و نتیجه اعمال تکنیک‌های پردازش تصویر و استخراج قطر مردمک نشان داده شده است.



شکل ۱: (a) تصویر دریافتی از دوربین (b) تصویر بعد از تعدیل رنگ

(c) لبه‌یابی تصویر (d) یافتن ناحیه مردمک

بعد از فراخوانی تصاویر متوالی و استخراج قطر مردمک آنچه در نهایت در اختیار داریم یک سیگنال زمانی نشان‌دهنده‌ی اندازه مردمک است. از آن جهت که ما تجهیزات سنجش فاصله دوربین تا سطح چشم را نداریم، اندازه مردمک را بر حسب پیکسل بیان می‌کنیم. در شکل (۲) اندازه مردمک بر حسب پیکسل را برای دو نفر در طول یک آزمایش نشان داده شده است.

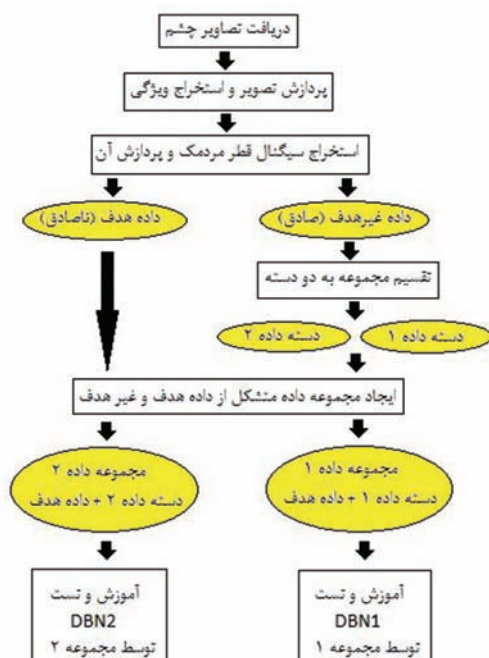
همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در زمان‌هایی، اندازه‌ی مردمک صفر است (موجود نیست)؛ این نقاط زمانی، بیانگر تصاویری‌اند که امکان استخراج قطر مردمک وجود نداشته است. این موارد هنگام پلک‌زدن، انحراف زیاد سوی نگاه و همچنین عدم کیفیت در تصویر دریافتی به‌وجود می‌آید. برای رفع این مشکل از تکنیک درون‌یابی خطی به منظور بازیابی مقادیر از دست رفته، استفاده شده است. نتیجه اعمال این تکنیک را در شکل (۳) مشاهده می‌کنیم.

بعد از رفع این مشکل، لازم است تا نویز سیگنال کاهش یابد. برای این منظور سیگنال را توسط یک تابع هموارساز فیلتر می‌کنیم و همچنین به‌منظور حذف اثر قطر پایه‌ی مردمک، از مقادیر ابتدایی سیگنال

مطلوب نبود داده‌های مربوطه کنار گذاشته شده است که در نهایت، داده ۱۶ نفر را در اختیار داریم. از هر نفر ۴ سوال پرسیده شده است. سوال نخست به منظور ایجاد آمادگی در فرد برای شروع آزمایش پرسیده شده است که از داده آن استفاده نمی‌شود و از داده‌ی مربوط به ۳ سوال بعدی استفاده می‌شود. طول هر پرسش و پاسخ ۲۰۰ فریم است که ما از قطر مردمک در ۲۰ فریم ابتدایی برای استخراج قطر پایه‌ای مردمک استفاده کرده و از ۱۸۰ نمونه بعدی تفریق می‌کنیم. در این صورت، در نهایت ۴۸ سیگنال (۳ پرسش از هر فرد) با طول ۶ ثانیه (۱۸۰ فریم) در اختیار داریم. ۱۶ سیگنال مربوط به پاسخ ناصداق و ۳۲ سیگنال مربوط به پاسخ صادقه. سیگنال مربوط به پاسخ ناصداق سیگنال هدف و مابقی، سیگنال غیرهدف شناخته می‌شوند.

بعد از پردازش داده‌های خام و آماده شدن نمونه‌ها نوبت به دسته‌بندی سیگنال‌ها می‌رسد. از آنجایی که تعداد سیگنال‌های غیرهدف ۲ برابر سیگنال‌های هدف می‌باشد، در بحث دسته‌بندی ما با مشکلی به نام عدم تعادل در تعداد داده‌های هدف و غیرهدف برمی‌خوریم که خود از عوامل ایجاد انحراف/گرایش پاسخ الگوریتم کلاس‌بندی به یک سو می‌شود.

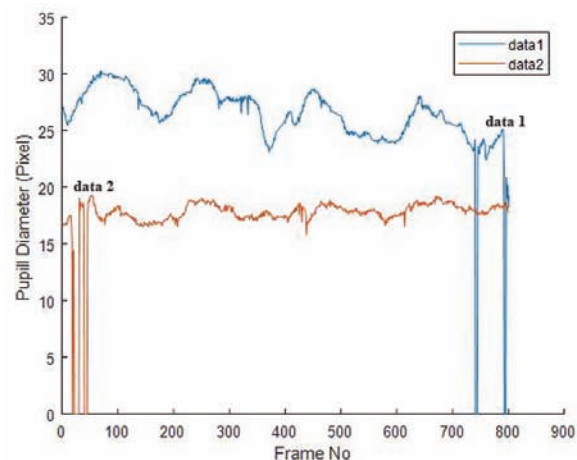
از راهکارهای رفع عدم تعادل، کلاس‌بندی مجموعه با داده‌های فراوان، به گونه‌ای که تعداد نمونه‌ها در هر دسته با تعداد نمونه‌ها در مجموعه کم جمعیت در تعادل باشد، است. از این رو، داده‌های غیرهدف را به دو دسته تقسیم می‌کنیم. بعد از تقسیم داده‌های غیرهدف به دو دسته، دو مجموعه‌ی داده‌ی غیرهدف و یک مجموعه‌ی داده‌ی هدف داریم. توسط این دسته‌بندی اولیه می‌توانیم دو مجموعه داده مجزا هر کدام متشکل از داده هدف و یک گروه از داده غیرهدف ایجاد کنیم. بعد از طی مراحل فوق نوبت به دسته‌بندی داده‌ها به دو دسته هدف و غیر هدف می‌رسد.



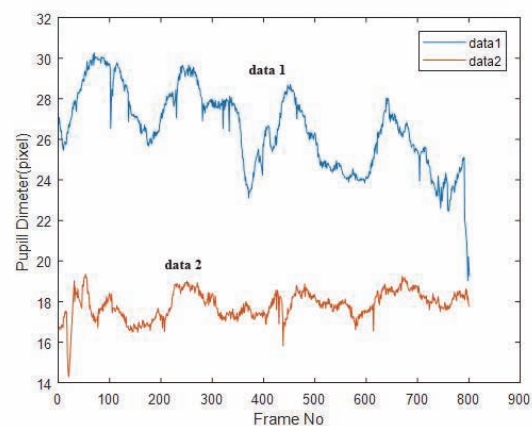
شکل ۵: بلوک دیاگرام روند انجام کار

شبکه باور عمیق تشکیل شده از لایه‌های ماشین بولتزمن محدود، توانایی خوبی در یادگیری ویژگی‌های سیگنال و در نهایت دسته‌بندی

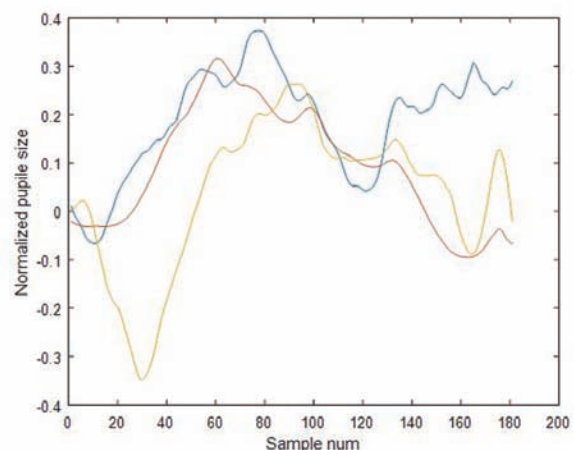
میانگین گرفته و از تمام مقادیر در طول زمان تفریق می‌کنیم. بعد از این مراحل و همچنین نرمالیزاسیون، سیگنال‌هایی به طول ۱۸۰ نمونه (طول یک پرسش و پاسخ)، در اختیار داریم که بصورت شکل (۴) قابل نمایش است.



شکل ۲: اندازه مردمک متعلق به دو شرکت کننده مختلف



شکل ۳: سیگنال قطر مردمک بعد از بازیابی مقادیر از دست رفته توسط اعمال درون‌یابی خطی



شکل ۴: سیگنال مستخرج از چشم در طول سه پرسش و پاسخ مختلف همان‌طور که بیان شد ۱۷ نفر در این آزمایش شرکت کرده‌اند. از آنجایی که کیفیت تصویربرداری در طول پرسش و پاسخ از یک نفر

سیگنال‌ها دارد. به‌منظور دسته‌بندی سیگنال‌ها ما از یک شبکه باور عمیق که کار آن دسته‌بندی است استفاده می‌کنیم. شبکه مذکور از یک لایه ورودی، سه لایه مخفی و یک لایه خروجی تشکیل شده است. لایه ورودی ۱۸۰ سلول (طول سیگنال) و لایه خروجی، ۲ سلول دارد که فعال شدن هریک اعلام تصمیم شبکه در رابطه با تعلق سیگنال به یک گروه خاص است. تعداد سلول‌ها در لایه‌های مخفی به روش آزمون و خطا و بر مبنای بهترین کارایی انتخاب شده‌اند. ۷۰ درصد از داده‌هایی را که در اختیار داریم برای آموزش شبکه و ۳۰ درصد را برای تست شبکه استفاده می‌کنیم. بلوک دیاگرام کلی کار انجام شده در شکل (۵) آورده شده است.

بعد از اینکه مجموعه داده‌ی ۱ و ۲ ایجاد شد، دو شبکه DBN1 و DBN2 توسط این دو مجموعه به‌صورت جداگانه آموزش می‌بینند. DBN1 در لایه‌های مخفی خود به ترتیب ۴۳۰، ۱۰ و ۱۹۰ سلول و DBN2 به ترتیب ۲۴۰، ۱۰ و ۲۱۰ سلول دارد. بعد از ایجاد و آموزش شبکه‌ها، به‌منظور آزمون کارایی آنها، دو شبکه به‌صورت جداگانه توسط داده‌ی تست هر دو مجموعه داده ۱ و ۲ مورد تست قرار می‌گیرند. جدول (۱) و جدول (۲) نتیجه خروجی دو شبکه را برای مجموعه داده‌ها نشان می‌دهد.

الف) آموزش شبکه توسط مجموعه اول و ایجاد DBN₁

جدول ۱: عملکرد شبکه در دسته‌بندی مجموعه داده ۱ و ۲

شبکه باور عمیق ۱	شماره آزمایش	عملکرد شبکه در تست با داده‌های مجموعه ۱ (درصد)	عملکرد شبکه در تست با داده‌های مجموعه ۲ (درصد)
	۱	۱۰۰	۷۰
	۲	۹۰	۸۰
	۳	۹۰	۷۰
	۴	۸۰	۹۰
	۵	۸۰	۸۰
	میانگین	۸۸	۷۸

ب) آموزش شبکه توسط مجموعه دوم و ایجاد DBN₂

جدول ۲: عملکرد شبکه در دسته‌بندی مجموعه داده ۲

شبکه باور عمیق ۲	شماره آزمایش	عملکرد شبکه در تست با داده‌های مجموعه ۲ (درصد)	عملکرد شبکه در تست با داده‌های مجموعه ۱ (درصد)
	۱	۹۰	۵۰
	۲	۹۰	۴۰
	۳	۸۰	۶۰
	میانگین	۸۶/۶	۵۰

شبکه آموزش دیده شده توسط مجموعه داده‌ی ۱ عملکرد خوب و قابل قبولی را برای مجموعه داده ۱ و با ۱۰ درصد افت برای مجموعه داده ۲ ارائه می‌دهد. DBN2 که توسط مجموعه داده ۲ آموزش دیده عملکرد قابل قبولی را برای دسته‌بندی مجموعه داده ۲ ارائه می‌دهد اما این عملکرد برای دسته‌بندی مجموعه داده ۱ با افتی ۳۷ درصدی مواجه است. آنچه مهم است، عملکرد دسته‌بندی شبکه در مواجه با داده‌هایی است که با آنها آموزش دیده است که در نتایج ثبت شده بالا عملکرد هر دو شبکه تقریباً یکسان است.

۵- نتیجه‌گیری

در این کار سعی بر آن بود تا با اتکا به داده‌های مستخرج از سیستم

بنیادی افراد و به‌صورت اختصاصی قطر مردمک توسط یک شبکه عصبی از نوع باور عمیق، استرس در افراد تشخیص داده شود. در مبحث مردمک‌سنجی یک عامل مزاحم، پاسخ نوری مردمک است. اندازه‌ی تغییرات قطر مردمک در پاسخ به تغییر نور بیشتر از تغییرات در واکنش به استرس است. از این‌رو لازم است نور محل انجام آزمایش کنترل شده باشد. شرط دیگر مربوط به محیط آزمایش کنترل صداهای رسیده به افراد، حین آزمایش است چرا که وجود صداهای تحریکی در محیط منجر به پاسخ ذهنی و بالطبع، بروز تغییرات ناخواسته در قطر مردمک می‌شود.

در مورد تجهیزات مورد استفاده آنچه مسلم است به‌کارگیری وسایل دقیق است. عدم تثبیت مناسب وسیله تصویربرداری نسبت به سر و چشم، زاویه نامناسب دوربین با چشم، عدم راحتی استفاده از وسیله و تجهیزات تصویربرداری و بخصوص عدم امکان سنجش فاصله‌ی بین سطح چشم و دوربین، موجب کم شدن دقت در حین جمع‌آوری داده می‌شود.

بعد از تصویربرداری و استخراج سیگنال تغییرات قطر مردمک و به‌کارگیری آن به‌عنوان ورودی شبکه باور عمیق نتایج حاصل از عملکرد شبکه در دسته‌بندی داده‌ها در جدول (۱) و جدول (۲) ثبت شده است. آنچه از جدول (۱) نتیجه می‌شود این است که عملکرد شبکه خوب بوده است و در مقایسه با دیگر کارها از نوشته‌های مختلف قابل قبول است. همچنین بنا بر نتایج ثبت شده در جدول (۱) مشخص می‌شود شبکه‌ای که با این مجموعه داده آموزش دیده است در مواجه با مجموعه داده ۲ نیز عملکرد به نسبت خوبی را از خود ارائه می‌دهد. در جدول (۲) عملکرد شبکه آموزش دیده شده توسط مجموعه داده ۲ ثبت شده است. مشاهده می‌کنیم که میانگین عملکرد این شبکه در تست با مجموعه داده ۲ در مقایسه با میانگین عملکرد شبکه اول در تست با مجموعه داده ۱ تقریباً ۱/۴ درصد افت داشته است. میانگین عملکرد این شبکه در دسته‌بندی داده‌های متعلق به مجموعه ۱ افت قابل توجهی را نشان می‌دهد.

۶- پیشنهادها

آنچه می‌توان به‌عنوان پیشنهاد ابتدایی و اصولی بیان کرد این است که دقت در جمع‌آوری داده و همچنین آشنایی کامل با نوع رفتار مردمک در حین انجام تست می‌تواند این امر را ممکن سازد که نخست اینکه داده‌های دقیقی را کسب کنیم، دوم آگاه باشیم که در طول زمان به دنبال چه می‌گردیم و آنچه دنبال آنیم چگونه بدست می‌آید.

در مورد انجام تست‌هایی از این قبیل، برای افزایش درصد موفقیت، لازم است تا سامانه‌ای یکپارچه طراحی شود به طوری که توانایی دریافت تصاویر و استخراج سیگنال موردنظر با فرکانس بالا را به‌صورت بلادرنگ داشته باشد و در اختیار کاربر قرار دهد.

همچنین لازم است یک مطالعه کامل روی رفتار قطر مردمک انجام گیرد و مشخص شود که مردمک قبل، حین و بعد از تحریک چه رفتاری از خود نشان می‌دهد و همچنین تفاوت این رفتار با رفتار مردمک در پاسخ به دیگر تحریک‌های محیطی نظیر نور و صدا، مشخص شود.

در صورتی که ما درک درستی از رفتار مردمک داشته باشیم به راحتی این امکان برای ما فراهم می‌شود که با طراحی یک سیستم فازی و تعریف رویه‌های مشخص، به‌صورت بلادرنگ رخداد تحریک و عامل ایجاد آن را مشخص نماییم. برخلاف شبکه‌های عصبی، شبکه‌های فازی نیازی به تهیه داده‌های آموزشی و آموزش شبکه ندارند. این امر

پی‌نوشت‌ها

- 1 physiological
- 2 sympathetic
- 3 parasympathetic
- 4 Psychophysiology
- 5 Electrocardiogram
- 6 Galvanic skin response
- 7 Electroencephalography
- 8 Magnetoencephalography
- 9 Functional Magnetic Resonance Imaging
- 10 Electrodermal activity
- 11 Photo Plethysmography

مراجع

- [1] J.-M. Fellous and M. A. Arbib, Who needs emotions: The Brain Meets The Robot :Oxford University Press.2005 ,
- [2] R. W. Levenson, "Emotion and the autonomic nervous system :A prospectus for research on autonomic specificity ", Social Psychophysiology :Theory and Clinical Applications.1988 ,
- [3] D. E. Frederick, "Pulmonary issues in the older adult," Critical Care Nursing Clinics, vol. 26, pp. 91-97, 2014.
- [4] P. Ren, A. Barreto, J. Huang, Y. Gao, F. R. Ortega, and M. Adjouadi, "Off-line and on-line stress detection through processing of the pupil diameter signal," Annals Of Biomedical Engineering, vol. 42, pp. 162-176, 2014.
- [5] J. T. Cacioppo and L. G. Tassinary, "Inferring psychological significance from physiological signals," American Psychologist, vol. 45, p. 16, 1990.
- [6] B. Mauss and M. D. Robinson, "Measures of emotion :A review ", Cognition and Emotion, vol. 23, pp. 209-237, 2009..
- [7] E. L. van den Broek, J. H. Janssen, and J. H. Westerink, "Guidelines for affective signal processing) ASP : (from lab to life ", in 3 2009rd International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops.6-1 .pp, 9002,
- [8] E. E. Granholm and S. R. Steinhauer, "Pupillometric measures of cognitive and emotional processes ", International Journal of Psychophysiology.2004 ,
- [9] S. Mathôt, "Pupillometry :Psychology ,physiology ,and function ", Journal of Cognition, vol. 1, 2018.
- [10] S. Sirois and J. Brisson, "Pupillometry ", Wiley Interdisciplinary Reviews :Cognitive Science, vol. 5, pp. 679-692, 2014.
- [11] J. L. Andreassi, Psychophysiology :Human behavior and physiological response :Psychology Press.2010 ,
- [12] S. R. Steinhauer, G. J. Siegle, R. Condray, and M. Pless, "Sympathetic and parasympathetic innervation of pupillary dilation during sustained processing ", International Journal of Psychophysiology, vol. 52, pp. 77-86, 2004.
- [13] M. Pedrotti, M. A. Mirzaei, A. Tedesco, J.-R. Chardonnet, F. Mérienne, S. Benedetto, et al, "Automatic stress classification with pupil diameter analysis ", International Journal of Human-Computer Interaction , vol. 30, pp. 220-236, 2014
- [14] T. M. Gable, A. L. Kun, B. N. Walker, and R. J. Winton, "Comparing heart rate and pupil size as objective measures of workload in the driving context :initial look ", in Adjunct Proceedings of the 7 th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, pp. 20-25, 2015.
- [15] F. Mokhayeri, M. Akbarzadeh-T, and S. Toosizadeh, "Mental stress detection using physiological signals based on soft computing techniques," in 2011 18th Iranian Conference of Biomedical Engineering (ICBME), pp. 232-237, 2011.

طراحی، تحلیل الکتریکی و حرارتی و ساخت تقویت کننده رادیویی توان بالا با استفاده از ترانزیستورهای GaN- HEMT تکنیک دو برابر کننده f_T

روح الله فقهی
استاد راهنما: دکتر مجتبی جودکی
دانشگاه فردوسی مشهد

در این رساله تقویت کننده‌های برید باند X ، پهن باند با استفاده از تکنیک دو برابر کننده f_T طراحی، تحلیل و ساخته می‌شود. در این تقویت کننده از یک سلول دارلینگتون اصلاح شده جهت تقویت سیگنال ورودی استفاده می‌شود. سلول دارلینگتون نیاز به دو عدد ترانزیستور دارد. با بهره‌گیری از این سلول توان دو ترانزیستور با هم ترکیب شده و توان خروجی بزرگی حاصل می‌گردد. همچنین با توجه به چیدمان ترانزیستورها به صورت دارلینگتون، فرکانس بهره واحد جریان سلول نهایی از یک تک ترانزیستور بیشتر است. این رو عملکرد فرکانسی تقویت کننده نهایی بهبود پیدا می‌کند. به طور کلی مزیت یک تقویت کننده با ساختار دو برابر کننده f_T عبارت است از ترکیب توان چند ترانزیستور با هدف بهبود پاسخ فرکانسی آن می‌باشد.

در این رساله، جهت تحقق سلول دو برابر کننده f_T ، از ترانزیستورهای مجزای GaN-HEMT استفاده می‌شود. از این تقویت کننده می‌توان در کاربردهای پهن باند و توان بالا استفاده نمود. تحقق تقویت کننده توان با استفاده از تکنیک دو برابر کننده f_T با مشکلاتی همراه است. ریشه این مشکلات از نحوه اتصال ترانزیستورها به هم ناشی می‌شود. به عبارت دیگر، در این ساختار، یک ترانزیستور با سورس زمین شده (سورس مشترک ساده) باید توسط یک ترانزیستور با سورس تبهگن^۱ راه اندازی شود. ترانزیستور با سورس تبهگن مشکلات حرارتی و پایداری را برای ساختار بوجود می‌آورد. همچنین در فرکانس‌های بالا طول مسیر اتصال بین دو ترانزیستور باعث ایجاد اختلاف فاز در سیگنال خروجی ترانزیستورها می‌شود. در این رساله، مشکلات حرارتی، ناپایداری و عدم تقارن (اختلاف فاز) سیگنال‌های خروجی تحلیل و بررسی شده و راهکارهایی جهت برطرف نمودن آنها ارائه می‌گردد.

جهت بررسی مشکل حرارتی ترانزیستورها، یک روش محاسباتی مبتنی بر زاویه هدایت گرمایی و پدیده ازدحام جریان^۲، جهت تخمین مقدار مقاومت حرارتی (R_{th}) بین کانال تا گرماگیر ترانزیستورها ارائه می‌شود. با استفاده از این روش محاسباتی، دمای کانال در حالت‌های نصب مختلف ترانزیستور تخمین زده می‌شود. جهت تحقق بهینه‌ی ساختار به صورت الکتریکی (عایق نمودن دو ترانزیستور از هم به صورت الکتریکی) و دمایی (نصب دو ترانزیستور بر روی یک گرماگیر مشترک)، یک ساختار مجتمع سازی ابتکاری با استفاده

برنامه ریزی بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع شامل ریزشبکه‌ها تحت شرایط سخت محیطی ناشی از توفان

جواد نجفی
استاد راهنما: دکتر علی پیروی
دانشگاه فردوسی مشهد

امروزه به دلیل افزایش نرخ وقوع بلایای طبیعی مانند توفان، سیل و زلزله، تاب‌آوری شبکه‌های برق دارای اهمیت بسزایی است که باید مورد توجه بهره‌برداران و برنامه‌ریزان شبکه‌های برق قرار گیرد. میزان آمادگی شبکه‌های برق در برابر حوادث با ویژگی‌های احتمال وقوع کم اما تاثیر زیاد را تاب‌آوری شبکه‌های برق گویند. هنگامی که یک بلای طبیعی مانند طوفان شبکه‌ای را تحت تاثیر خودش قرار می‌دهد، موجب می‌شود که تعداد زیادی از خطوط شبکه‌های برق از مدار خارج شوند و در ادامه دسترسی بسیاری از بارها به برق از بین رود. بازبایی شبکه‌های توزیع برق ناشی از این خطاها برخلاف خطاهای معمولی زمان‌بر است، از این‌رو وابستگی سایر زیرساخت‌ها مانند شبکه‌ی توزیع آب به شبکه‌ی توزیع برق موجب می‌شود که در ادامه دسترسی بارها به آب محدود و یا از بین رود. برخلاف پژوهش‌های سابق که تنها تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق را مطالعه کرده‌اند، در این رساله یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق و آب در برابر طوفان ارایه شده است. مدل جامع پیشنهادی به‌صورت تصادفی طراحی شده تا معایب پژوهش‌های سابق مانند نحوه‌ی مدل‌سازی خرابی خطوط و راهبرد تقویت استحکام خطوط را برطرف کند.

مدل جامع پیشنهادی شامل یک مساله اصلی و دو زیر مساله است. هدف مساله‌ی اصلی این است که خسارت مورد انتظار دسترس‌ناپذیری بارها به برق و آب و همچنین هزینه‌ی سرمایه‌گذاری راهبردهای بهبود تاب‌آوری را کمینه کند. در زیرمساله‌ی شماره یک، ریزشبکه‌ها به‌عنوان منابع انرژی اضطراری مدل شده‌اند که می‌توانند در شرایط بحرانی پس از بلایای طبیعی و با توجه به نوع مدیریت آنها، انرژی به شبکه‌ی توزیع بفروشند و یا در اختیار آن قرار دهند. در زیرمساله‌ی شماره دو نیز، پمپ‌های آب قطع‌شده‌ای که مجهز به ژنراتورهای پشتیبان هستند و نتوانسته‌اند بازبایی شوند، عملکرد ژنراتورهای مربوط به آنها با توجه به محدودیت سوخت در بازه‌ی اضطراری بهینه می‌شوند.

تنها دلیل عدم و یا محدود شدن دسترسی بارها به آب در برابر توفان، وابستگی شبکه‌ی توزیع آب به برق فرض شده است. اما در برابر زلزله، احتمال آسیب لوله‌های آب مدفون نیز دلیل دیگری برای ایجاد وقفه در عملکرد شبکه‌ی توزیع آب است. شبکه‌ی توزیع آب به منظور اطلاع از تاثیر وقفه در عملکرد پمپ‌های آب و یا آسیب خود شبکه بر روی دسترسی بارها به آب به‌صورت تخصصی و همراه با جزئیات مدل شده است. مساله‌ی مورد نظر با راهبردهای نامزد متنوعی با توجه به سطح شبکه حل شده است. به‌گونه‌ای که برای شبکه‌های توزیع در پایین‌ترین سطح، راهبردهای نامزد بهبود تاب‌آوری شامل سطح تقویت استحکام خطوط توزیع، جایابی منابع DG با سطوح متفاوت و افزایش سطح هوشمندی شبکه هستند. در مقابل در شبکه‌های توزیع پیشرفته شامل ریزشبکه‌ها، تقویت استحکام خطوط توزیع، بروزرسانی اندازه‌ی باتری در ریزشبکه‌ها و همچنین مخازن آب در شبکه‌ی توزیع آب، راهبردهای نامزد بهبود تاب‌آوری هستند.

کلمات کلیدی:

تاب‌آوری، بلایای طبیعی، ریزشبکه، شبکه‌ی توزیع برق، شبکه‌ی توزیع آب.

◀ ادامه از صفحه ۴۴

می‌دهد مدار ساخته شده از بهره توان 10dB، توان خروجی 10W و پهنای باند 3.9GHz بر خوردار است. همچنین راندمان افزوده توان این تقویت کننده 43٪ است.

کلمات کلیدی:

تقویت کننده توان هایبیرید، GaN-HEMT، ترانزیستور مجزا، راندمان افزوده توان، دارلینگتون، doubler-ft

از یک اتصال از جنس سرامیک ارایه می‌گردد. بیشینه دمای قابل تحمل کانال ترانزیستور 275°C بوده که در این ساختار تجمع‌سازی، دمای کانال تقریباً 200°C حاصل می‌گردد. برای نخستین بار، مشکل مربوط به ناپایداری حالت فرد در سلول دو برابر کننده f_T مطرح شده و با استفاده از روش مسیر حرکت قطب‌های مدار در صفحه فرکانس مختلط S بررسی می‌شود. جهت رفع ناپایداری ایجاد شده از ترکیب کننده وبلکینسون استفاده می‌گردد. اختلاف فاز خروجی ترانزیستورها نیز با کاهش طول اتصالات بین دو ترانزیستور و اضافه نمودن یک خط انتقال اضافی در درین ترانزیستور با سورس تبهگن، حل می‌گردد. تقویت‌کننده ساخته شده نهایی از پایداری کامل در بازه فرکانسی وسیع و دمای کانال مناسبی برخوردار است. نتایج اندازه‌گیری سیگنال کوچک و سیگنال بزرگ این تقویت‌کننده نشان

1 Darlington
2 Source Degeneration
3 Current crowding

◀ حسگرهای نوری زیستی با ساختارهای متمرکز کننده امواج سطحی پلاسمونی

فهیمة آرمین
استاد راهنما: دکتر میرمجتبی میرصالحی
دانشگاه فردوسی مشهد

◀ پایدارسازی سیستم‌های مرتبه کسری سویچ‌شونده با عدم قطعیت

غلامرضا بیدری
اساتید راهنما: دکتر ناصر پریز، دکتر علی کریم‌پور
دانشگاه فردوسی مشهد

این رساله به مطالعه انتشار پلاسمون‌های سطحی و عبور آن‌ها از قطعات اپتیکی پرداخته است، با این هدف که امکان افزایش بازده، حسگرهای زیستی بر پایه تشدید پلاسمون‌های سطحی مورد تحقیق قرار گیرد. قصد ما این بوده است که با اجتناب از فرض‌ها و ساده‌سازی‌های معمول در روابط، مدلی حقیقی‌تر و با قابلیت اطمینان بیشتر را برای انتشار، شکست و بازتاب پلاسمون‌های سطحی ارائه دهیم؛ مدلی که بتواند برای طراحی‌های دقیق‌تر در سیستم‌های نوری مبتنی بر پلاسمون‌های سطحی در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در ابتدا برای محاسبه ضریب شکست موثر مد روشی کارا و انعطاف پذیر را بر پایه تشدید پلاسمون‌های سطحی ارائه داده‌ایم. سپس با استفاده از اصل هویگنس-فرنل اما با بهره‌گیری از روابط برداری، میدان‌های پراش یافته در پشت یک عدسی دی‌الکتریک را که بر سطح یک موجبر پلاسمونی قرار دارد محاسبه و تحلیل کرده‌ایم. استفاده از این تحلیل ما را قادر می‌سازد تا طول انتشار پلاسمون سطحی بعد از عبور از عدسی را محاسبه کنیم. همچنین ساختار جدیدی برای یک عدسی پلاسمونیک قابل تنظیم که می‌تواند در ریزنگاری و حسگری کاربرد داشته باشد، ارائه شده است.

ما نشان داده‌ایم که در عبور یک موج پلاسمون سطحی از ناپیوستگی در محیط دی‌الکتریک مدهای مرتبه بالاتر پلاسمون سطحی می‌توانند برانگیخته شوند. با این وجود حتی استفاده از این مدهای مرتبه بالاتر در کنار مد پایه پلاسمون سطحی، نمی‌تواند برای موج پلاسمون سطحی پدیده‌های شکست و بازتاب در ناپیوستگی را به‌طور کامل توضیح دهد. روابط تحلیلی که بر اساس روش بسط به امواج صفحه‌ای به‌دست می‌آیند نشان می‌دهند که طیف پیوسته‌ای از مدهای تشعشعی روی سطح و در نزدیکی ناپیوستگی وجود دارد. اگر این مدها در نظر گرفته نشوند شرایط مرزی برآورده نخواهد شد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که در یک موجبر پلاسمونیک که به‌صورت حسگر زیستی استفاده می‌شود، قرار گرفتن یک عدسی دی‌الکتریک روی ساختار فلز-دی‌الکتریک، به علت تحریک مدهای مرتبه بالاتر و تلفات انرژی آن‌ها که ناشی از محدود نبودن این مدها به فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک است، نمی‌تواند بازده حسگر را بهبود بخشد.

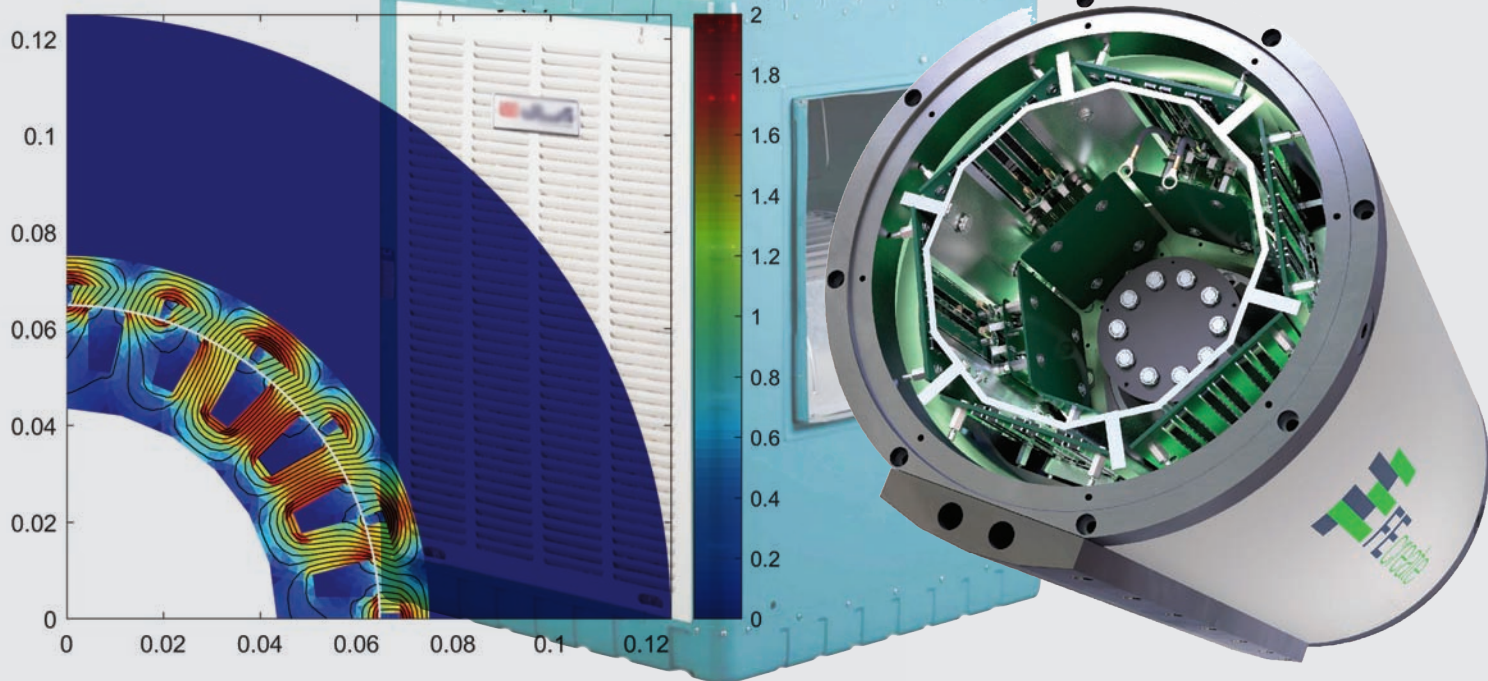
کلمات کلیدی:

امواج سطحی پلاسمونی، ضریب شکست موثر مد، مدهای مرتبه بالاتر پلاسمونیک، عدسی دی‌الکتریک، حسگر نوری زیستی

در این رساله، به مساله پایدارسازی سیستم‌های سویچ‌شونده مرتبه صحیح و مرتبه کسری خطی مستقل از زمان با عدم قطعیت نوع بازه‌ای پرداخته شده است. جهت تامین این هدف، قوانینی برای انتخاب زیرسیستم فعال پیشنهاد می‌شود که سیستم را پایدار مجانبی کند. از جمله ویژگی‌هایی که سیستم‌های با عدم قطعیت از نوع بازه‌ای دارند این است که این سیستم‌ها به جهت وجود پارامترهای متغیر، دارای بی‌نهایت مقدار ویژه به‌صورت خوشه‌ای هستند. یافتن حدود این مقادیر ویژه (که در بحث پایداری اهمیت دارد) یکی از مشکلات این نوع سیستم‌ها است. پایداری سیستم‌های مرتبه کسری مستقل از زمان همانند سیستم‌های خطی مستقل از زمان مرتبه صحیح به مکان مقادیر ویژه آن در صفحه موهومی بستگی دارد اما در حالت کلی آنالیز و تحلیل مکان مقادیر ویژه این سیستم‌ها هنوز به‌طور کامل حل نشده است. در این رساله، ابتدا به بررسی سیستم‌های مرتبه کسری و سویچ‌شونده مستقل از زمان، تعاریف مختلف مشتقات مرتبه کسری و همچنین انواع عدم قطعیت پرداخته می‌شود. سپس کارهای که بر روی این سیستم‌ها و به‌خصوص درباره پایداری انجام گرفته بررسی می‌شود. در ادامه با ارائه شروط کافی برای پایداری، به پایدارسازی سیستم‌های سویچ‌شونده مرتبه صحیح و کسری پرداخته می‌شود. روش‌های پیشنهادی پایدارسازی برای سه نوع سیستم مختلف ارائه می‌شود. روش پیشنهادی برای سیستم سویچ‌شونده مرتبه صحیح با عدم قطعیت بازه‌ای، روش مستقیم می‌باشد. روش پیشنهادی برای سیستم سویچ‌شونده مرتبه کسری $1 < \nu < 2$ ، روش مستقیم، با استفاده از ماتریس‌های ورتکس و با استفاده از معادل صحیح از $1 < \nu < 2$ ، روش مستقیم می‌باشد.

کلمات کلیدی:

سیستم سویچ‌شونده، مرتبه کسری، عدم قطعیت، پایداری، قانون سویچ.



مقاله علمی-ترویجی

طراحی و ساخت موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) با بازده بالا و نوسان گشتاور کم برای استفاده در کولر آبی

ایراندخت امیرجانی مروی/شرکت نیان الکترونیک/ irandokhtamirjani@gmail.com

فرزاد تهامی/ دانشگاه صنعتی شریف/ tahami@sharif.edu

چکیده

باتوجه به استفاده گسترده از کولرهای آبی در کشور و پایین بودن بازده موتورهای القایی مورد استفاده در کولرهای آبی مقدار زیادی انرژی توسط این کولرها تلف می‌شود. در این مقاله روند طراحی سه موتور سنکرون مغناطیس دائم ۲۵۰ W، ۳۷۰ W و ۵۵۰ W برای استفاده در کولرهای آبی با ظرفیت هوادهی ۳۰۰۰ m³/h، ۵۰۰۰ m³/h و ۷۰۰۰ m³/h بیان شده و نتایج بدست آمده به وسیله شبیه سازی و آزمایش عملی بررسی می‌شود. در طراحی این موتورها مهم ترین پارامترهای مورد نظر کاهش قیمت تمام شده، بازده زیاد، ریبیل گشتاور کم، سادگی ساخت و یکسان بودن ورق های مورد استفاده در هر سه موتور و قابلیت جایگزینی این موتورها با موتور کولرهای آبی معمولی می باشد.

کلمات کلیدی: طراحی موتور، موتور سنکرون آهنربا دائم، کولر آبی

Design and Construction of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) with High Efficiency and Low Torque Ripples for Evaporative Cooler

Irandokht Amirjani Marvi/R&D Department, Nian Electronic Co./ irandokhtamirjani@gmail.com

Farzad Tahami/Electrical Engineering Department, Sharif University of Technology/ tahami@sharif.edu

Abstract

with respect to increasing usage of evaporative cooler in Iran and low efficiency of AC induction motor used in them, a large amount of energy is being lost. In this paper design procedure of three permanent magnet synchronous motors with the output power of 250W, 370W, 550W which are used in evaporative cooler with air delivery of 3000, 5000 and 7000 m³/h is presented and then simulation and experimental result is described. The most important criteria in the design procedure include: minimizing total cost, maximizing efficiency, reduction of torque ripples, simplifying the construction method, using the same lamination geometrically for three motors and having the ability to replace with AC induction motors in conventional coolers.

Keywords: Motor design, Permanent Magnet Synchronous Motor, Evaporative cooler

۱- مقدمه

موتور الکتریکی می‌باشد. چهارم مفروضات، در مراحل طراحی برخی از کمیت‌ها مورد نیاز است که از قدم قبلی و یا کمیت‌های اولیه بدست نمی‌آید. این کمیت‌ها به‌طور عموم به‌صورت یک مقدار ثابت در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند و مقدار آنها با توجه به تجربه طراح و مطالب موجود در مراجع تعیین می‌شود. باید توجه داشت که مقدار کمیت‌های مفروض برای هر طراحی متفاوت است و با توجه به کمیت‌های اولیه و کاربرد موتور مورد نیاز تعیین خواهد شد. پنجم قیود، روند طراحی به کمک برخی قیود و شروط تحت کنترل قرار می‌گیرد تا بتوان از برخی پدیده‌های ناخواسته مانند اشباع مغناطیسی، اشباع حرارتی و مشکلات مکانیکی جلوگیری نمود. این قیود عموماً به‌صورت نامساوی اعمال شده و برای برخی کمیت‌های اساسی موتور مقدار بیشینه و یا کمینه تعیین می‌نماید. از کمیت‌های اساسی که قیود بر آنها اعمال می‌شود می‌توان به چگالی جریان سیم‌پیچی، کمینه پهنای دندانه، کمینه فاصله هوایی، کمینه ضخامت یوک استاتور و ... نام برد. ششم کمیت‌های خروجی، در انتها پس از پیاده‌سازی تمامی اقدامات بیان شده، کمیت‌های خروجی به‌عنوان نتیجه طراحی موتور الکتریکی استخراج می‌شوند. کمیت‌های خروجی عموماً ابعاد فیزیکی موتور الکتریکی مورد نظر (توصیف شده به کمک کمیت‌های ورودی و قیود) را شامل خواهند شد مانند طول موتور، قطر خارجی، قطر فاصله هوایی، ابعاد شیار و ...

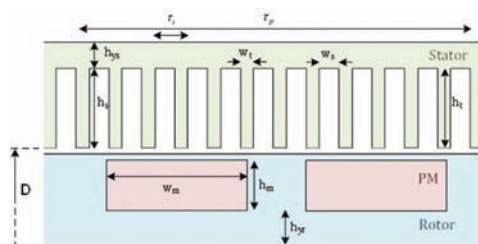
۲-۱- کمیت‌های ورودی و خروجی

ابتدا باید مقدار کمیت‌های ورودی، مفروضات مشخص شود و سپس کمیت‌های خروجی که در طراحی باید به دنبال آنها بود، معرفی شوند. کمیت‌های ورودی موتور مورد نیاز در جدول (۱) بیان شده است. کمیت‌های خروجی نیز در شکل (۱) که شامل تصویر خطی از موتور مغناطیس دائم است، نمایش داده شده‌اند.

با توجه به اینکه رتور آهنرباهای داخلی برای سرعت‌های بالا به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز مناسب هستند همچنین ساده بودن شکل آهن‌ربا در موتورهای آهن‌ربا داخلی که منجر به کاهش هزینه آن می‌شود از آهن‌ربای داخلی استفاده شده است. از طرفی آهن‌رباهای داخلی نسبت به آهن‌رباهای سطحی کمتر در معرض غیرمغناطیس شدن قرار دارند.

جدول ۱: کمیت‌های ورودی طراحی موتور PMSM مورد نیاز

کمیت مورد نظر	نماد	واحد	مقدار
توان نامی موتور	P_{out}	W	۵۵۰-۳۷۰-۲۵۰
سرعت مکانیکی محور موتور	W_{shaft}	RPM	۱۵۰۰
تعداد فاز موتور	m	-	۳
ولتاژ موثر نامی در هر فاز	V_{in}	V-RMS	۲۲۰
فرکانس تغذیه موتور	f	Hz	۷۵
تعداد جفت قطب موتور	P	-	۳



شکل ۱: کمیت‌های خروجی در ساختار موتور مغناطیس دائم

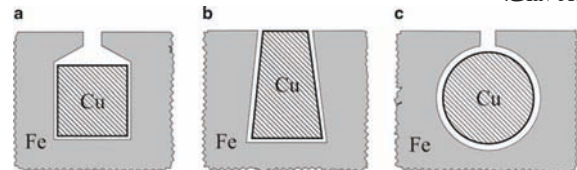
کولر آبی از پر مصرف‌ترین وسیله‌های خنک‌کننده هوا برای مکان‌های مسکونی و تجاری در ایران است. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به دلیل خصوصیتی همچون بازده، چگالی توان و گشتاور بالا، سادگی ساخت و تعمیر نگهداری آن نسبت به دیگر موتورهای جریان متناوب مورد توجه بسیاری از صنایع همچون نظامی، تولیدی و سیستم‌های اتوماسیون و ... قرار گرفته‌اند [۱-۵]. علاوه بر این موتورهای مغناطیس دائم می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که کمینه تلفات مسی و هسته را داشته باشند بنابراین بازده آنها حتی در توان‌های کمتر از یک اسب بخار و نیز در عملکرد در کمتر از بار نامی بسیار بالاست [۶، ۷]. در کولر آبی این مساله اهمیت زیادی دارد زیرا موتور همیشه در بار نامی خود کار نمی‌کند و لازم است بازده موتور در بازه عملکرد آن مناسب باشد. علاوه بر این گرمای ناشی از تلفات موتور به‌طور مستقیم به هوای خارجی کولر منتقل می‌شود و بازده حرارتی کولر را نیز کاهش می‌دهد. یکی دیگر از مزایای موتورهای آهن‌ربا دائم این است که تلفات سیم‌پیچی روتور و جریان گردابی روتور وجود ندارند و خنک کردن آنها ساده می‌باشد زیرا منشأ اصلی تلفات استاتور است که به راحتی می‌توان حرارت را به پوسته یا در موتورهای بزرگ به سیستم خنک‌کننده انتقال داد [۸]. یکی از ملاحظات که در طراحی موتورهای الکتریکی برای کولر آبی باید در نظر داشت کاهش گشتاور ضربانی است زیرا منجر به افزایش سروصدای کولر می‌شود یکی از عوامل گشتاور ضربانی در موتورهای مغناطیس دائم گشتاور دندانه است که در برخی مراجع از جمله [۹-۱۳] راه کارهای مختلفی برای کاهش آن بررسی شده است از جمله عوامل موثر در گشتاور دندانه می‌توان به تعداد شیار استاتور، تعداد قطب‌های رتور، شکل آهن‌ربا، نوع سیم‌پیچی استاتور، زاویه پیچش رتور و استاتور اشاره کرد. که در این مقاله با شیفت پله‌ای در رتور و همچنین استفاده از سیم‌پیچی توزیع شده و در نظر گرفتن تعداد شیار بر فاز بر قطب برابر با ۲ ریلپل گشتاور به کمتر از ۵ درصد کاهش یافت. در مرجع [۱۴] موتور مغناطیس دائم شامحوری با توان ۴۵۰ وات و سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای استفاده در کولر آبی طراحی شده است به شکلی که مصرف آهن‌ربا در آن بهینه شده است در این مقاله پارامترهای بسیاری از جمله محدودیت‌های دستگاه‌های تولیدی و قیمت تمام شده محصول در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۱۵] طراحی یک موتور رلکتانسی سوپرج شونده برای کاربرد کولر آبی انجام شده است که بازده این موتور کمتر از موتور سنکرون آهن‌ربا دائم است علاوه بر این ریلپل گشتاور بالا و سروصدای زیاد این موتورها مناسب کاربرد کولر آبی نیست. در این مقاله در بخش ۲ ابتدا روند طراحی سه موتور سنکرون مغناطیس دائم ۲۵۰، ۳۷۰ و ۵۵۰ وات بیان می‌شود، در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی سه بعدی موتور با نرم افزار مکسول نشان داده شده است، در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی حرارتی بیان شده و در نهایت در بخش ۵ نتایج آزمایش عملی بیان می‌شود.

۲- روند طراحی موتور

برای طراحی هر موتور الکتریکی باید ۶ عنصر اساسی را تعیین نمود. نخست کمیت‌های ورودی، این کمیت‌ها عموماً از نوع میزان ولتاژ ورودی، توان نامی مورد نیاز، سرعت نامی موتور و ... خواهد بود. دوم انتخاب ساختار و نوع مواد، شروع طراحی با انتخاب ساختار ابتدایی ماشین و نوع مواد مورد استفاده در بخش‌های مختلف ماشین می‌باشد. در مرحله سوم کمیت‌های مشخص شده وارد مراحل طراحی می‌گردد که شامل مجموعه‌ای از فرمول‌های ریاضیاتی برای طراحی

۲-۲- انتخاب ساختار و نوع مواد

سه ماده اصلی بکار رفته در ماشین‌های آهنربای دائم، آهن‌ربا، ورقه‌های فولاد الکتریکی و هادی مورد استفاده می‌باشد. نوع آهنربای دائم، NdFeB نوع هادی مس و نوع ورق مغناطیسی موتور با توجه به تلفات آن و فرکانس تغذیه موتور از محصولات سازندگان انتخاب شده است. همچنین جهت انتخاب نوع شیار استاتور نمونه‌هایی از شیارهای موجود در شکل (۲) نشان داده شده است جهت سهولت ساخت، کاهش هزینه ساخت و فراهم شدن فضای بیشتر برای سیم‌پیچی از شیار دوزنقه‌ای برای داشتن دندانه مستطیلی استفاده شده است.



شکل ۲: نمایش انواع شیار برای استاتور (a) مربعی (b) دوزنقه ای (c) دایره ای

۲-۳- مراحل طراحی و قیود

با توجه به رابطه ابعادی (۱) می‌توان ابعاد موتور را با توان نامی ظاهری (S) در ارتباط دانست [۱۶]. بر همین اساس توان ظاهری نامی موتور با سرعت نامی موتور (n_s)، طول موتور (L) و توان دوم قطر داخلی استاتور (D_i^2) متناسب است. با استفاده از این رابطه می‌توان طول استاتور و قطر داخلی آن را یافت:

$$S = 1.11 * 10^{-3} * \pi^2 (K_w K_f B_{av} a c) D_i^2 L n_s \quad (1)$$

در بخش مفروضات کمیته با نام تعداد شیار بر قطب بر فاز (q) انتخاب شده است که به کمک آن و رابطه (۲) می‌توان تعداد کل شیارهای موجود در استاتور (S_s) را یافت. مقدار q هر چه بیشتر باشد شار فاصله هوایی به سینوسی نزدیک‌تر خواهد بود و رپل گشتاور کاهش می‌یابد. اما مقدار q را نمی‌توان بیش از حد زیاد گرفت چرا که تعداد شیارها افزایش یافته و پهنای دندانه کم خواهد شد. کاهش پهنای دندانه موجب ایجاد مشکلات مکانیکی و افزایش احتمال پدیده اشباع مغناطیسی می‌گردد.

$$S_s = 2pqm \quad (2)$$

بر همین اساس گام هر شیار استاتور هم قابل محاسبه است:

$$\tau_s = \frac{\tau_p}{mq} \quad (3)$$

با استفاده از (۴) رابطه میان ولتاژ محرکه استاتور و تعداد دور سیم‌پیچی در هر فاز مشخص می‌شود و از این طریق تعداد دور سیم پیچی بدست خواهد آمد. این رابطه به کمک شار عبوری از هر قطب بدست می‌آید که در (۵) مقدار آن قابل محاسبه است.

$$E_p = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_{ph} \varphi_p K_w f \quad (4)$$

$$\varphi_p = \frac{\pi L D_i}{P} B_{av} \quad (5)$$

مقدار پهنای شیار با توجه به کمینه مقدار پهنای دندانه استاتور بدست می‌آید. کمینه پهنای دندانه یکی از شروط طراحی است که برای جلوگیری از پدیده اشباع اعمال می‌شود. دندانه استاتور محتمل‌ترین محل برای رخداد پدیده اشباع است و باید مقدار پهنای آن به نحوی انتخاب گردد که مقدار چگالی شار در سطح آن کمتر از حدود مشخص شده در جدول مفروضات باشد. حداقل پهنای دندانه

استاتور به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\omega_{t_{min}} = \tau_s \left(\frac{B_{av}}{B_{t_{max}}} \right) \quad (6)$$

اگر مقدار کمینه پهنای دندانه از گام شیار استاتور کم شود، مقدار پهنای شیار به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\omega_s = (\tau_s - \omega_{t_{min}}) = \tau_s \left(1 - \frac{B_{av}}{B_{t_{max}}} \right) \quad (7)$$

برای بدست آوردن ارتفاع شیار استاتور ابتدا نیاز به محاسبه مساحت شیار استاتور وجود دارد. مساحت شیار باید به نحوی محاسبه گردد که تعداد هادی‌های موجود در هر شیار قابلیت جایگذاری داشته باشند. بنابراین مساحت هادی‌های مورد استفاده در سیم‌پیچی استاتور و متعاقباً مساحت شیار استاتور به صورت زیر خواهد بود:

$$A_{con} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{L-L} J_s} \quad (8)$$

$$A_s = \frac{A_{con} N_{ph}}{pq K_{cu}} \quad (9)$$

پس از بدست آوردن مساحت شیار به سادگی با تقسیم آن بر پهنای شیار می‌توان ارتفاع شیار را یافت:

$$h_s = \frac{A_s}{\omega_s} \quad (10)$$

ارتفاع یوک استاتور باید به نحوی انتخاب گردد که پدیده اشباع در آن روی ندهد و بر همین اساس خواهیم داشت:

$$h_{ys} = \frac{\tau_s B_{av}}{2 B_{y_{max}}} \quad (11)$$

به این ترتیب قطر خارجی استاتور به صورت زیر خواهد بود:

$$D_o = D_i + 2h_{ys} + 2h_s \quad (12)$$

در این مرحله باید ابتدا مقدار مناسبی برای طول فاصله هوایی انتخاب نمود. هر چه مقدار طول فاصله هوایی کمتر انتخاب شود مقدار بازده، ضریب توان، حجم آهنربای مورد نیاز موتور بهبود خواهد یافت. اما به علت وجود محدودیت‌های مکانیکی ساخت و افزایش احتمال ایجاد خطای ناهم‌محوری روتور که منجر به بروز خطای مکانیکی در عملکرد موتور می‌گردد، باید کمینه مقدار قابل قبول برای طول فاصله هوایی انتخاب نمود. طول فاصله هوایی عموماً در حدود چند دهم میلی‌متر (در توان‌های کم) تا چند میلی‌متر (در توان‌های بالا) محدود می‌شود. حال می‌توان قطر خارجی روتور را به صورت زیر نوشت:

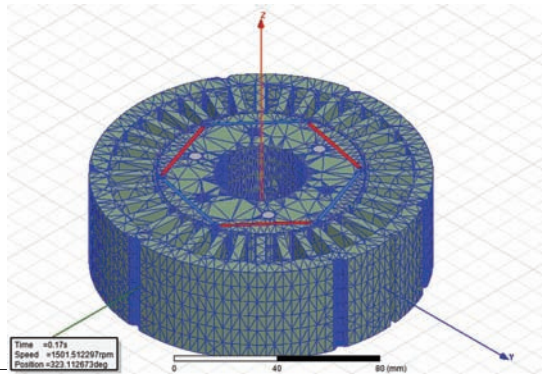
$$D_r = D_i - 2g \quad (13)$$

گام قطب روتور و طول یوک روتور مانند آنچه در استاتور توصیف شده است، بدست می‌آید:

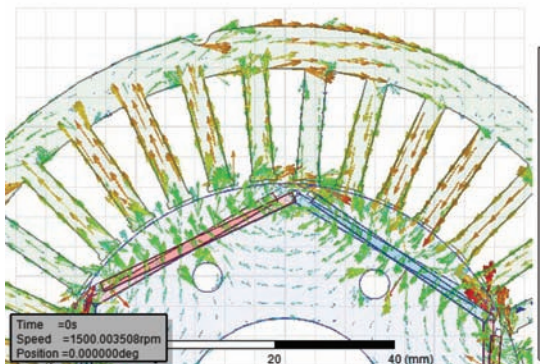
$$\tau_r = \frac{\pi D_r}{2p} \quad (14)$$

$$h_{yr} = \frac{\tau_r B_{av} \alpha}{2 B_{y_{max}}} \quad (15)$$

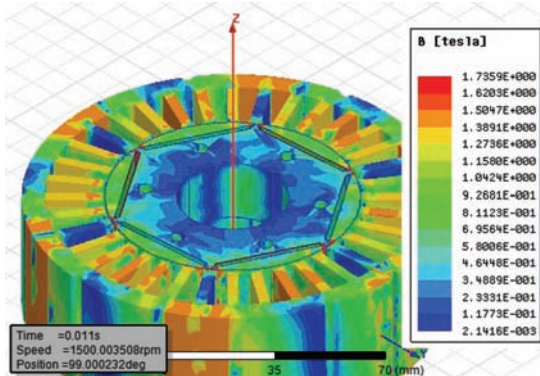
پهنای آهن‌ربا به صورت ضربی از گام قطب روتور بیان می‌شود و این



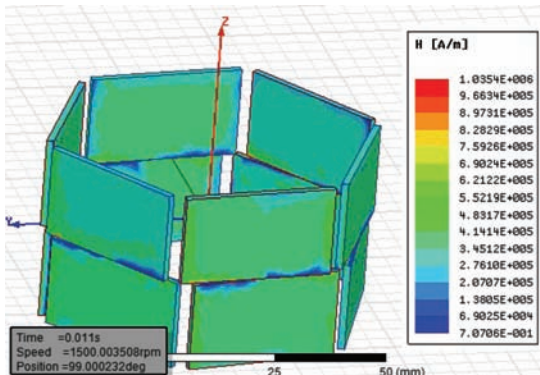
شکل ۴: مش بندی انجام شده برای تحلیل سه بعدی معادلات مکسول



شکل ۵: تحلیل مسیر و جهت خطوط چگالی شار مغناطیسی



شکل ۶: نمایش چگالی شار مغناطیسی به منظور بررسی اشباع در هر یک از ورق های رتور و استاتور



شکل ۷: بررسی شدت میدان مغناطیسی در سطح آهنربا

ضریب بستگی به شکل آهنربای مورد استفاده دارد:

$$\omega_m = \alpha \cdot \tau_r \quad (16)$$

$$\alpha = 0.98 \times \frac{3}{\pi} \quad (17)$$

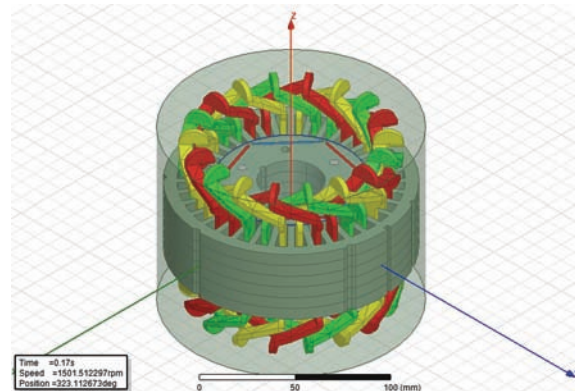
حجم آهنربای مورد نیاز در روتور متناسب با توان مورد نیاز موتور است و به مشخصات آهنربای مورد استفاده وابسته است. این تناسب با استفاده از ضریب بهره‌وری به تساوی تبدیل می‌گردد [۱۸]:

$$V_m = cv \frac{P_{in}}{B_r H_c f} \quad (18)$$

$$V_m = 2p(h_m l_m \omega_m) \quad (19)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی مغناطیسی

قدم بعدی در طراحی ماشین‌های الکتریکی شبیه‌سازی ماشین طراحی شده از معادلات تحلیلی در نرم افزارهای تحلیل اجزای محدود می‌باشد. که در این قسمت از نرم افزار مکسول و شبیه‌سازی سه بعدی 3D استفاده شده است. در ادامه قسمت‌های مختلف از ماشین نشان داده می‌شود. باید توجه داشت که شکل ورقه‌های مورد استفاده در رتور و استاتور برای هر سه موتور یکسان است و تفاوت در تعداد ورقه‌ها و طول ماشین می‌باشد. شکل (۳) نمای سه بعدی موتور شبیه‌سازی شده در مکسول را نشان می‌دهد که در آن رتور و استاتور و نحوه سیم‌پیچی موتور که توزیع شده و با گام کسری است قابل مشاهده می‌باشد.



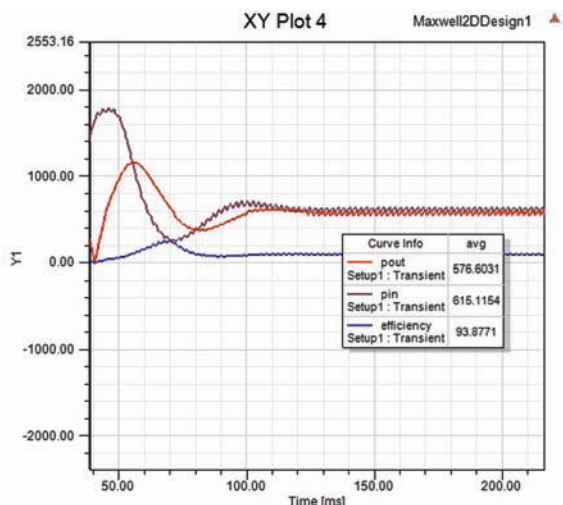
شکل ۳: نمای سه بعدی موتور شبیه‌سازی شده در مکسول

شکل (۴) مش بندی انجام شده برای حل معادلات مکسول را نشان می‌دهد در این مش بندی طول موتور به منظور درستیابی به نتایج دقیق‌تر به ۶ قسمت مساوی تقسیم شده است که در شکل قابل مشاهده است.

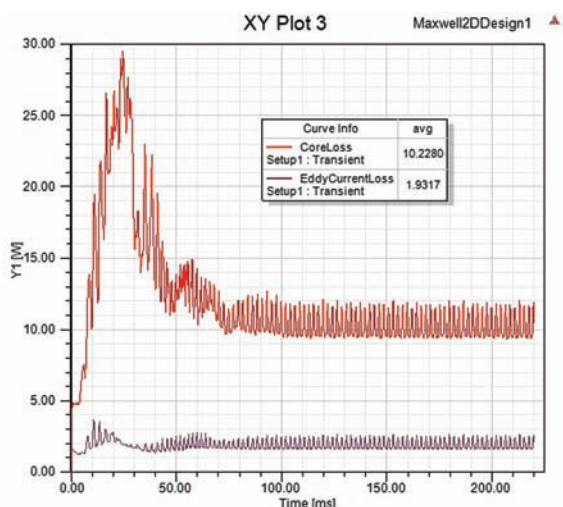
شکل (۵) مسیر و جهت خطوط چگالی شار مغناطیسی در ماشین را نمایش می‌دهد که در آن قطب‌های موتور و نیز شیفت دو قسمت رتور نسبت به هم قابل مشاهده است.

همچنین بخش مهمی از فرآیند طراحی بررسی چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در نقاط مختلف ماشین می‌باشد. دو شکل (۶) و (۷) این دو مقدار را برای موتور در شرایط نامی نشان می‌دهد.

در شکل (۱۱) توان ورودی و خروجی موتور ۵۵۰ وات در بار و سرعت نامی نمایش داده شده است که درستی ابعاد بدست آمده از طراحی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: توان ورودی و خروجی موتور ۵۵۰ وات همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت دائمی توان ورودی ۶۲۰ وات خروجی ۵۵۰ وات و بازدهی حدود ۹۳ درصد می‌باشد. همچنین تلفات هسته و هستریز برای موتور ۵۵۰ وات در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

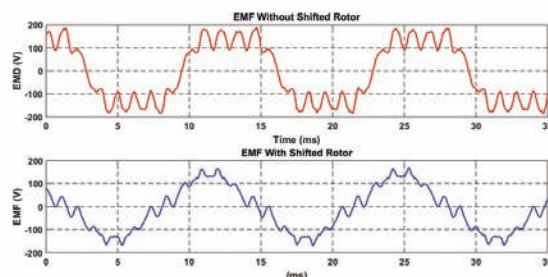


شکل ۱۲: تلفات هسته - تلفات هستریز

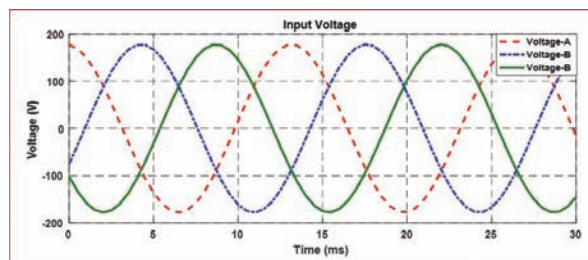
۴- شبیه‌سازی حرارتی

برای مدل کردن رفتار حرارتی موتور آهن‌ربا دائم از نرم‌افزار MOTORCAD استفاده شده است. در این نرم‌افزار، اطلاعات کلی موتور آهن‌ربا دائم که شامل ابعاد، تعداد شیار استاتور، شکل رتور و نحوه قرارگیری آهن‌رباها و ... به نرم‌افزار داده می‌شود که براساس این اطلاعات مدل حرارتی موتور محاسبه خواهد شد. در شکل (۱۳) فضای این نرم‌افزار و بخش وارد کردن اطلاعات قابل مشاهده است. پس از تکمیل اطلاعات، این نرم‌افزار مدل حرارتی موتور آهن‌ربا دائم که شامل مجموعه‌ای از مقاومت‌های حرارتی، خازن‌های حرارتی و منابع تلفات می‌باشد، ارائه می‌کند. در این مدل خازن‌های حرارتی برای مدل‌سازی گذرهای دمایی لحاظ می‌شود. با توجه به این‌که

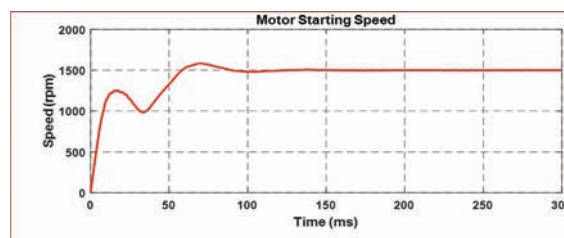
مقدار چگالی شار در نقاط مختلف ماشین باید به گونه‌ای باشد که شاهد اشباع در ماشین نباشیم. همچنین شدت میدان الکتریکی در سطح آهن‌ربا باید از نیروی محرکه مغناطیس‌زدایی آهن‌ربا کمتر باشد تا آسیبی به آن وارد نشود که با توجه به شکل (۶) چگالی شار در همه نقاط موتور کمتر از حد اشباع بوده و نیز شدت میدان مغناطیسی در سطح آهن‌ربا به گونه‌ای است که آسیبی به آهن‌ربا نمی‌رسد. از طرفی یکی از مسایل مطرح در ماشین‌های الکتریکی کیفیت ولتاژ ضدمحرکه ایجاد شده در ماشین می‌باشد. برای بهبود کیفیت ولتاژ روش‌های گوناگونی مانند استفاده از سیم‌پیچی با گام کسری، سیم‌پیچی شیار کسری، انحراف دندانه استاتور و یا رتور استفاده می‌شود. همچنین از دیگر مزایای این کارها می‌توان به کاهش ریبیل گشتاور یا توان اشاره نمود. اریب کردن (Slew) رتور یا استاتور هزینه ساخت را افزایش می‌دهد لذا در این مقاله از روش ساده تری جهت بهبود EMF استفاده می‌شود. در این روش رتور به دو قسمت مساوی تقسیم و نسبت به هم تغییر مکان داده می‌شود. شکل (۸) EMF ایجاد شده در موتورها با رتور معمولی و با رتور شیفت داده شده را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با رتور شیفت داده شده شکل موج EMF به حالت سینوسی کامل نزدیک‌تر شده است.



شکل ۸: EMF ایجاد شده در موتورها با رتور معمولی و با رتور شیفت داده شده برای تغذیه هر سه موتور از ولتاژ سه فاز متعادل با دامنه ۲۲۰ ولت و فرکانس ۷۵ هرتز استفاده شده است که در شکل (۹) نمایش داده شده است. همچنین شکل (۱۰) تغییرات سرعت ماشین را از زمان راه‌اندازی همراه با حالت گذرای ابتدایی نمایش می‌دهد.



شکل ۹: ولتاژ تغذیه ورودی موتور



شکل ۱۰: تغییرات سرعت ماشین را از زمان راه‌اندازی

نرم افزار MOTORCAD دیده نمی شوند بیشتر ناشی هارمونیک های زمانی است که در اثر ضعف سیستم تغذیه پدید می آیند.

۵- نتایج آزمایش عملی

شکل (۱۶) نمای کلی موتور ۵۵۰ وات ساخته شده و سیستم تست موتور را نشان می دهد و در جدول (۳) نتایج آزمایش موتور آورده شده است.

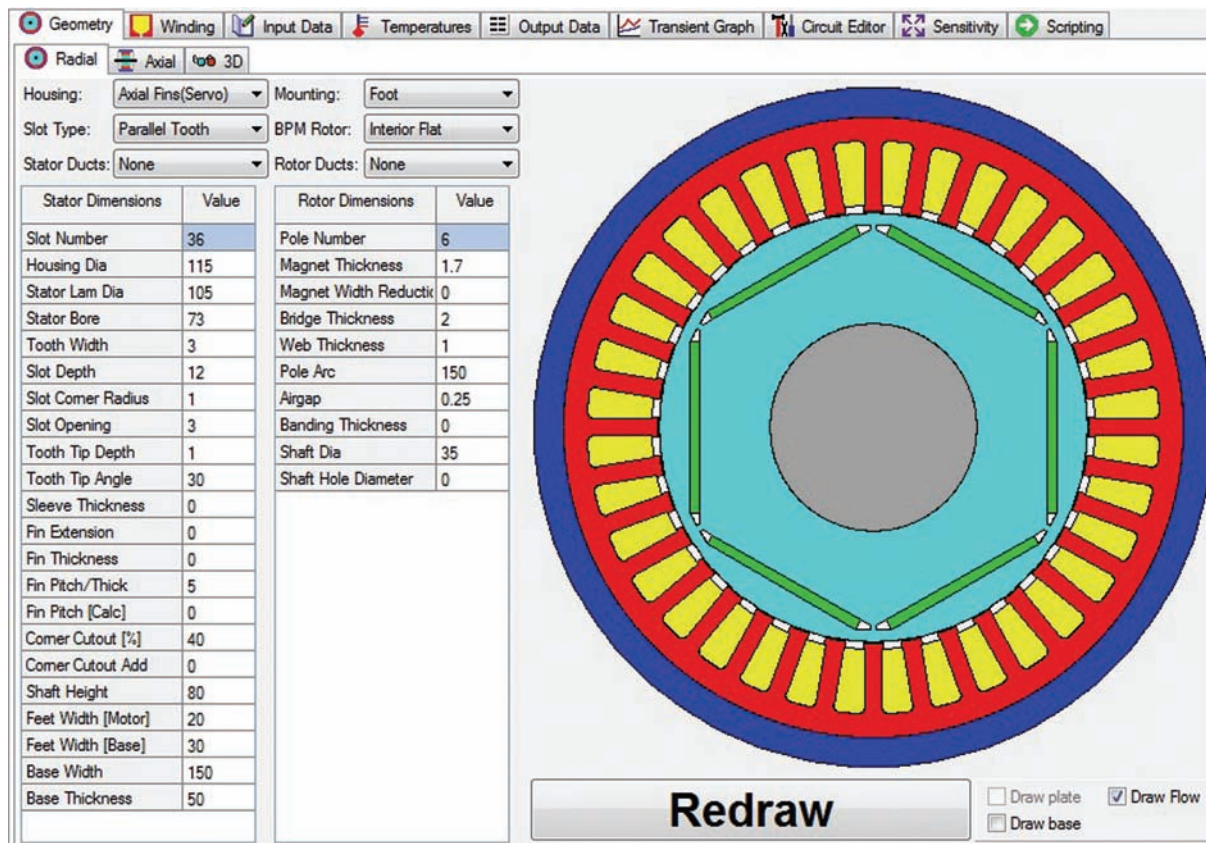
همان طور که در شکل (۱۶) مشاهده می شود قسمت (الف) سیستم تست دینامومتری مورد استفاده برای آزمایش عملی موتور است که در آن یک موتور و یک ژنراتور با هم جفت شده اند به همراه درایو مورد استفاده برای راه اندازی و کنترل سرعت موتور نشان داده شده است. در این حالت موتور توسط یک محرکه الکتریکی راه اندازی شده و با استفاده از یک ژنراتور که با موتور جفت شده است گشتاور خروجی موتور کنترل می شود. یک گشتاورسنج و سرعت سنج گشتاور و سرعت را اندازه گیری کرده و توان مکانیکی خروجی محاسبه می شود. همچنین قسمت (ب) نمای خارجی موتور ۵۵۰ وات ساخته شده را نشان می دهد و در قسمت (ج) و (د) رتور و سیم پیچی استاتور قابل مشاهده است. نتایج آورده شده به عنوان بازده در جدول (۲) بازده موتور بدون تلفات محرکه ی آن می باشد که به منظور مقایسه با موتورهای القایی آورده شده است. همچنین دمای بیان شده در این جدول دمای سیم پیچی استاتور می باشد.

به منظور آزمایش حرارتی، موتور با گشتاور نامی برای مدت طولانی کار کرده و تغییرات دمای بدنه با گذشت زمان ثبت گردید که در شکل (۱۷) قابل مشاهده است.

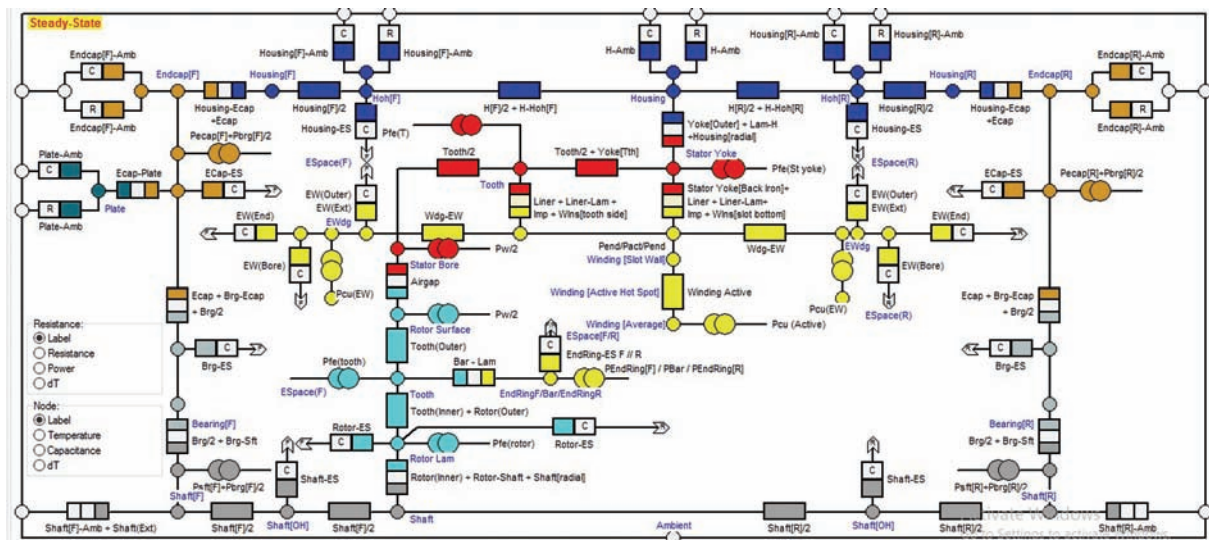
در این گزارش هدف تحلیل حالت دائمی دمای موتور آهنربا دائم می باشد، از تاثیر این خازن های حرارتی در مدل صرف نظر شده است. شکل (۱۴) مدل حرارتی ارایه شده توسط MOTORCAD را برای موتور آهنربا دائم مورد نظر نشان می دهد.

با استفاده از مدل حرارتی ارایه شده می توان توزیع دمایی را در سطح موتور یافت. در ادامه دمای نقاط مختلف ماشین تحت شرایط نامی برای موتور ۵۵۰ وات به ازای دمای محیط ۴۰ درجه در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. نرم افزار MOTORCAD برای قسمت های مختلف موتور، مقاومت های حرارتی مختلفی در نظر می گیرد. در صورتی که نیاز به آنالیز حساسیت حرارتی باشد، می توان با استخراج این مقاومت ها از محیط نرم افزار MOTORCAD و قرار دادن آن ها در یک نرم افزار تحلیل الکتریکی (مثل PSIM، ORCAD) تاثیر تغییرات بار، ولتاژ تغذیه، هارمونیک ها و عدم تعادل ولتاژ و ... را در تغییرات دمایی بخش های مختلف موتور مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که در این گزارش فرض بر متعادل بودن ولتاژ تغذیه و نیز ثابت بودن بار است، نیازی به این بررسی حساسیت ها نیست. لازم به ذکر است که در تحلیل حرارتی منابع حرارتی به صورت منبع جریان و مقاومت های حرارتی به صورت مقاومت الکتریکی مدل می شود. بنابراین با پیدا کردن اختلاف پتانسیل دو سر این مقاومت ها می توان تغییرات دمایی بخش های مختلف موتور را بدست آورد.

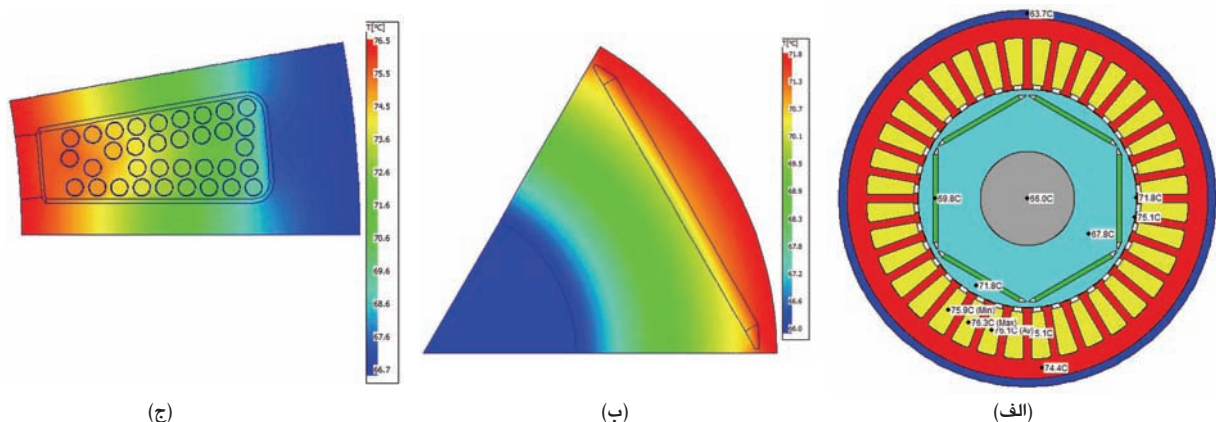
در صورتی که علاوه بر منابع حرارتی ارایه شده توسط نرم افزار منابع حرارتی دیگری هم وجود داشته باشند می توان با استفاده از یک نرم افزار تحلیل الکتریکی این منابع جدید را به صورت منبع جریان در مدل حرارتی قرار داد. لازم به ذکر است منابع حرارتی جدید که در



شکل ۱۳: فضای نرم افزار MOTORCAD



شکل ۱۴: مدل حرارتی ارایه شده توسط MOTORCAD برای موتور ۵۵۰ وات



شکل ۱۵: توزیع حرارتی (الف) در سطح موتور (ب) در یک قطب رتور (ج) در یک شیار استاتور

همچنین برای آزمایش عملکرد موتور در داخل کولر موتور با تسمه‌ای ۵۵ و پولی ۶۵ روی کولر آبی مطابق شکل (۱۸) نصب شد. پس از دو ساعت کار در دور تند دمای موتور در حدود ۳۰ تا ۳۵ درجه ثابت ماند.

۶- نتیجه‌گیری

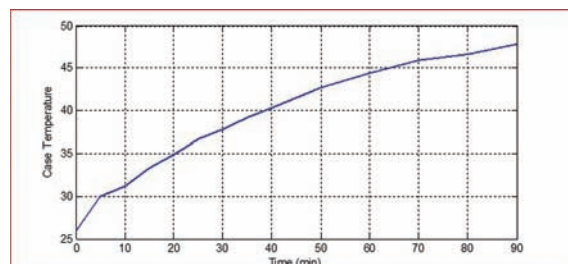
در این مقاله روند طراحی و ساخت موتور آهنربا دائم با توان ۵۵۰-۳۷۰-۲۵۰ وات با بازده بالا برای استفاده در کولر آبی بیان شد و نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی نشان داده شد. در این طراحی سادگی ساخت، بازده بالا، رپیل گشتاور کم، یکسان بودن ورقه‌های مورد استفاده در سه موتور، قیمت تمام شده محصول و قابلیت جایگزینی با کولرهای القایی متداول مهم ترین پارامترهای مورد نظر بوده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی روی موتور مطلوب بودن رفتار موتور را نشان داد.

سپاسگزاری

در پایان از زحمات مدیریت ارشد شرکت نیان الکترونیک جناب آقای محمد علی چمنیان به‌خاطر حمایت‌های مادی و معنوی ایشان در انجام این پروژه تقدیر و تشکر می‌کنم.

جدول ۲: نتایج آزمایش موتور ۵۵۰ وات

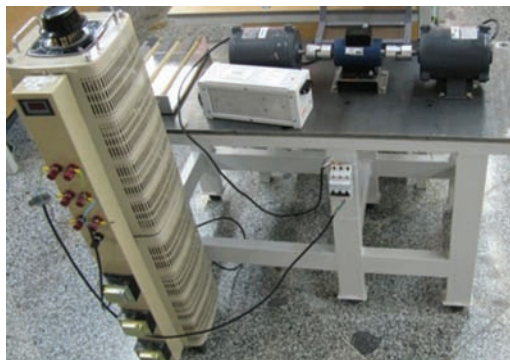
موتور: ۵۵۰ وات			دمای محیط: ۲۳°C		
زمان کار	دمای موتور	سرعت	توان ورودی	گشتاور	بازده
۰	۳۶	۱۵۱۰	۶۸۹	۴/۰۲۴	۹۲,۳
۵	۳۷	۱۵۱۱	۶۸۸	۴/۰۱۲	۹۲,۱
۱۰	۴۴	۱۵۱۲	۶۹۱	۴/۰۱۲	۹۱,۸
۱۵	۴۶/۸	۱۵۱۴	۶۸۹	۳/۹۹۶	۹۱,۹
۲۰	۵۰	۱۵۱۴	۶۹۲	۴/۰۱۲	۹۱,۸



شکل ۱۷: تغییرات دمای بدنه موتور ۲۵۰ وات در حالت عملکرد پیوسته در بار کامل



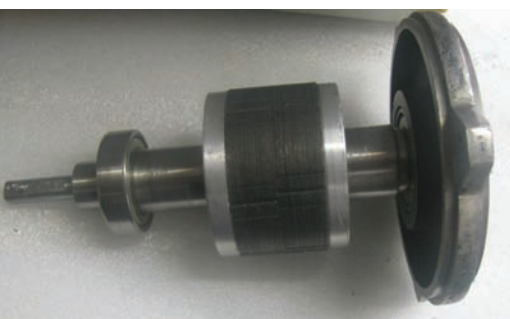
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۶: نمای کلی موتور ساخته شده (الف) دینامومتر آزمایش عملی (ب) موتور ۵۵۰ وات ساخته شده (ج) (د) استاتور موتور ۵۵۰ وات

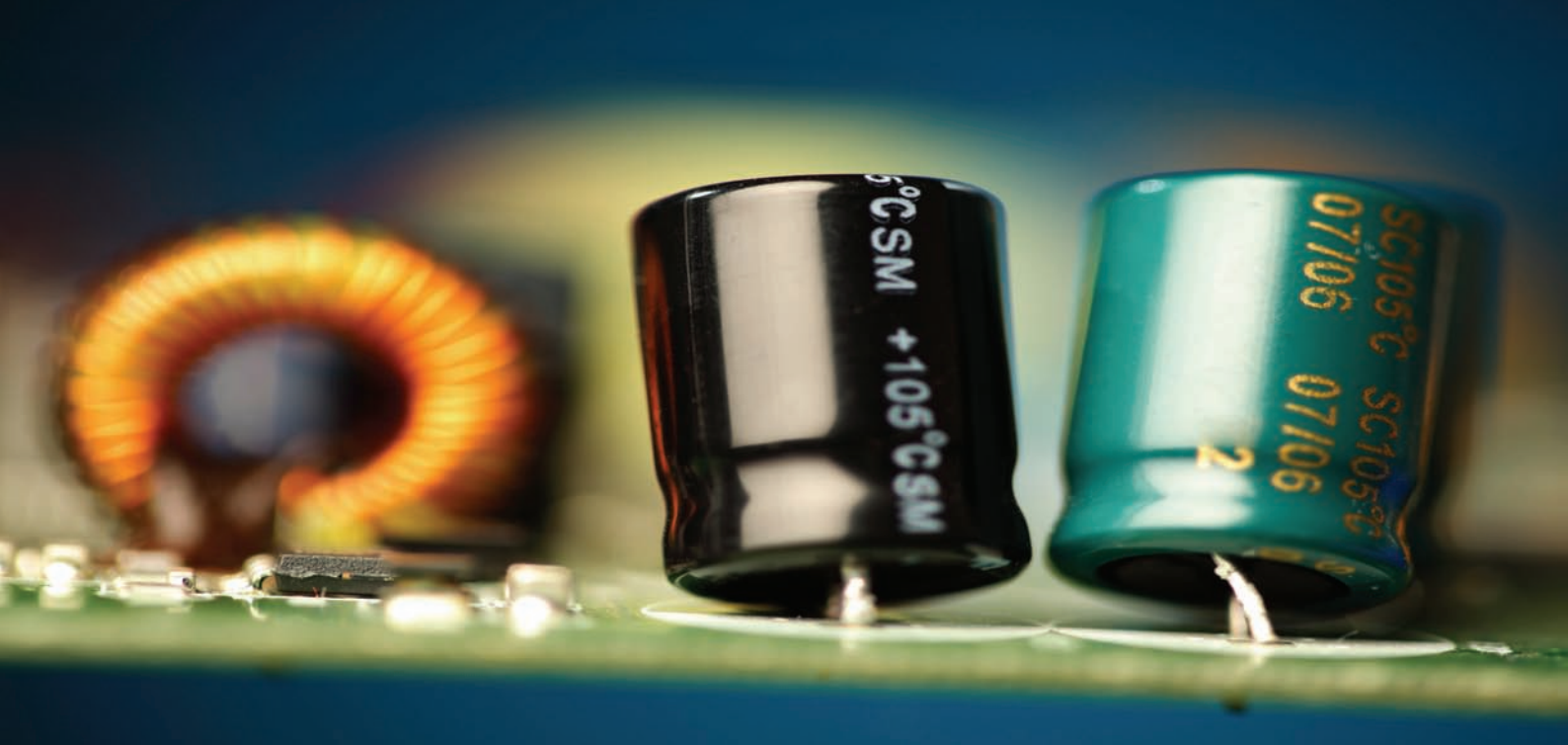
- [7] Murakami, Hiroshi, et al. "Highly efficient brushless motor design for an air-conditioner of the next generation 42 V vehicle." Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE. Vol. 1. IEEE, 2001.
- [8] J. F. Gieras "Permanent magnet motor technology: design and applications," Third edition, CRC-Press 2009.
- [9] Jahns, Thomas M., and Wen L. Soong. "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review." IEEE transactions on industrial electronics 43.2 (1996): 321-330.
- [10] Nakano, Masatsugu, Yusuke Morita, and Toshihiro Matsunaga. "Reduction of cogging torque due to production tolerances of rotor by using dummy slots placed partially in axial direction." IEEE Transactions on Industry Applications 51.6 (2015): 4372-4382.
- [11] Islam, Rakib, et al. "Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction." IEEE Transactions on industry applications 45.1 (2009): 152-160.
- [12] Xia, Changliang, Zhen Zhang, and Qiang Geng. "Analytical modeling and analysis of surface mounted permanent magnet machines with skewed slots." IEEE Transactions on Magnetics 51.5 (2015): 1-8.
- [13] Ueda, Yasuhito, et al. "Cogging-torque reduction of transverse-flux motor by skewing stator poles." IEEE Transactions on Magnetics 52.7 (2016): 1-4.
- [۱۴] میلاد نظامی وطن دوست، احمد دارابی و احمد مددی «طراحی بهینه موتور شار محوری مغناطیس دائم برای کولرهای آبی» سی امین کنفرانس بین المللی برق PSC، تهران، ۵، آبان ۱۳۹۴.
- [۱۵] مریم بهرامگیری، رضا عفت نژاد و مجتبی بابایی «طراحی و ساخت موتور سوئیچ رلوکتانس برای کاربرد در کولرهای آبی جهت افزایش راندمان و کاهش مصرف انرژی» نشریه انرژی ایران، دوره ۱۲، شماره ۳، پائیز ۱۳۸۸.
- [۱۶] حمید لسانی، طراحی جامع ماشینهای الکتریکی، انتشارات دانش و فن، ۰۳۰.
- [17] Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, and Paolo Frare. "Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors." IEEE Transactions on energy conversion 21.2 (2006): 396-404.
- [18] Mi, Chunting Chris. "Analytical design of permanent-magnet traction-drive motors." IEEE Transactions on magnetics 42.7 (2006): 1861-1866



شکل ۱۸: نصب موتور ۵۵۰ وات در داخل کولر آبی

مراجع

- [1] Demir, Y., O. Ocak, and M. Aydin. "Design, optimization and manufacturing of a spoke type interior permanent magnet synchronous motor for low voltage-high current servo applications." Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International. IEEE, 2013.
- [2] Zhu, Xiaoyong, et al. "Co-reduction of torque ripple for outer rotor flux-switching PM motor using systematic multi-level design and control schemes." IEEE Transactions on Industrial Electronics 64.2 (2017): 1102-1112.
- [3] Li, Dawei, Ronghai Qu, and Thomas A. Lipo. "High-power-factor vernier permanent-magnet machines." IEEE transactions on industry applications 50.6 (2014): 3664-3674.
- [4] Zhu, Xiaoyong, et al. "Design and multicondition comparison of two outer-rotor flux-switching permanent-magnet motors for in-wheel traction applications." IEEE Transactions on Industrial Electronics 64.8 (2017): 6137-6148.
- [5] <http://www.iribnews.ir/fa/news/2221354/>
- [6] Morimoto, S., Y. Takeda, and H. Murakami. "Motors for home applications-development of environment-friendly electric motors." Proc. of the 10th Inter. EPE-PEMC Conference, Cavtat&Dubrovnik, Croatia. Vol. 131. 2002.



مقاله علمی-ترویجی

مروری بر خازن‌های بین انگشتی و نحوه ی عملکرد آنها در سنسور مختلف با استفاده از دی‌الکتریک مایع

■ زینب ورع/ آزمایشگاه RF MEMS و بایونانو الکترونیک/ بخش مهندسی برق/ دانشگاه شهید باهنر کرمان/ کرمان، ایران / nazaninzeinab.varaa@yahoo.com
■ مهدیه مهران/ آزمایشگاه RF MEMS و بایونانو الکترونیک/ بخش مهندسی برق/ دانشگاه شهید باهنر کرمان/ کرمان، ایران / m.mehran@uk.ac.ir

چکیده

سنسورهای خازنی در مقایسه با سایر سنسورها، دارای مزایای بسیاری از قبیل قابلیت اندازه‌گیری خطی، حساسیت عالی، اصول عملکردی و ساخت آسان و... هستند. در ساختار این سنسورها اصطکاک و سایش وجود ندارد به همین دلیل دما، رطوبت و اختلالات مکانیکی بر عملکرد آنها تأثیر نمی‌گذارد. با افزایش تقاضا برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های الکترونیکی بر روی تراشه و نیاز به کوچک‌سازی سنسورها، سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. پیکربندی سنسورهای خازنی بین انگشتی از تعدادی زوج الکترود شانه‌ای بر روی یک بستر عایق، تشکیل شده است که به صورت یک در میان به پایانه زمین و ترمینال وصل می‌شوند. خطوط میدان از طریق بستر و دی‌الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودها، بسته می‌شوند. ظرفیت خازنی آنها با تغییر تعداد انگشتان، ابعاد، فواصل آنها و گذردهی بستر تغییر می‌کند. ظرفیت و حساسیت خازن‌های بین انگشتی در مقایسه با سایر خازن‌ها به نسبت بالاتر است، به علاوه دارای ساختاری ساده، ساخت آسان و هزینه کم هستند. مزایای خازن‌های بین انگشتی، آنها را به گزینه‌ای محبوب برای کاربرد در سنسورها تبدیل کرده است. همچنین از این خازن‌ها به عنوان مبدل در سنسورهای شیمیایی و بیولوژیکی و در مخابرات استفاده می‌شود. در این مقاله، به مروری بر سنسورهای ساخته شده بر اساس خازن‌های بین انگشتی بر اساس دی‌الکتریک مایع پرداخته‌ایم.

کلمات کلیدی: سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، سنسورهای خازنی، خازن بین انگشتی، دی‌الکتریک مایع.

A Review on the Interdigital Capacitors and Their Application in Different Sensors Based on the Liquid Dielectric

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

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

Abstract

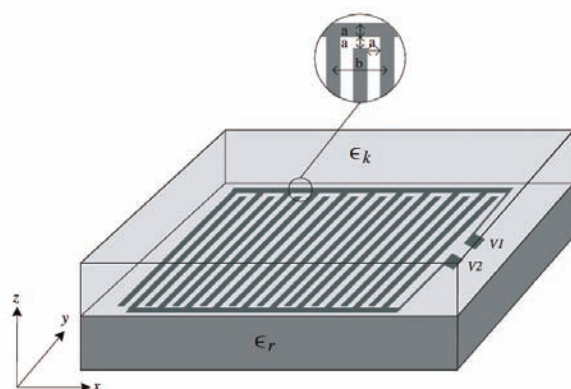
Compared to the other sensors, capacitive one exhibits many advantages such as linear measurement capability, excellent sensitivity, easy-to-use principles and ease of manufacturing. There is no friction in these types of sensors, thus temperature, humidity, and mechanical disturbances don't affect their performance. Due to the growing demand for the integrated on-chip electronic systems and need for the sensor downscaling, interdigital capacitor type of the sensors has become increasingly popular. Interdigital capacitors (IDC) are fabricated on an insulating

substrate. Electrodes of the IDCs are located on the same plate, which are connected to the ground or terminal voltage. The electrical field lines are closed through the substrate and dielectric material, which is placed on the electrodes. Moreover, based on the number of fingers and their geometrical specifications, capacitance of the IDCs varies. Sensitivity and capacitance of the interdigital capacitors are relatively higher in comparison with the other capacitors. Advantages of the IDCs make them a proper option for using in the sensors. These capacitors are also used in the chemical and biological sensors and in the telecommunications. In this study, a review on the capacitive sensors based on the IDCs and liquid dielectric has been accomplished.

Keywords: Micro Electromechanical systems, Capacitive sensors, Inter-finger Capacitors, Liquid Dielectrics

۱- مقدمه

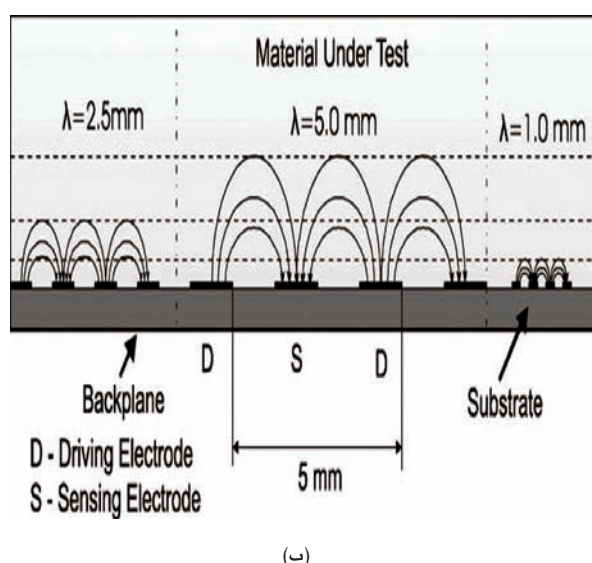
دی الکتریک یکسان، نسبت به خازن هایی که صفحات آن ها در مقابل یا عمود بر هم می باشد، ظرفیت خازنی بزرگتری دارند [۶ و ۷].



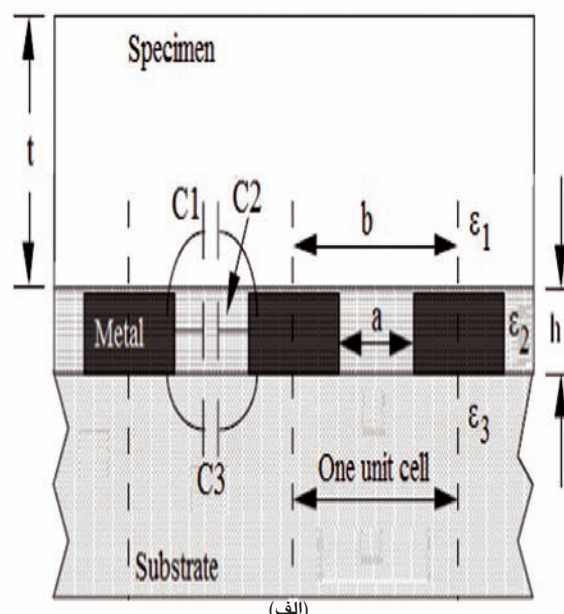
شکل ۱: ساختار خازن های بین انگشتی [۷]

هر دو الکتروود از خازن های بین انگشتی از سه خازن تشکیل شده است که در شکل (۲-الف)، نشان داده شده اند. ظرفیت خازن های بین انگشتی را می توان با استفاده از روابط (۱) تا (۵) به دست آورد [۸].

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



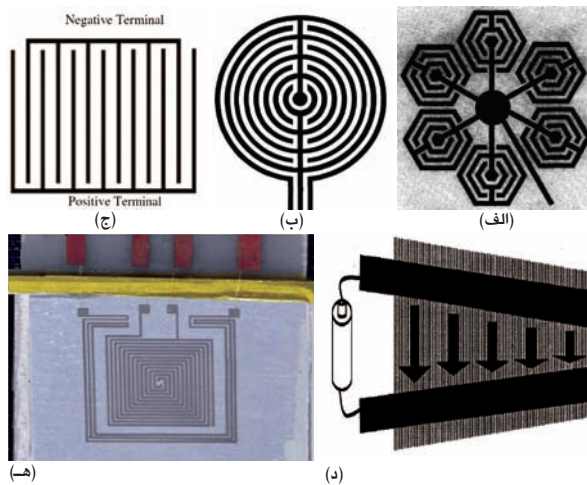
(ب)



(الف)

شکل ۲: (الف) مقطع عرضی خازن های بین انگشتی [۸] و (ب) خطوط میدان در خازن های بین انگشتی برحسب عرض الکتروودها و فاصله بین آن ها برای سه خازن متفاوت [۱۰]

سنسورهای خازنی با الکترودهای مستطیلی شکل دارند [۲۷]. تعدادی از ساختارهای خازن‌های بین انگشتی در شکل (۳)، ارایه شده‌اند.



شکل ۳: برخی از ساختارهای خازن‌های بین انگشتی [۲۸-۳۰]

۲- سنسورهای خازن‌های بین انگشتی با دی الکتریک مایع

در این نوع از سنسورها یک مایع بر روی الکترودهای خازن بین انگشتی، قرار می‌گیرد. از آنجایی که بین ظرفیت خازن بین انگشتی و دی الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودهای آن رابطه خطی برقرار است، با تغییر در حجم مایع یا تغییر در ضریب دی الکتریک مایع ظرفیت خازن بین انگشتی به صورت خطی تغییر می‌کند. در ادامه به نمونه‌هایی از این قبیل سنسورها می‌پردازیم.

۲-۱- اندازه‌گیری سطح آب با استفاده از خازن‌های بین انگشتی

اندازه‌گیری سطح مایع در بسیاری از صنایع غذایی، شیمیایی و دارویی ضروری می‌باشد که توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. این اندازه‌گیری برای انواع مختلف مایع مطرح می‌شود. در بسیاری از فرایندهای صنعتی نظیر داروسازی، مواد غذایی و شیمیایی از اندازه‌گیری سطح مایع، استفاده می‌شود. در مواردی با نظارت بر سطح مایع، می‌توان میزان خسارت‌های احتمالی را کاهش داد، مانند کنترل سطح آب در یک کانال باز یا رودخانه. برخی از تکنیک‌های تشخیص و نظارت سطح مایع از روش‌های آکوستیک، اولتراسونیک، فیبر نوری و غیره استفاده می‌کنند. در روش‌های مختلف اندازه‌گیری سطح مایع ممکن است، سنسور در هنگام اندازه‌گیری، در تماس مستقیم یا غیرمستقیم با مایع باشد. طول عمر سنسورهایی که با مایع در تماس هستند ممکن است محدود باشد، زیرا مشخصات آن‌ها می‌تواند به دلیل واکنش فیزیکی یا شیمیایی بین مایع و سنسور تغییر یابد. برای اندازه‌گیری سطح مایعات روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته اصلی تقسیم‌بندی کرد. در دسته نخست، اندازه‌گیری سطح مایع به صورت مداوم انجام می‌شود به طوری که نظارت دائم بر سطح مایع وجود دارد. در دسته دوم، اندازه‌گیری نقطه‌ای سطح مایع انجام می‌شود که برای فعال کردن زنگ هشدار به کار می‌رود. این روش‌ها می‌توانند در تماس مستقیم یا غیرمستقیم با مایع انجام شوند. یکی از روش‌های اندازه‌گیری سطح آب، استفاده از سنسورهای خازنی است که دارای ویژگی‌هایی همچون کم هزینه بودن، کم مصرف بودن، کیفیت خوب، حساسیت خطی بالا و سهولت نصب است. در ادامه به شرح دو نمونه از اندازه‌گیری سطح مایعات با استفاده از خازن‌های بین انگشتی خواهیم پرداخت.

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

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

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

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

*uc : unit cell

در این روابط a و h ، L ، N به ترتیب نشان‌دهنده تعداد، طول، ضخامت و فاصله بین الکترودها و b مجموع عرض و فاصله بین الکترودها در خازن‌های بین انگشتی در شکل (۲-الف)، هستند. ϵ_0 ثابت گذردهی الکتریکی خلاء، ϵ_1 و ϵ_3 گذردهی الکتریکی نسبی ماده قرار گرفته بر رو و بین الکترودها و ϵ_2 گذردهی الکتریکی نسبی بستر را بیان می‌کنند. $K(k)$ تابع انتگرال بیضوی کامل نوع اول است و آرگمان آن با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شده است [۹]. از روابط ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در طول الکترودها و یا ضریب دی الکتریک ماده قرار گرفته بر روی آن‌ها، ظرفیت خازن‌های بین انگشتی را به صورت خطی تغییر می‌دهد. بیشترین عمق نفوذ خطوط میدان از سطح الکترودها (λ)، در این خازن‌ها با استفاده از رابطه ۶، محاسبه می‌شود [۱۰]. هرچه عرض و فاصله بین الکترودها بیشتر باشد، خطوط میدان در ارتفاع بیشتری از سطح الکترودها بسته می‌شوند. با توجه به کاربرد و ابعاد سنسور، برای الکترودها، عرض و فاصله مناسبی انتخاب می‌گردد تا سنسور نسبت به ارتفاع خاصی از ماده دی الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودها حساس باشد. در شکل (۲-ب)، خطوط میدان در خازن بین انگشتی برحسب عرض الکترودها و فاصله بین آن‌ها، برای سه خازن متفاوت نشان داده شده است [۱۰].

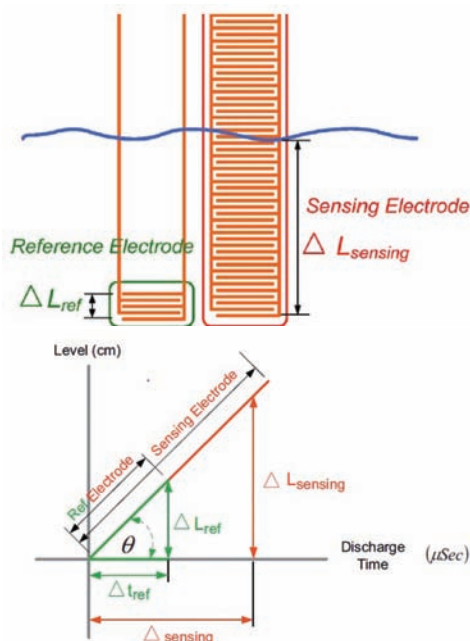
$$\lambda = b \quad (6)$$

۲-۱- نحوه عملکرد خازن‌های بین انگشتی در سنسورهای مختلف

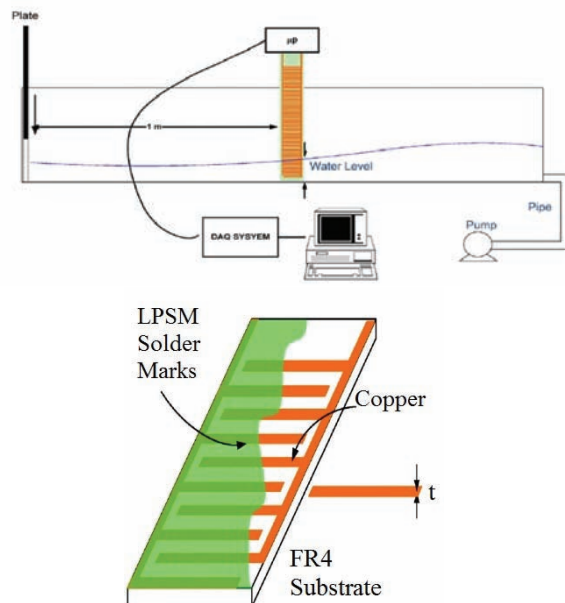
همان طور که در رابطه‌ی ۳ مشاهده می‌شود بین ضریب دی الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودها و ظرفیت خازن رابطه خطی برقرار است. بسیاری از سنسورها با تغییر در ضریب دی الکتریک ماده قرار گرفته بر روی الکترودها عمل حسگری را انجام می‌دهند. برای مثال در سنسورهایی نظیر جابجایی، بررسی عایق کابل و سیم، رطوبت سنج، بیو سنسورها، گاز و ... از این نوع مکانیزم استفاده می‌شود [۱۱-۲۴]. از طرفی طبق رابطه‌ی ۱، بین تغییرات طول خازن بین انگشتی و ظرفیت آن نیز رابطه خطی برقرار است. در سنسور فشار با تغییر در طول خازن بین انگشتی میزان فشار را اندازه‌گیری می‌کند [۲۵]. در سنسورهای خازن بین انگشتی بیان شده در بالا هر دو الکترودها خازن بین انگشتی ثابت هستند. در برخی از کاربردها یکی از الکترودها متحرک و دیگری ثابت است. برای مثال در سنسور زاویه سنج یکی از الکترودهای خازن، متحرک و دیگری ثابت است [۲۶].

۳-۱- برخی از ساختارهای خازن‌های بین انگشتی

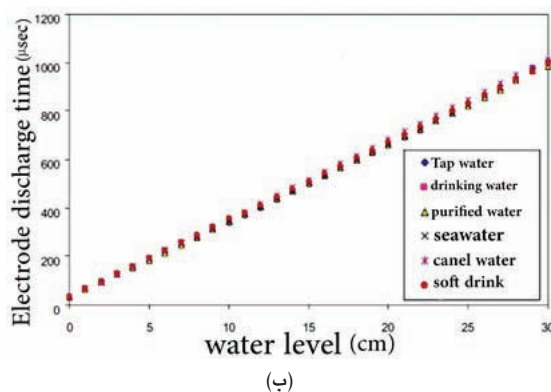
در سال‌های اخیر ساختارهای مختلفی از خازن‌های بین انگشتی برای برطرف کردن برخی از محدودیت‌های خازن‌های بین انگشتی معمولی، پیشنهاد شده‌اند. به عنوان مثال، در برخی از کاربردها ممکن است، الکترودهای مستطیلی شکل، جای خود را به الکترودهای حلقوی بدهند، زیرا الکترودهای حلقوی از نظر تقارن چرخشی برتر بوده و همچنین بخش‌های حساس بزرگ‌تری در مقایسه با



شکل ۵: نمودار سطح مایع برحسب زمان دشارژ [۳۱]

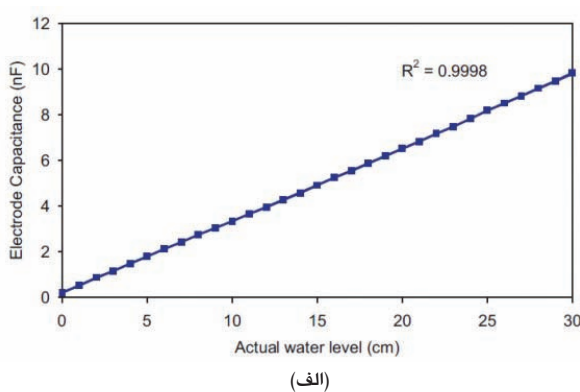


شکل ۴: سنسور اندازه‌گیر سطح آب با استفاده از خازن‌های بین انگشتی [۳۱]



(ب)

شکل ۶: (الف) ظرفیت خازن اندازه‌گیر برحسب سطح آب و (ب) زمان دشارژ خازن اندازه‌گیر برحسب سطح آب [۳۱].



(الف)

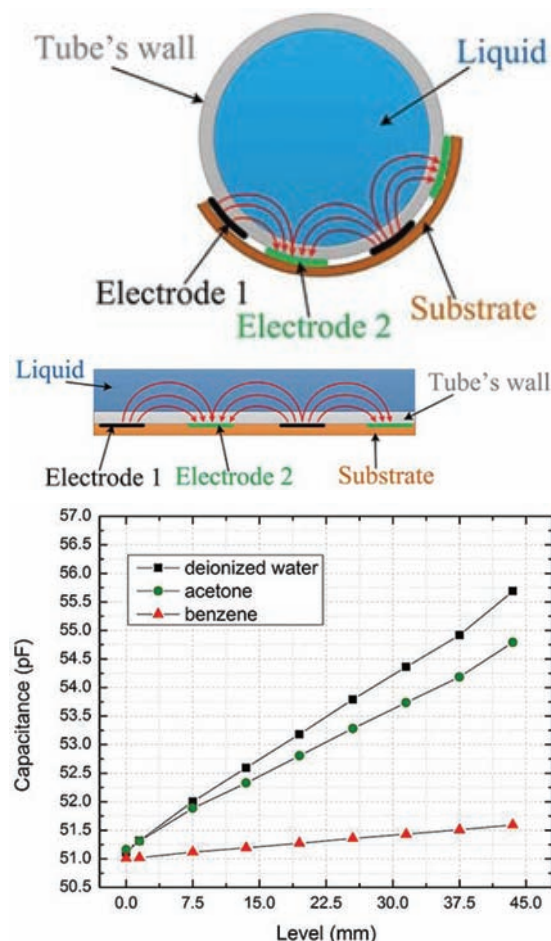
ثابت دی‌الکتریک آب با هوا، افزایش یا کاهش سطح آب ظرفیت خازن‌ها را به‌صورت خطی تغییر می‌دهد. شکل (۵) و رابطه ۷ چگونگی استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور اندازه‌گیر سطح آب را نشان می‌دهند [۱۵].

$$\tan\theta = \frac{\Delta L_{ref}}{\Delta t_{ref}} = \frac{\Delta L_{sensing}}{\Delta t_{sensing}} \quad (7)$$

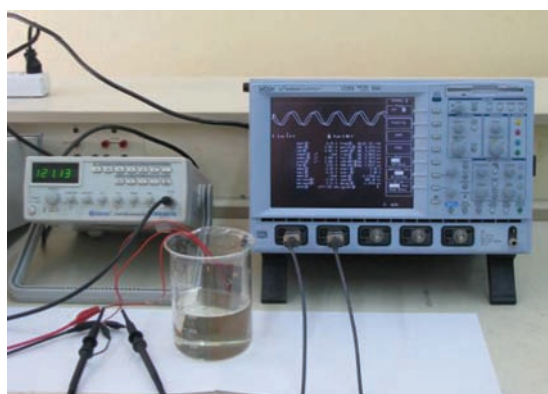
در رابطه ۷، از تغییرات طول (ΔL) و زمان دشارژ خازن‌ها (Δt) استفاده شده است. از آنجایی که برای خازن مرجع این دو مقدار (ΔL_{ref} و Δt_{ref}) معلوم هستند، بنابراین زاویه قابل محاسبه است. از طرفی زمان دشارژ خازن اندازه‌گیر ($\Delta t_{sensing}$)، نیز با استفاده از میکروکنترلر مشخص می‌شود، در نتیجه با استفاده از رابطه (۸)، تغییرات طول آب ($\Delta L_{sensing}$)، بدست می‌آید. قسمت‌های الف و ب شکل (۶)، نمودارهای ظرفیت خازن اندازه‌گیر و زمان دشارژ را برحسب سطح آب، نشان می‌دهند [۳۱].

$$\tan\theta \Delta L_{sensing} = \Delta t_{sensing} \quad (8)$$

برای کنترل سطح آب رودخانه یا آبراهه‌ها، از سنسوری مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی، استفاده می‌شود. این سنسور خازنی شامل یک مدار چایی است. ظرفیت خازنی به ازای سطوح مختلف آب متفاوت است و دلیل آن، تفاوت در ثابت دی‌الکتریک آب و هواست. این سنسور شامل دو خازن می‌باشد که یکی از آن‌ها به‌عنوان مرجع استفاده می‌شود. وجود خازن مرجع باعث می‌شود که عملکرد سنسور، مستقل از میزان ناخالصی موجود در آب و دمای آن گردد؛ زیرا دما یک پارامتر اثرگذار بر روی ثابت دی‌الکتریک است، به‌علاوه با این تکنیک بدون نیاز به کالیبراسیون، سنسور راه‌اندازی می‌شود. در این سنسور از یک میکروکنترلر برای محاسبه ظرفیت خازنی الکترودها از نظر زمان با توجه به سطح آب و زمان دشارژ خازن استفاده می‌شود. این سنسور دارای رنج اندازه‌گیری ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر با رزولوشن ۰/۲ بوده و حساسیت کافی برای ردیابی تغییرات سطح آب را دارد. در شکل (۴)، سنسور اندازه‌گیری سطح آب نشان داده شده است [۳۱]. رابطه بین ظرفیت خازن‌های بین انگشتی و ثابت دی‌الکتریک قرارگرفته بر روی الکترودها، خطی است. از طرفی به دلیل تفاوت



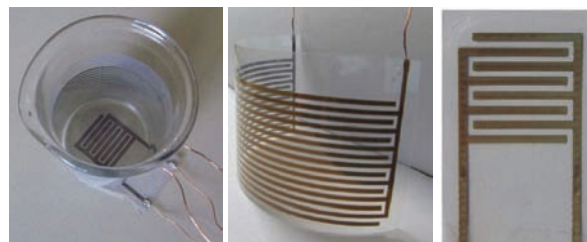
شکل ۸: (الف) نحوه ی بسته شدن خطوط میدان در سنسور تعیین سطح مایعات و (ب) نمودار ظرفیت خازن اندازه گیر، برحسب سطح چند مایع [۳۲]



شکل ۹: (الف) دستگاه و (ب) مدار مربوط به تعیین میزان قند موجود در شربت قند با استفاده از خازن های بین انگشتی [۸]

۲-۲- اندازه گیری سطح مایعات با استفاده از خازن های بین انگشتی

در این بخش یک سنسور خازنی برای اندازه گیری سطح مایعات ارایه شده است. ساختار این سنسور در شکل (۷)، قابل مشاهده است. سنسور خازنی ساخته شده با استفاده از چاپگر جوهرافشان بر روی یک بستر انعطاف پذیر، ساخته شده است و در تماس مستقیم با مایع قرار نمی گیرد، به همین دلیل هیچ واکنش فیزیکی یا شیمیایی با مایع نداشته و نیازی به پوشش محافظ ندارد. بنابراین این سنسور می تواند برای تشخیص سطح انواع مختلف مایعات اعم از غیررسانا، قابل اشتعال و خورنده مورد استفاده قرار گیرد [۳۲].



شکل ۷: سنسور اندازه گیر سطح مایعات [۳۲]

در این سنسور از دو خازن بین انگشتی استفاده شده است. یکی از خازن ها به عنوان مرجع و دیگری برای اندازه گیری سطح استفاده می شود. خازن اندازه گیر بر روی بدنه ظرف حاوی مایع، قرار می گیرد و با تغییر در سطح مایع مقدار آن تغییر می کند و برای آن که سنسور مستقل از نوع مایع باشد، خازن مرجع را در کف بدنه ظرف، قرار می دهند. مقدار این خازن، تقریباً ثابت است و با تغییر در سطح مایع، تغییر نمی کند. شکل (۸-الف)، نحوه ی بسته شدن خطوط میدان را برای خازن اندازه گیر نشان می دهد. برای مثال می توان از این سنسور برای اندازه گیری سطح آب دیونیزه، استون و بنزن استفاده کرد. به دلیل بزرگ تر بودن ضریب دی الکتریک آب دیونیزه، استون و بنزن از هوا، با افزایش سطح این مایعات ظرفیت خازن بین انگشتی بزرگ تر می شود. شکل (۸-ب)، نمودار ظرفیت خازن اندازه گیر، برحسب سطح این سه مایع را نشان می دهد [۳۲].

۲-۳- تعیین میزان قند موجود در محلول قندی با استفاده از خازن های بین انگشتی

در صنایع غذایی تعیین طعم و مزه مواد غذایی حایز اهمیت است. با استفاده از خازن های بین انگشتی می توان میزان قند موجود در یک شربت قندی را تعیین کرد که سامانه مربوط به تست این سنسور، در شکل (۹-الف)، نشان داده شده است. نتایج تجربی نشان می دهند که این سنسور قابلیت مناسبی برای تعیین میزان قند موجود در محلول قندی را دارد و یکی از جدیدترین زبان های الکترونیکی در صنایع غذایی است. در بسیاری از کاربردهای دیگر مانند تعیین الکل و رطوبت خاک نیز می توان از این سنسور استفاده کرد. به طور کلی مدار واسط این سنسور نیاز به میکروکنترلر نداشته و شامل یک مولد موج سینوسی، یک مقاومت و یک خازن است که مجموع آن ها با یکدیگر تشکیل یک فیلتر بالا گذر از نوع اول می دهند. نتایج تجربی نشان می دهند که فرکانس مناسب برای منبع بین ۱۲۰ kHz تا ۳۰۰ kHz است [۸].

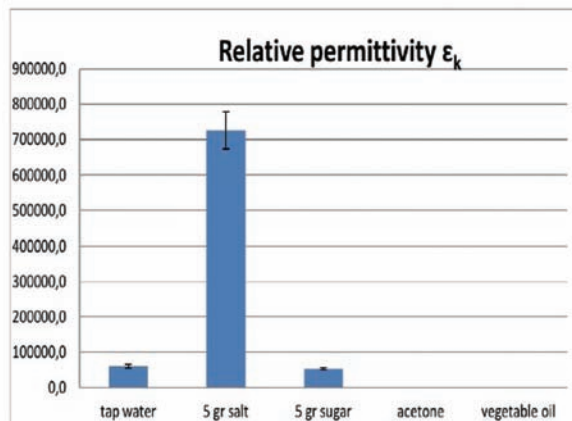
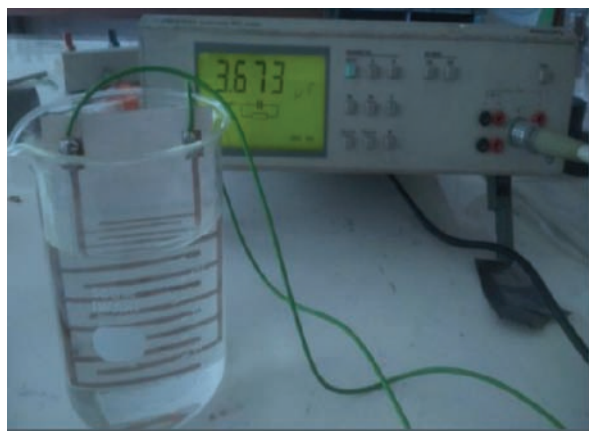
$$H(f) = \frac{V_0}{V_{ac}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j2\pi fC}} \quad (9)$$

$$|H(f)| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(2\pi fC)^2}}} \quad (10)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (11)$$

۲-۴- اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک مایعات با استفاده از خازن‌های بین‌انگشتی

ثابت دی‌الکتریک یک ماده، کمیتی است که توانایی ماده را در جداسازی زوج یون‌های مثبت و منفی از یکدیگر، نشان می‌دهد. ثابت دی‌الکتریک، یک پارامتر مهم به‌خصوص، در مواد عایق است. با استفاده از خازن‌های بین‌انگشتی می‌توان ثابت دی‌الکتریک را برای مایعات مختلف به‌دست آورد. رابطه‌ی بین ظرفیت خازن و ثابت دی‌الکتریک مایعات مختلف قرارگرفته بر روی الکترودهای آن، خطی و مستقل از ولتاژ اعمال‌شده به سیستم است. زمانی که ولتاژ به الکترودها اعمال می‌شود خطوط میدان از طریق ماده قرارگرفته بر روی الکترودها بسته می‌شوند؛ بنابراین با تغییر در ماده قرارگرفته بر روی الکترودها، شدت میدان الکتریکی تغییر می‌کند. با استفاده از این سنسور می‌توان ثابت دی‌الکتریک مایعات مختلف را تعیین کرد. در این آزمون از آب معمولی، روغن خوراکی، استون، آب‌نمک و آب شکر استفاده شده است. شکل (۱۱-الف)، سیستم اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک مایعات را با استفاده از خازن‌های بین‌انگشتی، نشان می‌دهد [۳۳].



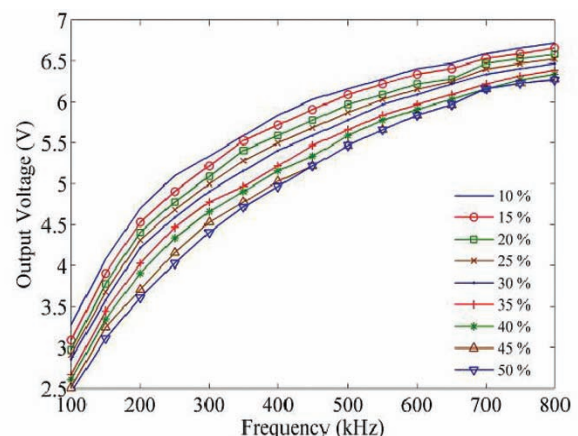
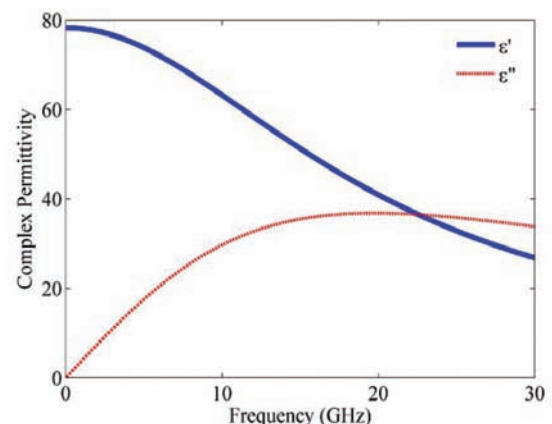
شکل ۱۱: (الف) سنسور اندازه‌گیری گذردهی نسبی مایعات و (ب) ضریب گذردهی نسبی برای چند ماده مختلف [۳۳]

این سنسور می‌تواند مقدار ظرفیت خازن کل (C_{total}) را اندازه بگیرد. با استفاده از فرمول ظرفیت خازن‌های بین‌انگشتی و معلوم بودن سایر پارامترهای خازن، می‌توان رابطه ضریب گذردهی نسبی محلول موردنظر را مطابق با فرمول‌های (۱۴) و (۱۵) محاسبه کرد. در این روابط ϵ_r و ϵ_k به ترتیب بیانگر ثابت دی‌الکتریک خلاء، بستر و مایع قرار گرفته بر روی الکترودها است و a ، L ، N و h به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی تعداد، طول، ضخامت، عرض و فاصله بین الکترودها

شکل (۹-ب)، مدار اندازه‌گیری خازن بین‌انگشتی را نشان می‌دهد که در این مدار، مقدار مقاومت (R)، ثابت ولی ظرفیت خازن (C)، با توجه به میزان قند موجود در محلول قندی متغیر می‌باشد. تابع انتقال این مدار $H(f)$ دارای اندازه $|H(f)|$ و فرکانس قطع (f_c) است که در روابط (۹) تا (۱۱) نشان داده شده‌اند [۸].

از طرفی ضریب دی‌الکتریک نسبی آب (ϵ_{water})، بر اساس مدل debye با فرکانس متغیر بوده و از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است. در این رابطه، ϵ_∞ ضریب گذر آب در فرکانس‌های نوری، ϵ_s ضریب گذردهی آب در فرکانس استاتیک، τ زمان آرامش الکتریکی است و f فرکانس است. مقادیر ϵ_∞ و ϵ_s به ترتیب برابر با $4/6$ و $78/3$ و $8/07$ ps هستند. نمودار شکل (۱۰-الف)، تغییرات قسمت حقیقی (ϵ') و موهومی (ϵ'') ضریب گذردهی آب را در فرکانس‌های مختلف، نشان می‌دهد. برای شکر دو قسمت حقیقی و موهومی ثابت هستند و با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۸].

$$\epsilon_{water} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j2\pi f\tau} \quad (12)$$



شکل ۱۰: (الف) مشخصه ضریب گذردهی نسبی آب برحسب فرکانس و (ب) منحنی‌های ولتاژ برحسب فرکانس برای غلظت‌های مختلف شکر [۸]

$$\epsilon_{sugar} = 3.525 - j0.0025 \quad (13)$$

با تغییر فرکانس، ضریب گذردهی نسبی آب تغییر کرده؛ بنابراین ظرفیت خازن تغییر می‌کند. با استفاده از تابع انتقال مدار، می‌توان ولتاژ خروجی را بر حسب فرکانس برای غلظت‌های مختلف شکر، به دست آورد که در شکل (۱۰-ب)، نشان داده شده است.

جدول ۱: محاسبه ضریب گذردهی نسبی برای چند ماده مختلف [۳۳]

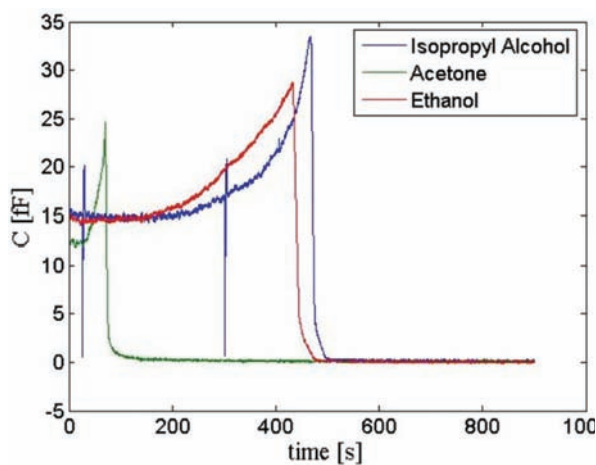
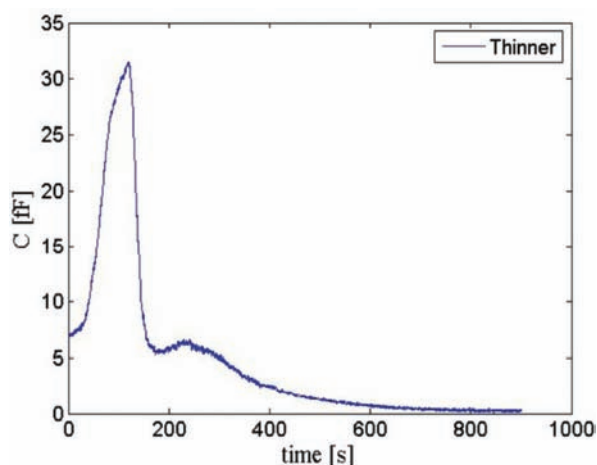
Substance	C_{total} [F]	C_{uc} (F)	ϵ_k (Fm ⁻¹)	Error (%)
Tap water	3.04×10^{-7}	6.75×10^{-7}	60884.9	7
water + 5 gr salt	3.63×10^{-6}	8.06×10^{-6}	726657.3	7
water + 15 gr salt	2.75×10^{-5}	6.12×10^{-5}	5518927.8	7
Water + 25 gr salt	2.61×10^{-5}	5.80×10^{-5}	5226981.0	7
Water + 35 gr salt	3.06×10^{-5}	6.79×10^{-5}	6124199.7	7
Water + 45 gr salt	3.55×10^{-5}	7.90×10^{-5}	7120292.9	7
Water + 55 gr salt	3.98×10^{-5}	8.85×10^{-5}	7977427.4	7
Water + 5 gr sugar	2.66×10^{-7}	5.92×10^{-7}	53369.1	7
Water + 15 gr sugar	2.43×10^{-7}	5.40×10^{-7}	48712.7	7
Water + 25 gr sugar	2.21×10^{-7}	4.91×10^{-7}	44290.1	7
Water + 35 gr sugar	1.67×10^{-7}	3.715×10^{-7}	33440.6	7
Water + 45 gr sugar	1.72×10^{-7}	3.83×10^{-7}	34496.1	7
Water + 55 gr sugar	1.68×10^{-7}	3.73×10^{-7}	33641.0	7
Aseton	1.06×10^{-10}	2.36×10^{-10}	18.3	7
Cooking oil	1.96×10^{-11}	4.36×10^{-11}	0.9	11

$$\epsilon_k = \frac{\frac{C_{uc}}{\epsilon_0} - \epsilon_r \frac{K(\sqrt{1-(\frac{a}{b})^2})}{k(\frac{a}{b})}}{\frac{K(\sqrt{1-(\frac{a}{b})^2})}{k(\frac{a}{b})} + 2\frac{t}{a}} \quad (15)$$

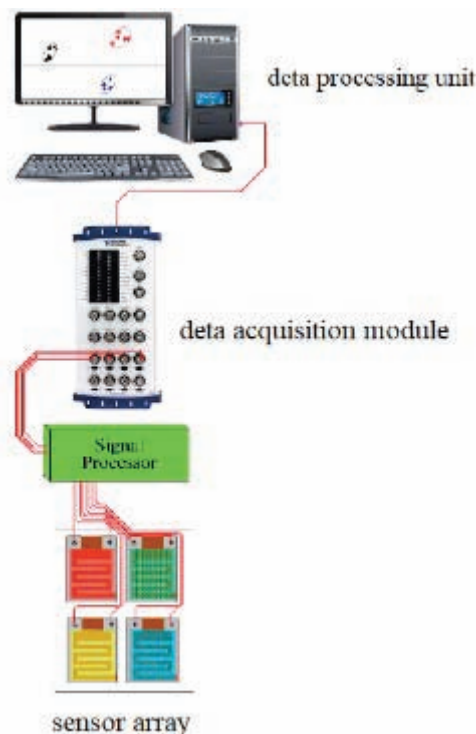
۲-۵- استفاده از خازن‌های بین انگشتی برای کنترل فرایندهای مایع
شکل (۱۲)، سنسور نظارت بر فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مایعات را نشان می‌دهد. این سنسور با استفاده از خازن‌های بین انگشتی

است. $K(K)$ نیز تابع انتگرال بیضوی کامل نوع اول است. مقایسه بین نتایج آزمایش و مقدار تئوری محاسبه شده، نشان می‌دهد که این سنسور دارای ۷٪ خطا می‌باشد که به‌طور تقریبی خطای کوچکی است و می‌توان از آن صرف نظر کرد. شکل (۱۱-ب) و جدول (۱)، ضریب گذردهی نسبی را برای آب معمولی، روغن خوراکی، استون، آب‌نمک و آب شکر، نشان می‌دهد [۳۳].

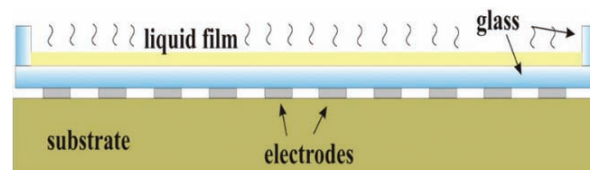
$$C_{uc} = \frac{C_{total}}{(N-1)L} \quad (14)$$



شکل ۱۳: نمودار کنترل تبخیر، الف) الکل، استون، اتانول و ب) تیتیر، با استفاده از خازن بین انگشتی [۳۳]



در مقیاس میلی متری ساخته شده است، بنابراین میدان الکتریکی تا چند میلی متر از سطح الکترودها گسترش می یابد. ضخامت چند میلی متری از ماده قرار گرفته بر روی الکترودها بر روی شدت میدان تاثیر گذاشته و ظرفیت خازن را تغییر می دهد [۳۴].



شکل ۱۲: سنسور کنترل فرایندهای حالت مایع [۳۴]

بر روی الکترودها یک صفحه شیشه ای قرار می گیرد. البته به این نکته نیز باید توجه داشت که نباید ضخامت صفحه شیشه ای زیاد باشد، به عبارتی ضخامت شیشه بایستی طوری در نظر گرفته شود تا خطوط میدان از مایع نیز عبور کنند. عملکرد این سنسور بر پایه ی تغییر در ارتفاع و ثابت دی الکتریک مایع قرار گرفته بر روی شیشه است. برای مثال، زمانی که مایع شروع به تبخیر شدن می کند، ارتفاع مایع کاهش یافته و به دلیل کاهش عمق نفوذ میدان در مایع، ظرفیت خازن کاهش می یابد [۳۴]. منحنی های کنترل تبخیر برای چند مایع، در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

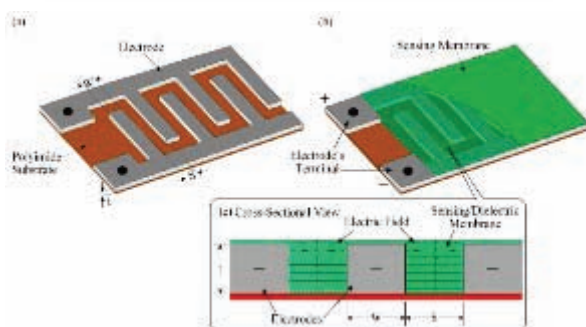
۲-۵ - استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور چشایی

سنسورهای طعم در موسسات تحقیقاتی، صنایع دارویی، صنایع غذایی و آشامیدنی، مراکز تشخیص پزشکی، مراکز کنترل محیط زیست و بخش کشاورزی کاربرد زیادی دارند. با استفاده از زبان های الکترونیکی مانند ولتمتر، آمپر متر و پتانسیومتر می توان انواع مختلف طعم را شناسایی کرد. استفاده از خازن سبب حساسیت بالا با محدوده دینامیکی وسیع، پاسخ و زمان بازپایی سریع، هزینه کم و ثبات بالا برای تشخیص انواع مختلف طعم، مانند شیرینی، شوری، ترشی و تلخی می شود. با استفاده از چهار خازن بین انگشتی می توان چهار طعم را شناسایی کرد. شکل (۱۴-الف)، ساختار سیستم شناسایی طعم را نشان می دهد [۳۵]. با استفاده از ترکیبات شیمیایی مختلف، می توان انواع مختلف طعم را شناسایی کرد که در جدول (۲)، تعدادی از آنها قابل مشاهده هستند. این ترکیبات شیمیایی به عنوان لایه حساس بر روی الکترودها قرار می گیرند. شکل (۱۴-ب)، ساختار خازن بین انگشتی را زمانی که بر روی آن لایه حساس قرار دارد، نشان می دهد. هنگامی که چهار خازن بین انگشتی در محلول طعم دار غوطه ور می شوند، ظرفیت خازن تغییر می کند. شکل (۱۵)، منحنی های خروجی سنسور را در غلظت های مختلف، نشان می دهد.

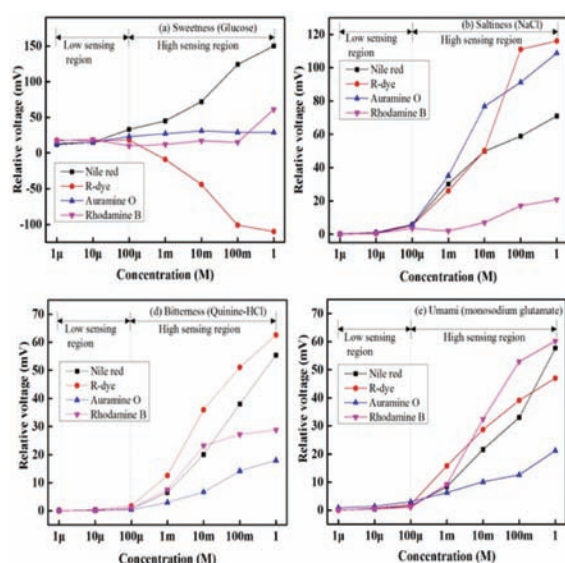
جدول ۲: ترکیبات شیمیایی برای شناسایی طعم یک ماده [۳۵]

طعم و مزه	ترکیبات شیمیایی
شیرینی	شکر، فروکتوز، ساکارین، مقدار آملین، الکل، ال-آلانین
شوری	NaCl - KCl - KNO ₃
ترشی	HCl - H ₂ SO ₄ - CH ₃ COOH
تلخی	تکوین، کافئین، آسپرین، آوره، ال-تریپتوفان، MgCl ₂
ملی (خوش طعمی)	آمینو اسید ها

زمانی که به الکترودهای خازن، جریانی با فرکانس f وارد می شود، سیگنال دریافتی (V_c) را می توان به صورت رابطه (۱۶)، نوشت. رابطه (۱۷)، میزان تغییرات سیگنال خروجی (ΔV_c) را بر حسب تغییرات خازن ها (ΔC)، نشان می دهد [۳۵].



شکل ۱۴: (الف) سیستم تشخیص طعم با استفاده از چهار خازن بین انگشتی و (ب) تصویری از سنسور در حالت بدون لایه حساس. با استفاده از لایه حساس و تصویر از جلوی سنسور [۳۵]



شکل ۱۵: نمودارهای خروجی سنسور در تست ها و غلظت های مختلف [۳۵]

- [12] Y. Liu, Y. Huang, R. Tang, and B. Wang, "Application of interdigital capacitive sensors for detecting power cable insulation damage," in *Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2015 IEEE International Conference on, 2015, pp. 1795–1799.
- [13] C.-L. Zhao, M. Qin, and Q.-A. Huang, "A fully packaged CMOS interdigital capacitive humidity sensor with polysilicon heaters," *IEEE Sens. J.*, vol. 11, no. 11, pp. 2986–2992, 2011.
- [14] H. Farahani, R. Wagiran, and M. Hamidon, "Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review," *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 7881–7939, 2014.
- [15] P. Fürjes, A. Kovacs, C. Dúcsó, M. Ádám, B. Müller, and U. Mescheder, "Porous silicon-based humidity sensor with interdigital electrodes and internal heaters," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 95, no. 1–3, pp. 140–144, 2003.
- [16] D. M. Liu, J. Aguilar-Hernandez, K. Potje-Kamloth, and H. D. Liess, "A new carbon monoxide sensor using a polypyrrole film grown on an interdigital-capacitor substrate," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 41, no. 1–3, pp. 203–206, 1997.
- [17] C. Hagleitner et al., "Smart single-chip gas sensor microsystem," *Nature*, vol. 414, no. 6861, p. 293, 2001.
- [18] M. Kitsara et al., "Single chip interdigitated electrode capacitive chemical sensor arrays," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 127, no. 1, pp. 186–192, 2007.
- [19] P. Van Gerwen et al., "Nanoscaled interdigitated electrode arrays for biochemical sensors," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 49, no. 1–2, pp. 73–80, 1998.
- [20] S. M. Radke and E. C. Alocilja, "Design and fabrication of a micro-impedance biosensor for bacterial detection," *IEEE Sens. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 434–440, 2004.
- [21] M. Varshney and Y. Li, "Interdigitated array microelectrodes based impedance biosensors for detection of bacterial cells," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 24, no. 10, pp. 2951–2960, 2009.
- [22] S. M. Radke and E. C. Alocilja, "A microfabricated biosensor for detecting foodborne bioterrorism agents," *IEEE Sens. J.*, vol. 5, no. 4, pp. 744–750, 2005.
- [23] S. M. Radke and E. C. Alocilja, "A high density microelectrode array biosensor for detection of *E. coli* O157: H7," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 20, no. 8, pp. 1662–1667, 2005.
- [24] N. Blaž, M. Kisić, Č. Žlebić, G. Mišković, G. Radosavljević, and L. Živanov, "Displacement sensor based on interdigital capacitor," in *Electronics Technology (ISSE)*, 2015 38th International Spring Seminar on, 2015, pp. 477–481.
- [25] Q. Tan et al., "A novel interdigital capacitor pressure sensor based on LTCC technology," *J. Sensors*, vol. 2014, 2014.
- [26] L. Zhao and E. M. Yeatman, "Micro capacitive tilt sensor for human body movement detection," in *4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2007)*, 2007, pp. 195–200.
- [27] J. Guo, P. Hu, and J. Tan, "Analysis of a segmented annular coplanar capacitive tilt sensor with increased sensitivity," *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 133, 2016.
- [28] Y. Kim, B. Jung, H. Lee, H. Kim, K. Lee, and H. Park, "Capacitive humidity sensor design based on anodic aluminum oxide," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 141, no. 2, pp. 441–446, 2009.
- [29] M. S. A. Rahman, S. C. Mukhopadhyay, and P.-L. Yu, "Novel planar interdigital sensors," in *Novel Sensors for Food Inspection: Modelling, Fabrication and Experimentation*, Springer, 2014, pp. 11–35.
- [30] W. H. Grover, "Interdigitated Array Electrode Sensors: Their Design, Efficiency, and Applications," 1999.
- [31] K. Chetpattananondh, T. Tapoanoi, P. Phukpattaranont, and N. Jindapetch, "A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 209, pp. 175–182, 2014.
- [32] M. Kisić, N. Blaž, C. Zlebić, L. Živanov, and M. Damjanovic, "Flexible inkjet printed sensor for liquid level monitoring," in *Electronics Technology (ISSE)*, 2015 38th International Spring Seminar on, 2015, pp. 472–476.
- [33] N. Kurniawati and M. S. Muntini, "INTER-DIGITAL CAPACITOR SENSOR FOR MEASURING PERMITTIVITY OF FLUID,"
- [34] A. Guadarrama-Santana, A. García-Valenzuela, F. Pérez-Jiménez, and L. Polo-Parada, "Interdigitated capacitance sensors in the mm scale with sub-femtoFarad resolution suitable for monitoring processes in liquid films," *Rev. Mex. física*, vol. 60, no. 6, pp. 451–459, 2014.
- [35] M. R. R. Khan, A. Khalilian, and S.-W. Kang, "A high sensitivity IDC-electronic tongue using dielectric/sensing membranes with solvatochromic dyes," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 668, 2016.

$$V_C = \frac{i_C}{2\pi f C} \quad (16)$$

$$v_C = \frac{i_C}{2\pi f \Delta C} \Delta \quad (17)$$

۳- نتیجه گیری

سنسورهای خازنی دارای ویژگی‌هایی نظیر خطی بودن خروجی، حساسیت عالی، اصول عملکردی، طراحی و ساخت آسان و... هستند. همچنین در برابر دما، رطوبت و اختلالات مکانیکی مقاوم‌اند. خازن‌های بین انگشتی یکی از ساختارهای خازنی هستند که در سنسورهای مختلف استفاده می‌شوند. خازن‌های بین انگشتی از دو الکترود شانه‌ای قرار گرفته در یک صفحه ساخته می‌شوند و مانند دیگر ساختارهای خازنی نیاز به دو صفحه موازی یا عمود بر هم برای قرارگیری الکترودها ندارند. از این ویژگی خازن‌های بین انگشتی می‌توان برای کوچک‌سازی سنسورها استفاده کرد. ساختار ساده، عملکرد آسان، خطی بودن خروجی و هزینه ساخت پایین آن‌ها سبب شده است که از این خازن‌ها در بسیاری از سنسورها استفاده شود. زمانی که به الکترودهای خازن بین انگشتی ولتاژ زمین و ترمینال وصل شود، خطوط میدان از طریق بستر و ماده دی الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودها بسته می‌شود؛ بنابراین، با تغییر در ضریب دی الکتریک ماده قرار بر روی الکترودها، ظرفیت خازن بین انگشتی به صورت خطی، تغییر می‌کند که اساس کار بسیاری از سنسورها است.

در این مقاله سعی بر آن شد که نمونه‌هایی از سنسورهای خازن بین انگشتی مبتنی بر دی الکتریک مایع مورد بررسی قرار گیرد. این سنسورها برای اندازه‌گیری ارتفاع و ثابت دی الکتریک مایعات، کنترل فرایند مایعات و اندازه‌گیری قند در محلول قندی و تعیین طعم یک محلول به کار می‌روند.

مراجع

- [1] S. E. Lyshevski, *MEMS and NEMS: systems, devices, and structures*. CRC press, 2002.
- [2] N. Maluf, "An introduction to microelectromechanical systems engineering." IOP Publishing, 2002.
- [3] S. M. Sze, *Semiconductor sensors*, vol. 55. Wiley New York, 1994.
- [4] P. Hu, J. Guo, and J. Tan, "An annular planar-capacitive tilt sensor with a 360 measurement range," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 4, pp. 2469–2476, 2016.
- [5] D. L. Fuller, "Microelectromechanical Systems (MEMs) Applications—Microphones," *Rochester Inst. Technol. Microelectron. Eng.*, pp. 1–43, 2005.
- [6] G. González, E. S. Kolosovas-Machuca, E. López-Luna, H. Hernández-Arriaga, and F. J. González, "Design and fabrication of interdigital nanocapacitors coated with HfO₂," *Sensors*, vol. 15, no. 1, pp. 1998–2005, 2015.
- [7] N. Zoric, A. Iavorschi, M. Sireteanu, G. Viziteu, and R. Ciobanu, "Design and Simulations of IDC Sensor Using COMSOL Multiphysics and Dielectric Spectroscopy of LTCC Materials," *Bul. AGIR*, vol. 3, pp. 63–69, 2013.
- [8] N. Angkawisittpan and T. Manasri, "Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 8–13, 2012.
- [9] E. W. Weisstein and C. Problem, "From MathWorld—A Wolfram Web Resource< <http://mathworld.wolfram.com/>," Collat. html, 2005.
- [10] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, and M. Zahn, "Interdigital sensors and transducers," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 5, pp. 808–845, 2004.
- [11] R. T. Sheldon and N. Bowler, "An interdigital capacitive sensor for nondestructive evaluation of wire insulation," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 4, pp. 961–970, 2014.



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 ۵۸۵۹۸۳۱۱ ۲۸۰۶۵۱۵۷ 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. پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی گروه برق 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

ریال ۷۰۰,۰۰۰

ریال ۶۰۰,۰۰۰

یکساله

اشتراک

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 ۱۰۰,۰۰۰ ریال به حساب واریز گردد.

طراح و تولید کننده مبدل های الکترونیکی انرژی الکتریکی

Power Conversion Systems

انواع منابع تغذیه تجهیزات مخابراتی، اینورتر خورشیدی، کولر آبی با موتور BLDC شارژر خودروهای الکتریکی، کانورتر توربین بادی، سیستم ذخیره ساز انرژی (ESS)، سیستم های بهبود کیفیت توان، سیستم تغذیه هیبریدی و... رتبه یک پیمانکاری در رشته ارتباطات از سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور



www.nianelectronic.com

@nian_electronic

CUSTOM DESIGN PRODUCTS

شارژرهای صنعتی
Industrial Chargers 72 up to 720kW

کانورتر توربین بادی
100kW up to 250kW / Full Converter

شارژر سریع خودرو الکتریکی
DC Fast Charger

سیستم های ذخیره ساز انرژی الکتریکی
Hybrid Systems

اینورتر خورشیدی
5kW / On-Grid

اینورتر خورشیدی
100kW / On-Grid

موتور BLDC کولر آبی

بیش از ربع قرن فعالیت دانش بنیان در طراحی و تولید مبدل های انرژی الکتریکی

- واحد تحقیق و توسعه نمونه کشور منتخب وزارت صنعت، معدن و تجارت سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ و ۱۳۹۷
- برترین شرکت خصوصی فناوری و نوآوری کشور منتخب پنجمین دوره جایزه ملی مدیریت فناوری و نوآوری سال ۱۳۹۶
- واحد نمونه صادراتی کشور سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶ / رتبه یک توسعه کسب و کارهای نوآورانه سال ۱۳۹۵
- واحد نمونه تولید و پشتیبانی و کار آفرین نمونه سال ۱۳۹۲ منتخب وزارت ارتباطات و فن آوری اطلاعات (فاوا)
- برترین شرکت فن آفرین کشور منتخب دوازدهمین جشنواره ملی فن آفرینی شیخ بهایی سال ۱۳۹۵
- تندیس طلایی رعایت حقوق مصرف کنندگان به صورت متوالی از سال ۱۳۹۰ تاکنون

و ...



چهارمین همایش ملی

فناوری های نوین انرژی

۱۳ و ۱۴ آذرماه ۱۳۹۸

دانشکده مهندسی ■ دانشگاه فردوسی مشهد

The 4th National Conference on EMERGING ENERGY TECHNOLOGIES

Dec. 4-5, 2019 ■ Engineering Faculty ■ Ferdowsi Univ. of Mashhad

محورهای همایش:

- ❖ مدیریت مصرف (روش ها و تجهیزات نوین)
- ❖ هوشمندسازی صنعت برق (اتوماسیون و اینترنت اشیا)
- ❖ تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر (فرصت ها و چالش ها در ایران)
- ❖ ریزمنابع و ریزشبکه ها (توسعه و مدیریت در ایران)
- ❖ اقتصاد فناوری های نوین انرژی (چالش های پیش رو و راهکارها)
- ❖ خودروهای برقی (مزایا و محدودیت ها در ایران)



شرکت برق منطقه ای خراسان



انجمن مهندسان برق و الکترونیک ایران
شماره خراسان



دانشکده مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد



دانشگاه فناوری



@NCEET2019

Nceet2019.um.ac.ir

nceet2019@ferdowsi.um.ac.ir