تابستان ۱۴۰۰
سال دهم

کهربا

فصلنامه تخصصی مهندسی برق و کامپیوتر

kahrobaonline.ir
Journal of Electrical and Computer Engineering

شماره سی و دوم



راه اندازی موتورهای تک فاز

طراحی المان های فیلتر با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حسگر فیبر نوری بر اساس رزونانس پلاسمون سطح

حل مسئله فروشنده دوره گرد با استفاده از الگوریتم ژنتیک

طراحی،ساخت و آزمون پایه های بتنی پیش تنیده H شکل شبکه توزیع برق

برنامه ریزی بهینه ی شبکه های توزیع هوشمند در حضور منابع تجدیدپذیر

ISSN :2322-3723

شماره مجوز وزارت فرهنگ و ارشاداسلامی ۷۷۸۲۱

سال دهم

شماره سی‌و دوم

تابستان ۱۴۰۰



صاحب‌امتیاز

سایت نواندیشان

مدیرمسئول

مهدی عارف خیابانی

سردبیر

امین شیخ نجدی

هیئت تحریریه

دکتر میثم عسگری- ارشد برق- دکترای علوم و مهندسی کامپیوتر- استادیار دانشگاه OHSU پورتلند آمریکا

دکتر امیرحسین رحمانی – دکترای برق قدرت- مدیر گروه برق دانشگاه آزاد دزفول

دکتر ملیحه نیک سیرت- دکترای علوم کامپیوتر- استادیار دانشگاه صنعتی بیرجند

دکتر محمد دوستی زاده- دکترای برق، قدرت- مربی دانشگاه آزاد اسلامی خرم آباد

دکتر علویه میرفتح الهی- دکترای علوم اعصاب گرایش هوش مصنوعی- دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندس امین شیخ نجدی- استاد الکترونیک دانشگاه آزاد دزفول

مهندس مریم فریور – کارشناس ارشد الکترونیک- استاد دانشگاه فنی‌و حرفه‌ای و استادمدعو دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندس آزاد رحیمی – کارشناس ارشد برق قدرت- عضو هیئت علمی دانشگاه فنی و حرفه ای سنندج

مهندس مهسا سرائی – کارشناس ارشد برق مخابرات

مهندس علی کمالی- کارشناس ارشد برق قدرت – کارشناس پژوهشکده خودرو محیط زیست دانشگاه تهران

مهندس آرام قادری – کارشناس ارشد برق الکترونیک

مهندس سیما نیک پرور - کارشناسی ارشد مکاترونیک – دانشگاه تبریز

درباره کهربا	۳
یادداشت مدیرمسئول	۴
آشنایی با مشاهیر	
مهندس تیمور لکستانی، پدر برق ایران	۵
مقالات	
برنامه‌ریزی بهینه شبکه‌های توزیع هوشمند در حضور منابع تجدیدپذیر، برنامه‌های پاسخگویی بار و ترکیبی از پیل سوختی و الکترولایزر به عنوان سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی مهرداد قهرمانی-دانشکده مهندسی برق تبریز	۷
حل مسئله فروشنده دوره‌گرد با استفاده از الگوریتم ژنتیک امین عباسی – دانشجوی کارشناسی مهندسی نرم افزار سیدامین حیدری – کارشناسی ارشد مهندسی نرم افزار مدیریت فناوری اطلاعات محمدحسین قاسمی – کارشناسی ارشد شبکه	۲۰
حسگر فیبر نوری بر اساس رزونانس پلاسمون سطح مهران کریمیان ریزی – دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی وحید رنجبر عین الدین – دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی محمد عادلی – دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی بیومکانیک حسیب بگلری- دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی افزاره‌های میکرونانو الکترونیک	۳۰
طراحی، ساخت و آزمون پایه‌های بتنی پیش‌تنیده H شکل شبکه توزیع علی اصغر ذکاوتی – گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو علیرضا رهنورد – گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو	۳۶
طراحی المان‌های فیلتر با استفاده از الگوریتم ژنتیک محمدحسین رضوانی – فارغ التحصیل دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول امین شیخ نجدی – استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول	۴۲
راه‌اندازی موتورهای تک‌فاز سیدپرویز موسوی – سازمان آموزش فنی و حرفه ای کشور – اداره کل استان همدان مریم فریور-سازمان آموزش فنی و حرفه ای کشور-اداره کل استان اصفهان	۵۳
ارتباط با کهربا	۵۶

درباره کهربا

مجله الکترونیکی کهربا، باهمت و تلاش جمعی از دانشجویان و مهندسین برق، بخصوص اعضای انجمن علمی و پژوهشی نواندیشان، در سال هزار و سیصد و نود شروع به کارکرد. کهربا از سال ۹۱ با کسب شماره بین‌المللی استاندارد مجلات (ISSN:۲۳۲۲-۳۷۲۳) و ثبت در سازمان اسناد و کتابخانه ملی ایران، به‌عنوان فصلنامه‌ای رسمی و تخصصی در حوزه صنعت برق شناخته‌شده است. این نشریه تخصصی در سال ۹۵ موفق به اخذ پروانه انتشار از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، با مجوز شماره ۷۷۸۲۱ و ثبت در سامانه جامع رسانه‌های کشور(e-rasaneh) و بانک اطلاعات نشریات کشور(magiran) گردید. در سال ۹۷ طی تفاهم‌نامه‌ای با بانک مقالات کشور (سیویلیکا) مورد حمایت این پایگاه قرارگرفته و مقالات ارائه‌شده به نشریه پس از انتشار در سیویلیکا نمایه شده و در نظام رتبه‌بندی دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

یادداشت مدیرمسئول

در دهمین تابستان از فعالیت نشریه کهربا و پس از انتشار سی‌و یک شماره از مجله مفتخریم با انتشار سی‌ودومین شماره از این نشریه در خدمت علاقه‌مندان این مجله تخصصی باشیم. تلاش ما از روز نخست، جمع‌آوری، تهیه و ارائه مطالبی ساده و کاربردی، درعین‌حال تخصصی، به قشر فرهیخته دانش‌پژوه و کسانی که مشتاق به دانستن علوم مهندسی برق و الکترونیک یا کامپیوتر هستند، بوده است. امید است با هدایت و راهنمایی شما هر شماره بهتر و پخته‌تر از شماره پیشین گردد. امید است که باهمت و همیاری دوستان بتوانیم قدمی هرچند کوچک، جهت جلب رضایت و بالا بردن سطح دانش شما برداریم؛ و روزبه‌روز شاهد پیشرفت و موفقیت‌های شما عزیزان باشیم.

آشنایی با مشاهیر



مهندس تیمور لکستانی، پدر برق ایران

تیمور لکستانی، در ۱۷ آبان‌ماه سال ۱۲۹۴ در روستای قره قیشلاق شهرستان سلماس آذربایجان به دنیا آمد. وی پس از اخذ دیپلم از دبیرستان فردوسی تبریز در سال ۱۳۱۳ به دانشکده فنی دانشگاه تهران راه یافت و در زمره ۱۰ نفر اول پذیرفته و با اخذ رتبه ممتاز فارغ‌التحصیل شد. وی که از شاگردان دانشمند فقید پروفسور محمود حسابی بود، جزو نخستین گروه مهندسان برق دانش‌آموخته دانشگاه تهران به شمار می‌رفت که پس از فراغت از تحصیل به صنعت برق کشور ملحق شد.

وی را به خاطر خدمات متعهدانه‌اش به صنعت برق کشور و نقش تأثیرگذار در توسعه شبکه برق تهران، «پدر برق ایران» لقب داده‌اند. در زمان ورود لکستانی به صنعت برق، کارخانه برق تهران در اختیار مهندسان چک بود و از آن‌جا که آن‌ها تمایلی برای انتقال دانش و تخصص برق به ایرانی‌ها نداشتند، لکستانی و همکارانش خود را متعهد به کسب این تجارب و تخصص کرده و با مطالعه پنهانی نقشه‌های مهندسان چک، امور حساس در اداره شبکه برق تهران را فرا گرفتند تا این که سرانجام همین تعهد و تلاش سبب شد تا چکی‌ها مجبور به ترک کارخانه برق شده و اداره کارخانه برق تهران بر عهده مهندسین داخلی قرار گیرد.

وی همچنین پس از انتصاب به ریاست شبکه برق تهران در سال ۱۳۲۶، در توسعه این شبکه نقش بسیار تأثیرگذاری داشت و تا سال ۱۳۴۵ با سمت‌های مختلف در زمینه تأمین روشنایی معابر و توسعه شبکه توزیع در تهران و شهرهای دیگر به میهن خدمت کرد.

خود درباره حضورش در دانشکده فنی می‌گوید:

آن موقع برای ادامه تحصیل چند مدرسه عالی وجود داشت. بعداً با افتتاح دانشکده فنی تعداد این مدارس به اندازه‌ای افزایش یافت که می‌شد به آن‌ها دانشگاه اطلاق کرد. من ابتدا می‌خواستم دانشکده پزشکی بروم. در آن موقع دوره تحصیل پزشکی را از چهار سال به ۶ سال تغییر داده بودند و دانشجویان هم در حال اعتصاب و اعتراض بودند. من هم چون کفالت خانواده را به عهده داشتم، مایل نبودم ۶ سال صرف پزشکی کنم. تصمیم گرفتم به دانشکده افسری بروم که در شهریور ۱۳۱۳ (روز پنجشنبه) آگهی تأسیس دانشکده فنی و دعوت برای کنکور آن چاپ شده بود. محل امتحان ورودی سالن دارالفنون بود. حدود ۵۰۰-۶۰۰ نفر در امتحان شرکت کرده بودند که بیشتر شاگرد اول‌های دبیرستان‌ها بودند. من شاگرد اول آذربایجان بودم ... در مجموع ۶۰ نفر پذیرفته شدیم.

تیمور جوان، در سال ۱۳۱۹ بعد از پایان خدمت به مدت هفت سال در کارخانه تولید برق تهران، واقع در میدان ژاله استخدام شد. دوران سخت کار در کارخانه تولید برق، تجربه مهمی برای مهندس لکستانی بود. مرد روشنایی شهر، در ادامه راه به ریاست شبکه توزیع برق تهران منصوب شد و تا سال ۱۳۴۵ با همکاری دوستانش، برق معابر شهر را تأمین کرد. وی برای ادامه تحصیل

www.kahrobaonline.ir

و کسب دانش روز به کشورهای، بلژیک، فرانسه و ژاپن سفر کرده است.

تأسیس دانشگاه صنعتی شریف

شاگرد مرحوم پروفسور محمود حسابی، در سال ۱۳۴۵ با همکاری دوستانش دانشگاه صنعت شریف (آریا مهر) را تأسیس کرد. زمانی که مسئول برق گیلان بود، دکتر مجتهدی از مؤسسان دانشگاه صنعتی شریف که هیچگاه مهندس لکستانی را ندیده بود به وی خبر می‌دهد که برای تأسیس دانشگاه صنعتی شریف، وی را به‌عنوان یکی از اعضای هیأت امنا معرفی کرده است. عضویت در هیأت امنا، رئیس عمومی، معاونت فنی و قائم مقام از مناصب وی در دانشگاه صنعتی شریف بود.

در سال ۱۳۸۶ کانون مهندسین فارغ‌التحصیل دانشکده فنی دانشگاه تهران وی را به عنوان مهندس برجسته معرفی نمود. وی همچنین پیشکسوت برگزیده در پنجمین جشنواره بانیان علم و صنعت برق ایران می‌باشد

www.kahrobaonline.ir

برنامه‌ریزی بهینه‌ی شبکه‌های توزیع هوشمند در حضور منابع تجدیدپذیر، برنامه‌های پاسخگویی بار وترکیبی از پیل سوختی و الکترولایزر به عنوان سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی

مهرداد قهرمانی[۱]

[۱] دانشکده مهندسی برق، تبریز، ایران، Mehrdad.ghahramani@yahoo.com

چکیده : حضور منابع تولید پراکنده‌ی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و همچنین بارهای متناوب از اصلی‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های توزیع برق آینده خواهد بود. با توجه به ماهیت دارای عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای متناوب، اپراتور شبکه‌ی توزیع به یک برنامه‌ریزی بهینه بمنظور تامین اقتصادی، قابل اطمینان و پایدار انرژی الکتریکی نیازمند می‌باشد که در برابر تغییرات پارمترهای غیر قطعی ورودی مانند باد و بار مقاوم باشد. در این مقاله یک روش بهینه سازی مقاوم برمبنای برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) ارائه‌شده است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌ی روز-بعد شبکه‌ی توزیع در حضور برنامه‌های پاسخگویی بار و منابع تولید تجدیدپذیر (توربین بادی و سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی) و تجدیدناپذیر (دیزل ژنراتور) می‌باشد. روش ارائه شده تمامی قیود تکنیکی شبکه و دیزل ژنراتورها و سیستم ذخیره انرژی مورد استفاده را در نظر می‌گیرد. به منظور مدلسازی هرچه بهتر شبکه‌های توزیع برق آینده و همچنین نشان دادن کارایی روش بهینه‌سازی ارائه‌شده، یک شبکه تست ۳۳ باسه IEEE مورد استفاده قرار گرفته است که شامل ۴ دیزل ژنراتور، ۳ توربین بادی، ۲ بار صنعتی بزرگ، ۲ تامین کننده‌ی برنامه‌های پاسخگویی بار و ۱ سیستم‌ترکیبی پیل سوختی و الکترولایزر بعنوان سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی می‌باشد. برنامه‌ریزی ارائه‌شده میزان بهینه‌ی تبادل با شبکه‌ی بالادست، میزان تولید هرکدام از واحدهای تولید پراکنده و نحوه‌ی مشارکت برنامه‌های پاسخگویی بار را تعیین می‌کند. همچین یک برنامه ریزی بهینه برای شارژ و دشارژ سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی ارائه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: *شبکه‌ی توزیع هوشمند، برنامه‌ریزی روز-بعد، تولید پراکنده، توربین بادی، سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی، برنامه‌های پاسخگویی بار.*

۱. مقدمه

رشد روز افزون مصرف جهانی انرژی و مشکلات زیست محیطی ناشی از افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به حرکت بیش از پیش به سمت استفاده از منابع انرژی پاک شده است [۱]. از طرف دیگر پیشرفت تکنولوژی و مقرون به صرفه‌تر شدن استفاده از منابع تولید انرژی بی‌کربن حرکت به سمت استفاده از این تکنولوژی‌ها را سرعت بخشیده است [۲]. از میان منابع انرژی تجدیدپذیر انرژی بادی و خورشیدی با توجه به ماهیت غیرقطعی و غیر قابل کنترل بودن بیش از سایر انواع انرژی توجه محققان را به خود جلب کرده است [۳-۵]. برنامه‌های پاسخگویی بار نیز اگرچه موضوع جدیدی نیست اما با توجه به حرکت شبکه‌های قدرت به سمت هوشمند شدن به خصوص در سطح توزیع امکان استفاده از پتانسیل این برنامه‌ها و شرکت مشترکین در تامین بخشی از بار مورد نیاز شبکه، بیش از پیش فراهم شده است [۶].

۱,۱. تعریف مسئله

حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای متناوب با توجه به عدم قطعیتی که به همراه دارند منجر به ایجاد پیچیدگی و چالش‌هایی

در برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌های توزیع آینده شده است. به عنوان مثال توربین های بادی، پنل های خورشیدی و بارهای متناوب به دلیل ماهیت عدم قطعیت و غیر قابل کنترل بودن باعث ایجاد چالش هایی از قبیل از بین رفتن بالانس توان، کاهش قابلیت اطمینان و افزایش هزینه‌ی عملکرد شبکه‌ی توزیع برای اپراتور شبکه‌ی توزیع (DNO) می‌شوند. عملکرد صحیح و مداوم این شبکه‌ها در حضور منابع تولید تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار نیازمند برنامه‌ریزی‌ای می‌باشد که در کنار کاهش هزینه های عملکردی در برابر عدم قطعیت پارامترهای ورودی بخصوص مصرف بار و تولید توسط بادمقاوم باشد. برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌های توزیع در دسته‌ی برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت قرار می‌گیرد که بصورت ۲۴ ساعت قبل از اجرای برنامه میزان تولید واحدهای مختلف شامل توربین های بادی، دیزل ژنراتورها، سیستم‌های ذخیره‌کننده‌ی انرژی و میزان خرید از شبکه بالادست تعیین می‌شود.

۱،۲. مرور منابع

مطالعات انجام شده در زمینه‌ی برنامه‌ریزی بهینه‌ی روز-بعد شبکه های توزیع عمدتا به دو دسته‌ی مطالعات قطعی (deterministic) و مطالعات تصادفی (stochastic) تقسیم می‌شوند. در حوزه مطالعات قطعی، همه‌ی ورودی‌های مسئله بصورت پارامتر های معلوم به مدل وارد می‌شوند و خروجی ها برای یک دوره‌ی زمانی مشخص تعیین می‌شوند. بعنوان مثال در برنامه ریزی قطعی شبکه‌ی توزیع بدون در نظر گرفتن ماهیت احتمالاتی متغیرهای پیشبینی شده، رزرو مورد نیاز شبکه‌ی توزیع قبل از برنامه ریزی انرژی تعیین می‌شود [۱۱-۱۳]. در [۱۱] یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه‌شده است که در سطح اول بر خرید از بازار روز-بعد و در مدار قرار دادن واحدهای تولید پراکنده (DG) تمرکز شده است در حالی که توزیع زمان واقعی واحدهای DG، تعاملات با بازار زمان واقعی و قطع بار تصمیماتی هستند که در مرحله دوم چارچوب ارائه‌شده گرفته می‌شوند. مطالعه‌ی انجام شده در [۱۲] با در نظر گرفتن قیود شبکه، از یک الگوریتم پخش توان بهینه به منظور کمینه کردن هزینه‌ی کلی عملکرد شبکه‌ی توزیع استفاده کرده است. یک روش برمبنای منطق فازی به منظور برنامه‌ریزی شبکه‌ی توزیع در [۱۳] ارائه‌شده است که هدف آن کمینه کردن هزینه های عملکرد از یک طرف و کمینه کردن آلودگی‌های زیست محیطی از طرف دیگر است. اگرچه این مطالعات تصمیم گیرندگان را در کسب یک دیدگاه کلی نسبت به مسائل بهینه‌سازی یاری می‌دهند، اما نمی‌توانند عدم قطعیت موجود در اتخاذ تصمیمات استراتژیک در دنیای واقعی را نشان دهند. همچنین بدلیل عدم وجود روش های پیشبینی دقیق، روش بهینه سازی قطعی برای برنامه ریزی روز-بعد شبکه توزیع قابل قبول نیست. در مطالعات تصادفی ، پارامتر های غیر قطعی‌ای وجود دارند که مقدار آنها توسط توزیع‌های احتمالی مشخص قابل تخمین است و هدف کلی آنها بهینه‌سازی مقدار مورد انتظار یک تابع هدف می‌باشد. بعنوان مثال برنامه ریزی رزرو مورد نیاز شبکه توزیع درکنار برنامه ریزی روز-بعد انرژی مورد نیاز براساس سناریوهای احتمالاتی انجام می‌گیرد. در [۱۴] متغیرهای غیرقطعی مربوط به برنامه‌ریزی شبکه‌ی توزیع بوسیله‌ی توابع توزیع احتمالاتی مدل شده‌اند و برنامه‌ریزی رزرو در کنار برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع بر مبنای سناریوهای احتمالاتی انجام گرفته است. در [۱۵] مدل ارائه‌شده در [۱۱] توسعه‌یافته است بطوریکه هزینه مورد انتظار عملکرد شبکه‌ی توزیع کمینه شده و در کنار آن ریسک مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در مسئله در این مطالعه درنظرگرفته شده است. با این وجود مدل تصادفی ارائه شده در این مرجع بر برنامه‌ریزی انرژی بدون در نظرگرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر تمرکز کرده و ریسک مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در مسئله در یک سطح از پیش تعیین شده محدود شده است. نویسندگان [۱۶] یک مدل بهینه سازی تصادفی دو سطحی بمنظور برنامه‌ریزی انرژی و رزرو شبکه‌های توزیع هوشمند با هدف کمینه کردن هزینه‌های عملکردی مورد انتظار شبکه ارائه کرده اند. در مرجع [۱۷] یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی ریسک پایه برای برنامه‌ریزی شبکه‌ی

توزیع هوشمند ارائه‌شده است که دارای اهداف کمینه‌کردن هزینه عملکرد و مدیریت ریسک می‌باشد. مرجع [۱۸] یک مدل چند هدفه تصادفی برای برنامه ریزی بهینه شبکه‌های توزیع ارائه کرده است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌ی عملکرد و آلودگی های زیست محیطی است. همچنین در این مطالعه پاسخگویی طرف مصرف کننده نیز بعنوان یکی از منابع تامین کننده‌ی انرژی در نظر گرفته شده است. میزان دقت و بهینه بودن روش های تصادفی به دقت توزیع احتمالاتی متغیرهای غیرقطعی و تعداد سناریوهایی که در طول مسئله بهینه سازی در نظرگرفته شده، بستگی دارد. عدم وجود داده‌های تاریخی کافی منجر به یک توزیع احتمالاتی غیردقیق از متغیرهای تصادفی و در نتیجه منجر به نتایج غلط خواهد شد. بعلاوه با افزایش تعداد سناریو ها پیچیدگی‌های محاسباتی مسئله بهینه سازی بشدت افزایش می‌یابد.

۱,۳. نوآوری‌ها و کارهای انجام گرفته در این مقاله

با توجه به اطلاعات نویسندگان تا به حال تاثیر سیستم ذخیره کننده‌ی هیدروژنی در برنامه ریزی بهینه‌ی روز-بعد شبکه‌های توزیع در نظر گرفته نشده است. همچنین تاکنون از این سیستم در جهت بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع استفاده نشده است. این مقاله‌یک چارچوب بهینه سازی برمبنای مفاهیم روش بهینه سازی مقاوم ارائه می‌کند که می‌تواند مشکلات دو روش قطعی و تصادفی را در نظر بگیرد بطوریکه این روش، متغیرهای تصادفی را با توزیع نامشخص و به صورت آزاد از محدودیت مدل می‌کند که می‌تواند جواب های بهینه‌ای را بیابد که در مقابل بدترین شرایط عدم قطعیت ایمن باشد. در مقایسه با بهینه‌سازی تصادفی، روش ارائه‌شده چندین مزیت دارد. اول آنکه این روش تنها به مقادیر پیش‌بینی شده حد بالا و حد پایین متغیر های تصادفی نیاز دارد که بدست آوردنشان از داده‌های تاریخی راحت تر است. دوم، برخلاف روش‌های تصادفی که از تضمین‌های احتمالاتی برای ارضای قیود استفاده می‌کنند روش ارائه شده به دنبال جواب های بهینه‌ای است که در مقابل همه‌ی تغییرات متغیرهای تصادفی ایمن باشد. همچنین در این مقاله برنامه‌ریزی شبکه‌ی توزیع در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر بر مبنای بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط صورت گرفته است. مدل ارائه شده چگونگی عملکرد کوتاه مدت شبکه شامل میزان تبادل با شبکه‌ی بالادست، تولید منابع پراکنده شامل توربین‌های بادی، سیستم ذخیره کننده انرژی هیدروژنی و دیزل ژنراتورها و نحوه مشارکت بارهای پاسخگوی بار را به صورتی که هزینه‌ی عملکرد شبکه کمینه شود تعیین می‌کند. بعلاوه به منظور ارائه مدلی از شبکه‌های توزیع آینده، در شبکه‌ی ۳۳ باسه ارائه‌شده حضور دیزل ژنراتورها و منابع تولید پراکنده تجدید پذیر شامل توربین های بادی و یک‌ترکیبی از پیل سوختی و الکترولایزر بعنوان سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی و همچنین بارهای پاسخگو به قیمت برق در نظر گرفته شده است. اهداف روش ارائه‌شده این است که هزینه کلی شبکه توزیع هوشمند را با توجه به مقادیر پیش بینی شده تولید توسط باد و مصرف بار مینیمم کند مادامی‌که تضمین کند برنامه ریزی انرژی و رزرو روز بعد در حین تغییر متغیرهای غیرقطعی شبکه توزیع ارائه‌شده قابل اطمینان باقی بمانند. همچنین به منظور نشان دادن تاثیر حضور سیستم ذخیره کننده انرژی هیدروژنی در این مقاله دو حالت مختلف برای شبکه در نظر گرفته شده است که این دو حالت بصورت زیر است:

- **حالت اول**: در این حالت برنامه ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع بدون حضور سیستم ذخیره کننده‌ی انرژی هیدروژنی انجام گرفته و هزینه‌ی عملکرد سیستم گزارش شده است.
- **حالت دوم:** در این حالت برنامه ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع در حضور سیستم ذخیره کننده‌ی هیدروژنی انجام گرفته و هزینه‌ی عملکرد سیستم گزارش شده است.

۱,۴. ساختار مقاله

ادامه‌ی مقاله به این صورت است که در بخش ۲ مدلسازی ریاضی شامل تابع هدف و قیود مسئله ارائه شده است. روش بهینه سازی مقاوم که به منظور مدل سازی عدم ارائه شده در بخش ۳ تو ضیح

داده شده است. اطلاعات مربوط به شبکه‌ی نمونه در بخش ۴ ارائه شده ا ست. نتایج آماری و نمودارهای مربوط به د ستاوردهای مسئله در بخش ۵ ارائه‌شده است. یک جمع‌بندی از کار انجام شده در انتهای مقاله ارائه‌شده است.

۲.مدلسازی ریاضی

در این بخش یک فرمولاسیون ریاضی کامل از برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع هوشمند شامل تابع هدف و قیود مسئله ارائه‌شده است. همچنین مدلسازی مربوط به منابع تولید تجدیدپذیر شامل توربین‌های بادی، برنامه‌های پاسخگویی بار، سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی و شبکه‌ی توزیع در این بخش ارائه‌شده است.

۲,۱. تابع هدف

برنامه‌ریزی انرژی و رزرو مورد نیاز شبکه‌های توزیع توسط اپراتور مستقل سیستم و با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های عملکرد این شبکه در طول بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته صورت می‌گیرد.

$$\begin{aligned} Min: & \sum_{t=1}^{24}\{P_{grid}(t)\times p_g^E(t)\} \\ & +\sum_{j=1}^{N_{DG}}\{CE_{DG}(j,t)+CS_{DG}(j,t)+CR_{DG}(j,t)\} \\ & +\sum_{d=1}^{N_{DRP}}\{CE_{DRP}(d,t)+CR_{DRP}(d,t)\} \\ & +\sum_{i=1}^{N_{IL}}\{CE_{IL}(i,t)+CR_{IL}(i,t)\} \end{aligned} \quad (۱)$$

تابع هدف ارائه‌شده شامل ۴ قسمت است. قسمت اول هزینه‌های مربوط به تامین توان و مبادله با شبکه‌ی بالادست می‌باشد که به صورت حاصلضرب توان ساعتی خریداری شده از شبکه بالادست (P_{grid}) در قیمت ساعتی توان شبکه بالاد ست (p_g^E) مدل شده است. قسمت دوم مربوط به هزینه‌های واحدهای DG شامل هزینه‌ی عملکرد (CE_{DG})، هزینه‌ی شروع به کار (CS_{DG}) و هزینه‌ی رزرو تامین شده تو سط این واحدها (CR_{DG}) ا ست که در ادامه به ترتیب توسط معادلات (۶) و (۷) و (۹) معرفی شده‌اند. قسمت سوم مربوط به هزینه‌ِی مربوط به تامین‌کننده‌های برنامه‌های پاسخگویی بار (DRP) شامل هزینه‌ی تامین انرژی (CE_{DRP}) و هزینه‌ی تامین رزرو (CR_{DRP}) می‌باشد که به ترتیب توسط معادلات (۳۳) و (۳۶) معرفی شده‌اند. قسمت چهارم هزینه‌ی مربوط به شرکت بارهای صنعتی در برنامه‌های پا سخگویی بار شامل هزینه‌ی تامین انرژی (CE_{IL}) و هزینه‌ی تامین رزرو (CR_{IL}) تو سط این واحد ها می‌با شد که به ترتیب توسط معادلات (۳۸) و (۳۹) مدل شده‌اند. اندیس t=1,…,NT معرف زمان، اندیس j=1,…,NDG نشان دهنده‌ی واحدهای DG، اندیس d=1,…,NDRP مربوط به DRPها و اندیس i=1,…,NIL مربوط به بارهای صنعتی بزرگ است.

۲,۲. قیود

قیود مربوط به برنامه‌ریزی روز-بعد شبکه‌ی توزیع شامل قیود مساوی و نامساوی در این بخش آمده است.

[۱] قیود شبکه‌ی توزیع

به منظور اطمینان از عملکرد ایمن و صحیح شبکه‌ی توزیع قیود (۲) و (۳) در شبکه‌ی ارائه‌شده مد نظر قرار گرفته است. معادله‌ی (۲) تضمین می‌کند که ولتاژ در بازه‌ی قابل قبول باقی بماند. همچنین محدوده‌ی جریان فیدرها توسط معادله‌ی (۳) مد نظر قرارگرفته است.

$$V_{\min}(n)\le v(n,t)\le V_{\max}(n) \qquad \forall n,t \qquad (۲)$$

$$I(m,n,t)\le I_{\max}(m,n) \qquad \forall m,n,t \qquad (۳)$$

که $V_{\min}$ و $V_{\max}$ و v به ترتیب کمینه، بیشینه و مقدار ساعتی ولتاژ باس ها می باشند. همچنین $I_{\max}$ و I به ترتیب بیشینه جریان قابل تحمل و مقدار ساعتی جریان فیدر بین باس های m و n می باشد.

[۲] قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو

عملکرد قابل اطمینان شبکه‌های توزیع نیازمند تعادل مداوم بین توان تولید شده و بار مورد تقا ضا می‌با شد. به همین منظور قیود (۴) و (۵) جهت ایجاد تعادل بین توان اکتیو و راکتیو شبکه‌ی توزیع با بار مورد تقا ضای شبکه در هر باس n و در هر ساعت t

در نظر گرفته شده است [۱۸].

$$\begin{aligned}&P_L(n,t)-\sum_{j\in n}P_{DG}(j,t)-\sum_{w\in n}P_W(w,t)\\&-\sum_{b\in n}(\eta^d\times P_{Bd}(b,t)-\eta^c\times P_{Bc}(b,t))\\&=P^f(n,m,t)-r(n,m)\times I(n,m.t)^2\\&-\sum_{k\in(n,k)}P^f(n,k,t)\ ;\forall m,n,t\end{aligned}\qquad(۴)$$

$$\begin{aligned}&Q_L(n,t)-\sum_{j\in n}Q_{DG}(j,t)-\sum_{w\in n}Q_W(w,t)\\&-\sum_{b\in n}(\eta^d\times Q_{Bd}(b,t)-\eta^c\times Q_{Bc}(b,t))=\\&Q^f(n,m,t)-x(n,m)\times I(n,m.t)^2\\&-\sum_{k\in(n,k)}Q^f(n,k,t)\ ;\forall m,n,t\end{aligned}\qquad(۵)$$

که P_L و Q_L توان اکتیو و راکتیو ساعتی بار هر باس، P_{DG} و Q_{DG} توان اکتیو و راکتیو ساعتی هر واحد DG، P_W و Q_W توان اکتیو و راکتیو تولیدی هر توربین بادی، P_{Bd} و Q_{Bd} توان اکتیو و راکتیو دشارژ شده توسط پیل سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی می باشد.

[۳] قیود واحدهای DG

در این قسمت قیود مربوط به عملکرد واحدهای DG به طور کامل آورده شده است [۱۹]. هزینه‌ی عملکرد واحدهای DG غیر تجدیدپذیر بصورت تابعی از توان تولیدی آن مطابق معادله‌ی (۶) مدل می‌شود.

$$\begin{aligned}&CE_{DG}(j,t)=a_j\times u(j,t)\\&+b_j\times P_{DG}(j,t)+C_j\times {P_{DG}}^2(j,t)\end{aligned}\qquad\forall j,t\qquad(۶)$$

هزینه‌ی شروع به کار واحد DG توسط معادله‌ی (۷) مدل شده است.

$$\begin{aligned}&CS_{DG}(j,t)=\\&SUC(j)\times(u(j,t)-u(j,t-1));\forall j,t\end{aligned}\qquad(۷)$$

$$CS_{DG}(j,t)\ge 0;\forall j,t\qquad(۸)$$

هزینه‌ی رزرو به صورت ۲۰ درصد بیشینه‌ی هزینه‌ی حدی تولید واحد DG در نظر گرفته شده است. بنابراین هزینه‌ی رزرو برنامه‌ریزی شده‌ی واحد DG توسط معادله‌ی (۹) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}&CR_{DG}(j,t)=0.2\\&\times(b_j+2\times c_j\times {P_{DG}}^{\max}(j,t))\end{aligned}\qquad\forall j,t\qquad(۹)$$

قیود (۱۰) و (۱۱) تضمین می‌کند که نقطه‌ی عملکرد واحد DG شامل توان تولیدی و رزرو تامین شده، محدودیت‌های فنی شامل کمینه و بیشینه‌ی توان تولیدی را مد نظر قرار می‌دهد.

$$\begin{aligned}&{P_{DG}}^{\min}(j)\times u(j,t)\le P_{DG}(j,t)\\&\le {P_{DG}}^{\max}(j)\times u(j,t)\end{aligned}\qquad\forall j,t\qquad(۱۰)$$

$$P_{DG}(j,t)+R_{DG}(j,t)\le {P_{DG}}^{\max}(j)\times u(j,t)\qquad\forall j,t\qquad(۱۱)$$

میزان افزایش و یا کاهش توان تولیدی توسط واحدهای DG در طول هر واحد زمانی از یک مقدار مشخص نمی‌تواند بیشتر باشد. معادلات (۱۲) و (۱۳) نرخ افزایش و کاهش تولید واحد DG را محدود می‌کند.

$$\begin{aligned}&P_{DG}(j,t)-P_{DG}(j,t-1)\le UR(j)\\&\times(1-y(j,t))+{P_{DG}}^{\min}(j)\times y(j,t)\end{aligned}\qquad\forall j,t\qquad(۱۲)$$

$$\begin{aligned}&P_{DG}(j,t-1)-P_{DG}(j,t)\le DR(j)\\&\times(1-z(j,t))+{P_{DG}}^{\min}(j)\times z(j,t)\end{aligned}\qquad\forall j,t\qquad(۱۳)$$

هر واحد DG بعد از روشن شدن باید به مدت چند ساعت روشن بماند. همچنین هر واحد DG بعد از خاموش شدن باید مدت زمان مشخصی خاموش بماند. قیود (۱۴) و (۱۵) مربوط به کمینه زمان روشن بودن و خاموش بودن واحدهای DG است.

$$\sum_{h=t}^{t+UT(j)-1}u(j,h)\ge UT(j)\times y(j,t)\qquad\forall j,t\qquad(۱۴)$$

$$\sum_{h=t}^{t+DT(j)-1}(1-u(j,h)\ge DT(j)\times z(j,t)\qquad\forall j,t\qquad(۱۵)$$

[۴] مدل سازی توربین بادی

پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی منجر به کاهش هزینه‌ی تولید انرژی توسط مولدهای بادی شده است و این تکنولوژی قابلیت رقابت با سایر انرژی‌ها را یافته است. معادله‌ی (۱۶) میزان توان تولیدی توسط توربین بادی را بسته به سرعت‌های مختلف باد محاسبه می‌کند [۲۱].

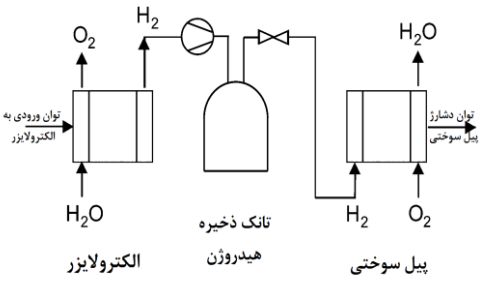
$$P_w(v)=\begin{cases} P_r\times\dfrac{(v-v_{ci})}{(v_r-v_{ci})} & v_{ci}\le v\le v_r \\ P_r & v_r\le v\le v_{co} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۱۶)$$

در این معادله V سرعت لحظه‌ای باد، Vci سرعت cut-in ، Vco سرعت cut-out و Vr سرعت rated توربین بادی است.

- سرعت cut-in: حداقل سرعت باد که بعد از آن توربین بادی شروع به تولید برق می‌کند.
- سرعت cut-out: حداکثر سرعتی که بعد از آن برای حفاظت ایمنی توربین و جلوگیری از واژگونی آن حرکت توربین متوقف می‌شود.
- سرعت rated : متوسط سرعت باد که اگر با آن سرعت باد به توربین بوزد، توان تولید شده توان نامی‌توربین خواهد بود.

۲،۳. مدلسازی سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی

فرض شده است که وظیفه کنترل سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی برعهده DNO است تا به این وسیله انعطاف پذیری بیشتری در تامین انرژی مورد نیاز شبکه داشته باشیم.



شکل ۱: سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی

این سیستم شامل بخش‌های الکترولایزر، تانکر ذخیره‌کننده هیدروژن و پیل سوختی می‌باشد. در ساعت‌های غیرپیک که قیمت شبکه بالادست پایین است انرژی مورد نیاز الکترولایزر برای تولید هیدروژن از شبکه‌ی بالادست تامین می‌شود. هیدروژن تولید شده در درون تانکر هیدروژن ذخیره می‌شود و بعدا در ساعت‌های پیک که قیمت برق بالاست توسط پیل سوختی به برق تبدیل می‌شود. قیود فنی سیستم ذخیره هیدروژن توسط معدلات (۱۷) تا (۲۹) ارائه‌شده است.

قیود (۱۷) و (۱۸) کمینه و بیشینه توان مصرفی توسط الکترولایزر را محدود می‌کند. همچنین بیشینه هیدروژن تولیدی توسط معادله (۱۹) محدود می شود. معادله (۲۰) هیدروژن تولید شده را به صورت تابعی از توان مصرفی الکترولایزر نشان می‌دهد.

$$P_{t,s}^{EL}\leqslant P_{\max}^{EL}\times U_{t,s}^{EL} \quad (۱۷)$$

$$P_{t,s}^{EL}\geqslant P_{\min}^{EL}\times U_{t,s}^{EL} \quad (۱۸)$$

$$N_{\mathrm{H2},t,s}^{EL}\leqslant N_{\mathrm{H2},\max}^{EL}\times U_{t,s}^{EL} \quad (۱۹)$$

$$N_{\mathrm{H2},t,s}^{EL}=\frac{\eta^{EL}P_{t,s}^{EL}}{LHV_{\mathrm{H2}}} \quad (۲۰)$$

مقدار اولیه‌ی فشار تانک هیدروژن و مقادیر بیشینه و کمینه آن به‌ترتیب توسط معادلات (۲۱) تا (۲۳) نشان داده شده است.

$$P_{t0}^{\mathrm{H2}}=P_{initial}^{\mathrm{H2}} \quad (۲۱)$$

$$P_{t,s}^{\mathrm{H2}}\leqslant P_{\max}^{\mathrm{H2}} \quad (۲۲)$$

$$P_{t,s}^{\mathrm{H2}}\geqslant P_{\min}^{\mathrm{H2}} \quad (۲۳)$$

در حالت پیل سوختی هیدروژن ذخیره شده در تانک هیدروژن صرف تولید توان در ساعت‌های پیک می‌شود. معادله (۲۴) ماکزیمم هیدروژن مصرفی پیل سوختی را محدود می‌کند. معادله (۲۵) نشان می‌دهد که هیدروژن مصرفی پیل سوختی تابعی از توان تولیدی آن است. کمینه و بیشینه توان تولیدی پیل سوختی توسط معادلات (۲۶) و (۲۷) تعیین می‌شود.

$$N^{FC}_{\mathrm{H2},t,s} \leqslant N^{FC}_{\mathrm{H2,max}} \times U^{FC}_{t,s} \quad (۲۴)$$

$$N^{FC}_{\mathrm{H2},t,s} = \frac{P^{FC}_{t,s}}{\eta^{FC} LHV_{\mathrm{H2}}} \quad (۲۵)$$

$$P^{FC}_{t,s} \leqslant P^{FC}_{\max} \times U^{FC}_{t,s} \quad (۲۶)$$

$$P^{FC}_{t,s} \geqslant P^{FC}_{\min} \times U^{FC}_{t,s} \quad (۲۷)$$

باید توجه شود که در سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی، الکترولایزر و پیل سوختی نمی‌توانند بطور همزمان کار کنند. بعبارت دیگر این سیستم باید در هر زمان در یکی از حالت‌های مصرف توان توسط الکترولایزر (شارژ) و یا تولید توان توسط پیل سوختی (د شارژ) با شد که توسط متغیرهای باینری معادله (۲۸) مدل شده است. در انتها، سطح فشار هر ساعت سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی توسط معادله (۲۹) تعیین می‌شود.

$$U^{EL}_{t,s} + U^{FC}_{t,s} \leqslant 1 \quad (۲۸)$$

$$P^{\mathrm{H2}}_{t,s} = P^{\mathrm{H2}}_{t-1,s} + \frac{\Re T_{\mathrm{H2}}}{V_{\mathrm{H2}}} \left(N^{EL}_{\mathrm{H2},t,s} - N^{FC}_{\mathrm{H2},t,s} \right) \quad (۲۹)$$

۲,۴. مدل سازی برنامه‌های پاسخگویی بار

برنامه‌های پاسخگویی بار به تعریف کمیته‌ی فدرال قانون گذاری انرژی آمریکا (FERC) به برنامه‌هایی اطلاق می‌شود که تغییر قیمت انرژی منجر به تغییر میزان و یا نحوه‌ی مصرف مشترکین و انتقال این مصرف از ساعت‌های پیک (قیمت بالا) به ساعت‌های غیر پیک (قیمت پایین) می‌شود [۷]. در این مقاله DRP ها با هدف ایجاد امکان مشارکت برای مصرف کنندگان کوچک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شرکت‌های DRP امکان مشارکت مشتریان را بررسی می‌کنند و بعد از جمع و یکپارچه کردن پاسخ‌های مشترکین امکان ارتباط این مصرف کنندگان را با بازار عمده فروشی فراهم می‌کنند. هزینه‌ی مربوط به قراردادهای منعقد شده بین DRP ها و مشتریان توسط معادلات (۳۰) تا (۳۳) مدلسازی شده است.

$$O^{d}_{\min} \leq o^{d}_{1} \leq O^{d}_{1} \quad (۳۰)$$

$$0 \leq o^{d}_{k} \leq (O^{d}_{k+1} - O^{d}_{k}) \forall k = 2,3,\ldots,k \quad (۳۱)$$

$$P^{DA}_{DRP}(d,t) = \sum_{k} o^{d}_{k} \quad (۳۲)$$

$$CE_{DRP}(d,t) = \sum_{k} \pi^{d}_{k} \times o^{d}_{k} \quad (۳۳)$$

مقدار کاهش بار پذیرفته نشده توسط DRP ها می‌تواند بعنوان رزرو مورد استفاده قرار گیرد. طبق معادله‌ی (۳۴) مقدار انرژی و رزرو برنامه‌ریزی شده از طریق کاهش بار باید به حداکثر پیشنهاد DRP محدود شود. هزینه‌ی مربوط به ظرفیت رزرو از طریق معادله‌ی (۳۵) محاسبه می‌شود.

$$P_{DRP}(d,t) + R_{DRP}(d,t) \leq P^{\max}{}_{DRP}(d,t) \quad (۳۴)$$

$$CR_{DRP}(d,t) = R_{DRP}(d,t) \times KR_{DRP}(d,t) \quad (۳۵)$$

همچنین بارهای انفرادی بزرگ مانند بارهای صنعتی (ILs) می‌توانند در برنامه‌ریزی انرژی و رزرو شبکه‌های توزیع شرکت کنند. محدوده‌ی برنامه‌ریزی تامین توان و رزرو از طریق IL ها از معادله‌ی (۳۶) و هزینه مربوط به انرژی و رزرو از معادله‌های (۳۷) و (۳۸) بدست می‌آید.

$$P_{IL}(i,t) + R_{IL}(i,t) \leq P^{\max}{}_{IL}(i,t) \quad (۳۶)$$

$$CE_{IL}(i,t) = P_{IL}(i,t) \times KE_{IL}(i,t) \quad (۳۷)$$

$$CR_{IL}(i,t) = P^{R}_{IL}(i,t) \times KR_{IL}(i,t) \quad (۳۸)$$

۳.روش ارائه‌شده

روش مقاوم یک روش جدید برای بهینه‌سازی مسائلی است که با عدم قطعیت مربوط به پارامترهای ورودی مواجه هستند. این روش بویژه برای مسائلی مناسب است که اطلاعات کاملی از ماهیت عدم قطعیت در دست نیست. ایده‌ی اولیه در بهینه‌سازی مقاوم، در نظر گرفتن بدترین سناریوی ممکن و بهینه‌سازی بر اساس بدترین سناریو است. به عنوان مثال فرض می‌شود که ممکن است ضرایب یکی از قیود مسئله تغییر کند. در بهینه‌سازی مقاوم، بدترین حالتی که ممکن است برای آن محدودیت با توجه به تغییر ضرایب پیش بیاید در نظر گرفته شده و طبق آن بهینه‌سازی انجام می‌شود در نتیجه تصمیمات گرفته شده در بدترین حالت عدم قطعیت پارامترها بهینه باقی می‌ماند.

۳,۱. روش بهینه‌سازی مقاوم

تابعی بصورت $z = f(X, y)$ را در نظر بگیرید که در X خطی و در y غیر خطی است. مقادیر X دارای عدم قطعیت و مقادیر y معلوم است. در بهینه‌سازی مقاوم فرض شده است که تابع توزیع احتمال خاصی از متغیر X در دست نیست. عدم

قطعیت X توسط یک بازه‌ی $X \in U(X)$ مدل می‌شود که X مقادیر خود را از بازه‌ی $U(X)$ می‌گیرد. کمینه کردن $z = f(X, y)$ توسط معادلات (۳۹) تا (۴۱) فرموله می‌شود.

$$\max_{y} z = f(X, y) \quad ; \; X \in U(X) \tag{۳۹}$$

با توجه به خطی بودن z نسبت به X معادله بصورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\max_{y} z \tag{۴۰}$$

$$s.t \begin{Bmatrix} z \le f(\hat{X}, y) \\ h(\hat{X}, y) = A(y) * \hat{X} + g(y) \\ \hat{X} \in U(X) = \left\{ X \;\middle\|\; X - \overline{X} \right| \le \hat{X} \} \end{Bmatrix} \tag{۴۱}$$

که $\hat{X}, \overline{X}, \tilde{X}$ به‌ترتیب مقدار غیرقطعی، مقدار پیشبینی شده و ماکزیمم مقدار تغییرات متغیر X از $\overline{X}$ می‌باشد. روش بهینه سازی مقاوم نه تنها راه حلی را جست و جو می‌کند که تابع هدف مسئله را برقرار کند بلکه تضمین می‌کند که در صورت وجود خطا در مقادیر پیش بینی شده‌ی متغیر X تابع هدف با یک احتمال بسیار بالایی بهینه باقی می‌ماند. به همین منظور یک همتای مقاوم از مسئله ساخته و حل شده است. همتای مقاوم (۴۰) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\max_{y} z \tag{۴۲}$$

$$z \le f(X, y) \tag{۴۳}$$

$$\begin{Bmatrix} \sum_i W_i \le \Gamma \\ 0 \le W_i \le 1 \\ f(X, y) = A(y) * \overline{X} + g(y) - \max_{w_i} \sum_i a_i(y) * \overline{X}_i * W_i \end{Bmatrix} \tag{۴۴}$$

برمبنای معادله (۴۳) دو مسئله بهینه‌سازی تودرتو باید حل شود. معادله (۴۴) بر مبنای w_i خطی است و فرم دوگان آن به صورت زیر است:

$$\min \left[\Gamma \beta + \sum_i \xi_i \right]$$

$$\beta + \xi_i \ge a_i(y) * \hat{x}_i \tag{۴۵}$$

با جایگذاری (۴۵) در (۴۴) داریم:

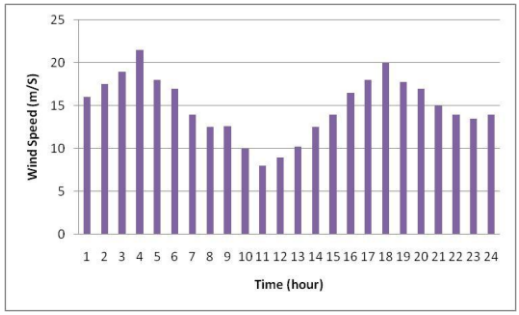
$$\max_{y, \beta, \xi_i} z \tag{۴۶}$$

$$z \le f(X, y) \tag{۴۷}$$

$$\begin{Bmatrix} f(X, y) = A(y) * \overline{X} + g(y) - \Gamma \beta - \sum_i \xi_i \\ \beta + \xi_i \ge A(y) * \overline{X}_i \end{Bmatrix} \tag{۴۸}$$

۴. شبکه مورد مطالعه و داده‌های ورودی مسئله

در این مقاله‌یک شبکه‌ی ۳۳ باسه‌ی استاندارد IEEE به منظور بررسی اثر بخشی روش ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل از [۲۳]، واحدهای DG به باس‌های مناسب متصل شده اند. سه توربین بادی در این شبکه مورد استفاده قرار گرفته که به باس‌های ۱۳، ۱۵ و ۳۰ متصل شده‌اند. اطلاعات مربوط به توربین‌های بادی مورد استفاده از [۲۴] گرفته شده است. توان نامی‌این توربین‌های بادی برابر ۳ مگاوات و سرعت cut-in، cut-out و rated این توربین‌ها به‌ترتیب برابر ۳، ۲۵ و۱۳ متر بر ثانیه می‌باشد. پیشبینی سرعت باد در طول ۲۴ ساعت پیش‌رو در شکل ۲ آورده شده است [۲۵]



شکل ۲ : سرعت باد پیشبینی شده برای ۲۴ ساعت پیش‌رو

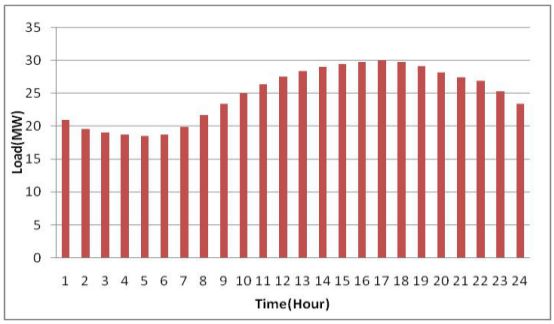
همچنین در شبکه‌ی نمونه‌ی ارائه شده چهار دیزل ژنراتور موجود می‌باشد که به باس‌های ۷، ۱۲، ۱۵و ۲۴ متصل شده اند. ضرایب مربوط به هزینه‌ی عملکرد این ژنراتور ها و اطلاعات مربوط به توان بیشـــینه و کمینه، نرخ افزایش و کاهش توان و کمینه زمان رو شن و خاموش بودن در جداول ۱ و ۲ آورده شده ا ست [۲۶]. همچنین پیشـــبینی بار ســاعتی در طول ۲۴ ســاعت پیش‌رو در شکل ۳ آورده شده است [۲۷] همچنین شبکه‌ی ۳۳ باسه مورد مطالعه در شکل ۴آمده است [۲۸].

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ضرایب هزینه ژنراتورها

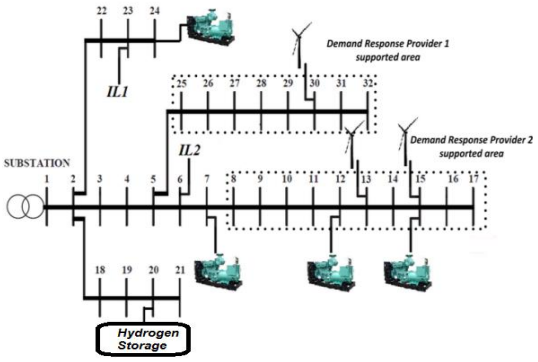
ضرایب هزینه			
واحدها	a_i ($)	b_i ($/MWh)	c_i ($/MWh^2)
DG1	۲۷	۸۷	۰,۰۰۲۵
DG2	۲۵	۸۷	۰,۰۰۳۵
DG3	۲۸	۹۲	۰,۰۰۳۵
DG4	۲۶	۸۱	۰,۱۸۴

جدول ۲: اطلاعات مربوط به داده‌های فنی دیزل ژنراتورها

داده‌های فنی					
واحدها	SUT ($)	MUT/MDT (h)	RU/ RD (MW/h)	Pmax (MW)	Pmin (MW)
DG1	۱۵	۲	۱,۸	۳,۵	۱
DG2	۲۵	۱	۱,۵	۳	۰,۷۵
DG3	۲۸	۱	۱,۵	۳	۰,۷۵
DG4	۲۶	۲	۱,۸	۴,۱	۱

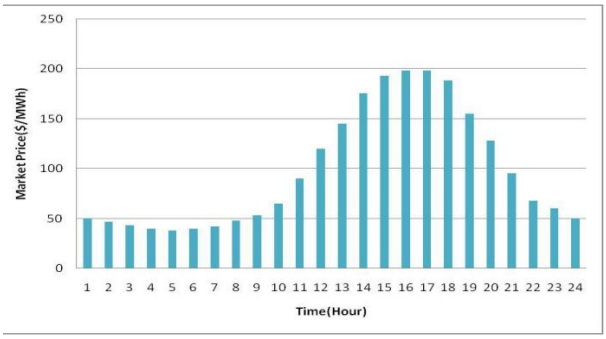


شکل۳ : بار ساعتی پیشبینی شده برای ۲۴ ساعت پیش‌رو



شکل۴ : شبکه ۳۳ باسه مورد مطالعه

همچنین پیشـــبینی ســاعتی قیمت برق بازار عمده فروشـی برای ۲۴ ساعت پیش‌رو طبق شکل ۵ فرض شده است.



شکل۵ : قیمت پیشبینی شده‌ی شبکه بالادست در ۲۴ ساعت پیش‌رو

اطلاعات مربوط به ســیســتم ذخیره‌کننده‌ی انرژی هیدروژنی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: اطلاعات سیستم ذخیره کننده انرژی

پارامترها	مقادیر	واحد
P^{H2}_{max} ، P^{H2}_{min}	۱۳،۸ ، ۲	Bar
$P^{H2}_{initial}$ ، P^{H2}_{t0}	۱۰ ، ۱۰	Bar
P^{EL}_{max} ، P^{EL}_{min}	۰ ،۰،۵ ۲،۵	MW
$N^{EL}_{H2,max}$ ، $N^{FC}_{H2,max}$	۰ ،۳،۹ ۱،۰۵	Nm^3/h
η^{EL} ، η^{FC}	۵۵ ، ۴۵	%
N^{FC} ، N^{EL}	۰ ،۳۰۰ ۳۰۰	No.
P^{FC}_{max} ، P^{FC}_{min}	۰ ،۰،۵ ۲،۵	MW
LHV_{H2}	۲۴۰	MJ/Kmol
R	۸،۳۱۴	J/Kmol
T_{H2}	۳۱۳	K
V_{H2}	۴	m^3

نتایج حاصل از شبیه سازی مسئله

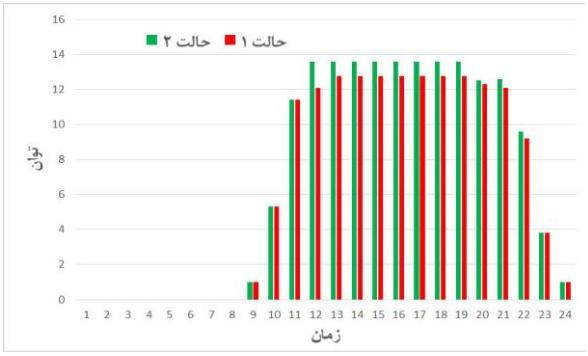
مدل ارائه‌شـــده یک برنامه‌ریزی بهینه برای انرژی و رزرو منابع تولید پراکنده‌ی موجود در شبکه‌ی توزیع و برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه می‌دهد.

- حالت اول (عدم حضور سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی):

با توجه به نتایج بدســـت آمده، در ســـاعت‌هایی که قیمت انرژی شـــبکه بالادســـت بیشـــتر از هزینه‌ی واحدهای DG اســـت این واحدها شـــروع به تولید انرژی می‌کنند و میزان خرید توان از شبکه بالادست کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به این نکته که توربین‌های بادی بدون هزینه درنظر گرفته شـــده‌اند با در نظر گرفتن شـــرایط باد، همواره در حداکثر توان قابل تولید خود کار می‌کنند. همچنین، برنامه‌های پاسخگویی بار نیز در ساعت‌هایی که قیمت برق خریداری شده بالاست به منظور کاهش خرید برق و در نتیجه کاهش هزینه‌های شبکه وارد مدار می‌شوند. همچنین در این حالت رزرو مورد نیاز شـــبکه از طریق واحدهای DG، برنامه‌های پاســـخگویی بار تامین می شـــود در نتیجه در بعضـــی ســـاعت ها که قیمت شـــبکه بالاتر از واحد هایDG اســـت و این واحدها می توانند با فروش برق به مصـــرف کنندگان و کاهش خرید از شـــبکه‌ی بالادســـت هزینه‌های شـــبکه را کاهش دهند به دلیل تامین رزرو مورد نیاز شـــبکه این فرصـــت را از دســـت می دهند.

- حالت دوم (در حضور سیستم ذخیره‌ی انرژی هیدروژنی):

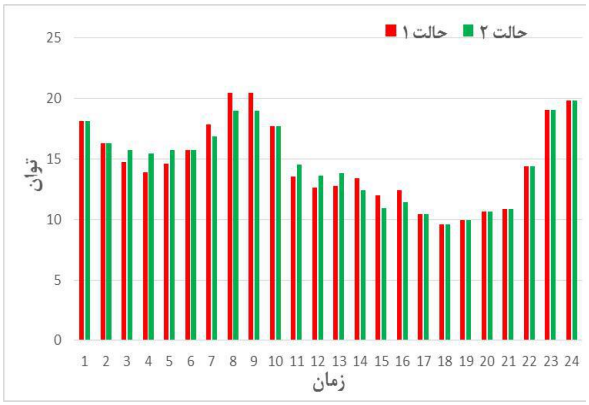
در حالت حضـــور ســـیســـتم ذخیره کننده‌ی انرژی هیدروژنی، این سیستم در ساعت هایی که قیمت برق شبکه بالادست پایین است شروع به ذخیره انرژی می کند و در ساعت هایی که قیمت شبکه بالادست بالا ست انرژی ذخیره شده را به شبکه باز می فرستد و در نتیجه توان خریداری از شـــبکه بالادســـت کاهش می یابد که منجر به کاهش هزینه می شود. همچنین حضور این سیستم و شـــرکت آن در تامین رزرو مورد نیاز شـــبکه منجر به آزاد شـــدن ظرفیت واحد های DG و در نتیجه ایجاد امکان شرکت این واحد ها در تامین انرژی مورد نیاز شـــبکه می شـــود که این مورد نیز هزینه‌های عملکردی شـــبکه‌ی توزیع مورد مطالعه را کاهش می دهد. در شـــکل ۶ مشـــاهده می شـــود که قســـمتی از ظرفیت واحدهای DG که مربوط به تامین رزرو بود آزاد شـــده و این واحدها در ساعات پیک توان بیشتری تولید می کنند.



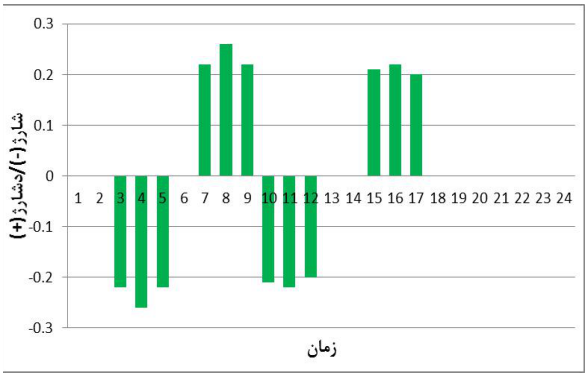
شکل ۶ : برنامه‌ریزی انرژی واحدهای دیزل ژنراتور

همچنین در شکل ۷ و ۸ مشاهده می شود که با حضور سیستم ذخیره کننده انرژی هیدروژنی در ســـاعت های ۳ و ۴ و ۵ نیمه شب که مصرف توان بسیار پایین است و به تبع آن قیمت شبکه بالادست پایین است سیستم ذخیره کننده انرژی شارژ می شود و در ســـاعت های اولیه صـــبح یعنی ۷ و ۸ و ۹ که با ؛آغاز فعالیت ادارات و مدارس و صـــنایع مصـــرف افزایش می یابد توان ذخیره

شده د شارژ می شود تا توان خریداری شده از شبکه بالاد ست کاهش بیابد. همچنین در ادامه‌ی طول روز در ساعت های ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی شروع به شارژ می کند تا در ساعت های پیک مصرف برق یعنی ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ با دشارژ انرژی خرید از شبکه بالادست را کاهش دهد و به این صورت هزینه‌های شبکه را کاهش دهد.



شکل ۷: توان خریداری شده از شبکه بالادست

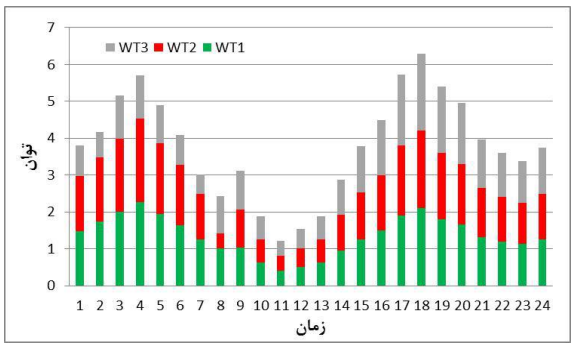


شکل ۸: برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی

با توجه به این نکته که در برنامه ریزی کوتاه مدت شبکه‌های برق توربین های بادی بدون هزینه در نظر گرفته می شوند. در نتیجه مطابق شکل ۹ در هردو حالت در نظر گرفته شده در مسئله توربین های بادی با حداکثر ظرفیت خود کار می کنند.

هزینه‌ی راه اندازی شبکه برای دو حالت در نظر گرفته شده برای شبکه در جدول ۴ آمده است.

مشاهده می شود که در نظر گرفتن سیستم ذخیره انرژی هیدروژنی هزینه‌های عملکرد شبکه‌ی توزیع را کاهش داده است.



شکل ۹: برنامه ریزی توان تولید شده در توربین بادی

جدول ۴: هزینه‌ی عملکرد شبکه در دو حالت در نظرگرفته شده

هزینه‌ی شبکه	حالت
۶۵۴۷۸ دلار	حالت ۱ (بدون سیستم ذخیره هیدروژنی)
۵۸۷۴۵ دلار	حالت ۲(با سیستم ذخیره هیدروژنی)

۵.جمع بندی

برنامه‌ریزی بهینه‌ی شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید تجدیدپذیر و برنامه‌های پا سخگویی بار، در سال های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این مقاله تاثیر کاربرد سیستم ذخیره کننده‌ی انرژی هیدروژنی در کنار حضور منابع تولیدپراکنده‌ی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار بر عملکرد بهینه‌ی شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک شبکه‌ی ۳۳ با سه‌ی بهبود یافته‌ی IEEE به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهاد شده مورد استفاده قرار گرفته ا ست. همچنین یک روش بهینه سازی مقاوم به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت های باد و بار در این مقاله مورد ا ستفاده قرار گرفته است که تضمین می کند نتایج بدست آمده برای برنامه ریزی شبکه توزیع در برابر بدترین شرایط عدم قطعیت بهینه باقی بماند. همچنین نتایج بد ست آمده ن شان می‌دهند که در ساعت‌هایی که قیمت بازار عمده فروشی بالا ست خرید از این بازار کاهش می‌یابد و سیستم ذخیره کننده‌ی انرژی هیدروژنی، منابع تولید پراکنده و برنامه‌های پاسخگویی بار برق مورد نیاز

شبکه را تامین می‌کنند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مدل ارائه شده قابلیت برنامه‌ریزی بهینه‌ی روز-بعد شبکه‌های توزیع را دارا می‌باشد. بعلاوه مشاهده می شود که کاربرد سیستم ذخیره کننده‌ی انرژی هیدروژنی هزینه‌ی عملکرد شـــبکه را کاهش می دهد.

منابع

[1] Saber, Ahmed Yousuf, and Ganesh Kumar Venayagamoorthy. "Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions." IEEE Transactions on Industrial Electronics 58.4 (2011): 1229-1238.

[2] Zhang, Ning, et al. "Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading." IEEE Transactions on Smart Grid 7.1 (2016): 420-427.

[3] Milligan, Michael, et al. "Alternatives No More: Wind and Solar Power Are Mainstays of a Clean, Reliable, Affordable Grid." IEEE Power and Energy Magazine 13.6 (2015): 78-87.

[4] Wandhare, Rupesh G., and Vivek Agarwal. "Novel integration of a PV-wind energy system with enhanced efficiency." IEEE Transactions on Power Electronics 30.7 (2015): 3638-3649.

[5] Liu, Cong, et al. "Fuzzy Energy and Reserve Co-optimization with High Penetration of Renewable Energy." IEEE Transactions on Sustainable Energy(2016).

[6] Alipour, Manijeh, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "Stochastic risk-constrained short-term scheduling of industrial cogeneration systems in the presence of demand response programs." Applied Energy 136 (2014): 393-404.

[7] Nojavan, Sayyad, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "Optimal bidding strategy of electricity retailers using robust optimisation approach considering time-of-use rate demand response programs under market price uncertainties." IET Generation, Transmission & Distribution 9.4 (2015): 328-338.

[8] Borghetti, Alberto, et al. "Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources." IEEE Systems Journal4.3 (2010): 313-322.

[9] Ghazvini, MA Fotouhi, Hugo Morais, and Zita Vale. "Coordination between mid-term maintenance outage decisions and short-term security-constrained scheduling in smart distribution systems." Applied energy 96 (2012): 281-291.

[10] Alipour, Manijeh, Kazem Zare, and Behnam Mohammadi-Ivatloo. "Short-term scheduling of combined heat and power generation units in the presence of demand response programs." Energy 71 (2014): 289-301.

[11] Algarni A.A.S, Bhattacharya K. A generic operations framework for Discos in retail electricity markets. IEEE Trans. Power Syst. 2009; 24(1): 356 -367.

[12] Cecati C, Citro C, Siano P. Smart operation of wind turbines and diesel generators according to economic criteria. IEEE Trans. Ind. Electron. 2011; 58(10):4514 -4525.

[13] Chakraborty S, Ito T, Senjyu T, Saber A.Y. Intelligent economic operation of smart-grid facilitating fuzzy advanced quantum evolutionary method. IEEE Trans. Sustainable Energy 589 2013; 4(4):905-916.

[14] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Stochastic operational scheduling of smart distribution system considering wind generation and demand response programs. Int. J. Elect. Power Energy Syst. 2014; 63:218-225.

[15] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. A stochastic framework for short-term 597 operation of a distribution company. IEEE Trans. Power Syst. 2013; 28(4):4712-4721.

[16] Nojavan, Sayyad, Mehdi Jalali, and Kazem Zare. "Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution systems using mixed integer nonlinear programming approach." Electric Power Systems Research 107 (2014): 119-124.

[17] Zakariazadeh, Alireza, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano. "Stochastic multi-objective operational planning of smart distribution systems considering demand response programs." Electric Power Systems Research 111 (2014): 156-168.

[18] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multi-objective mathematical programming approach. Int. J. Energy Convers. Manage. 2014; 78:151-164. 601

[19] Tan Y, Cao Y, Li C, Li Y, Zhou J, Song Y. A Two-Stage Stochastic Programming Approach Considering Risk Level for Distribution Networks Operation with Wind Power. IEEE Systems Journal 2014; to be published.

[20] Baran, Mesut E., and Felix F. Wu. "Optimal capacitor placement on radial distribution systems." IEEE Transactions on power Delivery 4.1 (1989): 725-734.

[21] Nojavan, Sayyad, and Habib allah Aalami. "Stochastic energy procurement of large electricity consumer considering photovoltaic, wind-turbine, micro-turbines, energy storage system in the presence of demand response program." Energy Conversion and Management 103 (2015): 1008-1018.

[22] Chen, S. X., Hoay Beng Gooi, and MingQiang Wang. "Sizing of energy storage for microgrids." IEEE Transactions on Smart Grid 3.1 (2012): 142-151.

[23] Wong, S., K. Bhattacharya, and J. D. Fuller. "Electric power distribution system design and planning in a deregulated environment." IET generation, transmission & distribution 3.12 (2009): 1061.

[24] Atwa, Y. M., et al. "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization." IEEE Transactions on Power Systems 25.1 (2010): 360-370.

[25] Willy Online Pty Ltd, online available at: <http://wind.willyweather.com.au/>.

[26] Diesel generators specification sheets, Kohler Power Systems Company, online available at: <http://www.yestramski.com/industrial/generatorsdiesel/industrial-diesel-generators-all.htm>.

[27] (2013, July. 18). New York Independent System Operator, online available at: http://www.nyiso.com/public/markets_operations/index.jsp.

[28] Ramos, Esther Romero, et al. "Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction." IEEE Transactions on power systems 20.2 (2005): 556-564.

حل مسئله فروشنده دوره‌گرد با استفاده از الگوریتم ژنتیک

امین عباسی[۱]

سید امین حیدری[۲]

محمدحسین قاسمی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی مهندسی نرم افزار، آموزشکده فنی و حرفه ای پسران شهرکرد، aminabbasi770 @gmail.com

[۲] کارشناسی ارشد مهندسی نرم مدیریت فناوری اطلاعات، آموزشکده فنی و حرفه ای پسران شهرکرد، am_saead1362 @yahoo.com

[۳] کارشناسی ارشد شبکه، آموزشکده فنی و حرفه ای پسران شهرکرد، m13t92 @gmail.com

چکیده: مساله فروشنده دوره‌گرد از نوع مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد. در تحقیق حاضر، مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد چندهدفه در نظر گرفته شده است. مسئله فروشنده دوره‌گرد چندهدفه تعمیم یافته‌ی مسئله فروشنده دوره‌گرد می‌باشد. در مسئله فروشنده چندهدفه، بیش از یک هدف مشخص می‌شود و برای این که به بهترین راه حل برسد، بهینه سازی می‌شود. مسئله‌ی فروشنده‌ی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. مسئله‌ی فروشنده‌ی چندهدفه امکان بهترین راه‌حل‌های بهینه‌ی پارتو را برای همه‌ی نمونه‌های داده‌ای که مورد آزمایش قرار گرفته، ارائه داد. الگوریتم ژنتیک، راه حل‌های نزدیک به بهینه را در دوره زمانی مناسبی تقریبا برای همه‌ی اهداف، تولید می‌کند. مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، با نمونه‌های گوناگون از مجموعه داده‌های کتابخانه‌ای محک استاندارد که در برگیرنده‌ی تعداد مختلفی از شهرها می‌باشد، در این کار مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که الگوریتم ژنتیک نزدیک‌ترین راه‌حل‌های بهینه به نمونه‌های مسئله را که از مجموعه مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد گرفته شده، را ارائه می‌دهد.

کلید واژه: *چندهدفه، مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی .*

۱. مقدمه

مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، یک مسئله چند جمله‌ای غیرقطعی و از نوع مسائل ان پی سخت[۱] می‌باشد. مسئله ان پی سخت از سخت‌ترین مسائل در حوزه بهینه سازی می‌باشد[۱]. مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد در حوزه‌های مختلفی مثل صنعت نیمه‌رسانا، حمل و نقل، بهینه‌سازی اسکن زنجیره، مسیریابی، حفاری، لجستیک و تست مدارهای یکپارچه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در بسیاری از بخش‌های دیگر صنعتی و عملی استفاده می شوند. مسئله‌ی فرو شنده‌ی دوره‌گرد نمونه‌ای از بهینه سازی ترکیبی می‌باشد و در حوزه‌ی علوم کامپیوتری نظری و تحقیقات عملیاتی مورد استفاده و تحقیق قرار می‌گیرد[۲]. سرویلیام روان همیلتون، ریاضیدانی از ایرلند و توماس پنیتون کریک من، ریاضیدان بریتانیایی در قرن هجدهم مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد را معرفی کردند. کارل منگر و هاروارد فرم کلی مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد را طراحی کردند. سپس مریل، هسلر و ویتنی در پرینستون آن را ارتقا دادند[۳].

در حوزه‌ی تحقیقات عملیاتی، تعداد زیادی الگوریتم اکتشافی و دقیق برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد طراحی شد[۴]. مسئله‌ی فرو شنده‌ی دوره‌گرد مسئله‌ای است که فرو شندگان با آن مواجه هستند. این مسئله، دارای مجموعه‌ای از شهرها با فاصله‌های مربوط بین هر فروشنده می‌باشد. مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد از برخی از شهرها شروع می شود و وظیفه‌ی پیدا کردن

[۱] NP-hard

کوتاه‌ترین مسیر در بین تمامی‌شهرها را برعهده دارد. فروشنده باید تمامی‌شهرها را دقیقاً یک بار بررسی کند و دوباره به همان شهری که از آن شروع کرده است برگردد. پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر در یک تصویرکاملاً بهم پیوسته و کم کردن هزینه‌ی مسافرت در طول این سفر، هدف کاربردی مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد می‌باشد. تعداد مسیرهای ممکنی که همه‌ی شهر ها را بهم متصل می‌کند و یک راه‌حل قابل اجرا را ارائه می‌دهد.

مسئله فروشنده دوره‌گرد چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطرح شده است. بهینه‌سازی چندهدفه برای ماکزیمم یا مینیمم کردن توابع چندگانه بر اساس این مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این بهینه‌سازی برای کاهش قیمت و فاصله مورد استفاده می‌گیرد. راه‌حلی که توسط بهینه پارتو ارائه می‌شود می‌تواند مغلوب و یا نامغلوب باشد. راه حل هایی که مغلوب نیستند، نامغلوب نامیده می شوند. مجموعه ای از راه‌حل‌هایی که در فضای تصمیم‌گیری عملی وجود دارد پارتو بهینه یا دسته مغلوب نامیده می‌شوند.

۲. بررسی ادبیات

پابلو و همکاران [۵] کاری برای حل کردن مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد با استفاده از روش دو هدفی جزیره‌ای برای حل کردن هزینه‌ی حمل و نقل زمینی و دریایی ارائه داده‌اند. هدف از هر دو تابع، به حداقل رساندن هزینه های حمل و نقل زمینی و دریایی می‌باشد. آنا اری گیلانو و همکاران [۶] بر روی مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد نامتقارن با جدول زمانی با استفاده از یک الگوریتم دقیق کار کردند. مسئله با استفاده از جدول زمانی مناسب و زمان‌های سفر حل شد و راه‌حل بهینه مستقل از زمان را نشان داد.

یورفت و همکاران [۷] کاری در زمینه حل کردن مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد با استفاده از الگوریتم تکراری ارائه دادند. این الگوریتم به منظور تخمین ترتیب مقادیر در لبه‌ها برای ایجاد راه‌حل‌های مختلف پیشنهاد شد. پاندیری و همکاران [۸] یک مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد از نوع K را با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ارائه و در این مقاله مورد بررسی قرار دادند. این الگوریتم متشکل از N تعداد شهر و یک مقدار ثابت که در این پیدا کردن حداقل شهر با بررسی کردن K از N تعداد شهر می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. در این جا انتخاب و جایگزینی ترکیبی از مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد از نوع K می‌باشد . آرماندو و همکاران [۹] یک مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد برای برداشتن چندین محموله و تحویل آنها با استفاده از یک برنامه‌ی خطی عدد صحیح را معرفی کردند. هدف از این تحقیق، پیدا کردن مسیری برای وسیله نقلیه به طوری که همه درخواست‌ها را برآورده و مسیر سفر را کوتاه کند، می‌باشد.

لی سان و همکاران [۱۰] به منظور حل مسئله فروشنده دوره‌گرد دوره نامشخص روشی را ارائه کردند که در آن نودهای مشتری به تعداد نامحدود از دفعات قابل مشاهده است. رویکرد مشاهده در بلند مدت از راه حل بهینه که شامل تصمیم‌گیری برای مسیریابی و برنامه‌ریزی می‌باشد، تبعیت می‌کند. جوریس کیتابل و همکاران [۱۱] به منظور حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد با قیمت منصفانه روشی را ارائه داده‌اند که در آن مدلی ارائه شد که برنامه نویسی عدد صحیح صفر و یک نامیده شد و توانایی این فرمولاسیون‌ها، با هم مقایسه گردید.

کریستوف دفریان و همکاران[۱۲] روشی را در مورد حل مسئله فروشنده‌ی دوره‌گرد چندهدفه با همکاری‌های افقی ارائه دادند. این مقاله در مورد همکاری افقی سرویس‌های تدارکاتی که در آن بسیاری از شرکت‌ها گرد هم می‌آیند تا مسئله بهینه‌سازی لجستیکی را حل کنند، می‌باشد.

راکوئل و همکاران [۱۳] روشی برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد مجموعه‌ای بعنوان یک مسئله ان-پی سخت را ارائه دادند. هدف از این مقاله بررسی همه گره‌های مجموعه در کمترین قیمت بود. همچنین این مسئله از چندین مدل تراکم و غیرتراکم استفاده می‌کند. ماریو مستریا و همکاران [۱۴] مطالعه‌ای در مورد مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد خوشه‌ای با استفاده از الگوریتم ابتکاری هیبریدی، انجام داده‌اند. این مسئله از نوع مسائل ان-پی سخت بود که در آن رئوس به خوشه‌ها تقسیم‌بندی می‌شدند و هر خوشه به طور پیوسته بازبینی می‌شد. مارک و همکاران [۱۵] در حل مسئله فروشنده‌ی دوره‌گرد چندهدفه از الگوریتم تجزیه استفاده کردند. برای یافتن تقریبی از مرز پارتو این الگوریتم از چارچوب مدلی دو فازه استفاده می‌کند.

هزیم و همکاران [۱۶] برای حل مسئله فروشنده دوره گرد از الگوریتم بهینه‌سازی حشره میوه استفاده کردند. برای حل از یک الگوریتم بهبود یافته FOA استفاده گردید. این الگوریتم شامل بو کردن میوه از طریق بینی (فاز استخوانی) و سپس از طریق فاز بینایی به آن نزدیک می‌شوند. بیتر و همکاران [۱۷] روشی برای فروشنده دوره‌گرد اقلیدوسی با استفاده از سیستم شبکه عصبی موازی، ارائه دادند. روش تقسیم و حل در شبکه عصبی

خودسازمان‌ده برای حل فروشنده دوره‌گرد اقلیدوسی استفاده شد. ایراکلیس و همکاران [۱۸] برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد چندهدفه از الگوریتم تکاملی هیبریدی استفاده کردند. دوتا براساس الگوریتم تکامل تفاضلی و سومی‌براساس الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب می‌باشد. زوتانگ و همکاران [۱۹] گوناگونی مسئله‌ی فروشنده‌ی چندهدفی نامشخص با متغیرهای مبهم را بررسی کردند . این کار دلیل نامشخص بودن راه‌حل‌ها بیان کرده و روش جدیدی است که برای ارائه مسیر کارآمدی پارتو به کار می‌رود.

۳. اهداف تحقیق

- طراحی و توسعه ی الگوریتم ژنتیک بر پایه ی چارچوب بهینه سازی چند هدفه برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد.
- تست و آزمایش کارآمدی چارچوب الگوریتم ژنتیک ارائه شده با تعدادی از نمونه های مسئله فروشنده دوره گرد کتابخانه محک استاندارد.

۳,۱. بهینه سازی چند هدفه مسئله فروشنده دوره‌گرد

مسئله فروشنده دوره‌گرد مسئله‌ای است که در آن تعدادی شهر وجود دارد و هدف پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر از بین تمام مسیرهای ممکن است به طوری که فرد از تمـام شـهرها و از هـر یـک تنها یک بار گذشته باشد.

شهر ها از ۱تا n شماره گذاری می‌شوند، فاصله‌ی بین دو شهر i و j به صورت فاصله $(i \neq j)$ [i][j] ، و هزینه ی بین دو شهر به صورت هزینه $(i \neq j)$ [i][j] می‌باشند. مدل ریاضی مسئله‌ی فروشنده‌ی چندهدفه را می‌توان به صورت رابطه ی (۱) نشان داد:

$$minimize\ f(x)\begin{Bmatrix} f1(x) = c_1^{x(n),x(1)} + \sum_{i=1}^{n-1} c_1^{x(i),x(i+1)} \\ f1(x) = c_1^{x(n),x(1)} + \sum_{i=1}^{n-1} c_1^{x(i),x(i+1)} \\ f1(x) = c_1^{x(n),x(1)} + \sum_{i=1}^{n-1} c_1^{x(i),x(i+1)} \end{Bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن N تعداد شهر، Cj ماتریس هزینه با توجه به هدف j و X جایگشت N شهر می‌باشند. مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد برای تخمین توالی غیرتکراری از ۱ و ۲ و .... N می‌باشد، به طوری که در آن شهرها به ترتیب از ۱ تا N شماره‌گذاری شده‌اند . در مسئله فروشنده دوره‌گرد متقارن، Cij برابر با Cji می‌باشد $(c_{ij} = c_{ji})$. مجموع جایگشت‌ها نشان می‌دهد که شهری که بازدید می‌شود ، فواصل جستجو را به حداقل رسانده و شامل تمام جایگشت‌های ممکن برای شهرهای متوالی از ۱ تا N می‌باشد.

همه‌ی راه‌حل‌ها برای فروشنده دوره‌گرد متقارن همراه با جایگشت چرخشی معکوس با استفاده از رابطه‌ی (۲) ایجاد می‌شوند.

$$\frac{(n-1)!}{2} \quad (۲)$$

فاصله‌ی اقلیدسی برای ایجاد ماتریس هزینه و فاصله استفاده می‌شود. فاصله‌ی اقلیدسی یک خط صاف بین دو گره می‌باشد. معیار اندازه‌گیری می‌تواند به شکل یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی باشد. در این تحقیق، فاصله‌های اقلیدسی دو بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. فاصله‌ی اقلیدسی برای اندازه‌ی دوبعدی بین هر دو شهر با مختصات (x_1, y_1) و (x_2, y_2)بااستفاده از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود:

$$Euclidean\ distances = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (۳)$$

۳,۲. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی قیددار و بدون قید است که بر مبنای نظریه انتخاب طبیعی (فرآیندی که تکامل زیست شناسی را پیش می‌برد) عمل می‌کند.

از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی که الگوریتم های استاندارد بهینه سازی برای حل آنها مناسب نیست، استفاده می‌شود. به عنوان نمونه‌ای از این دست مسائل می‌توان به مسائلی اشاره کرد که در آن تابع هدف ناپیوسته، مشتق ناپذیر، تصادفی و یا غیرخطی از مرتبه بالا می‌باشد. الگوریتم ژنتیک همچنین می‌تواند در حل مسائل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط، که در آن برخی از اجزا محدود به مقادیر صحیح هستند نیز استفاده شود. در زیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک ارائه می‌گردد.

اندازه‌ی جمعیت: جمعیت فرایندی می‌باشد که با دسته‌ای از افراد شروع می‌شود و هر فرد راه‌حلی برای هر مسئله‌ی مشخص ارائه می‌دهد . اندازه ی جمعیت تعداد کروموزوم‌ها در جمعیت را نشان می‌دهد و بستگی به نوع رمز گشایی و نوع مسئله دارد.

انتخاب: انتخاب اولین عملگری است که برروی جمعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. عامل انتخاب بهترین راه‌حل برای ایجاد جمعیت جدید از جمعیت فعلی می‌باشد. این عملگر، رشته‌ها یا کروموزوم‌های خوب جمعیت را انتخاب کرده و با تکثیر آنها جمعیت جدید شکل می‌گیرد.

تابع برازندگی: تابعی است که ورودی را به عنوان کاندید راه‌حل انتخاب کرده و خروجی با توجه به مسئله فروشنده دوره‌گرد تولید می‌شود. به طور کلی، یک تابع برازندگی، در ابتدا با استفاده از تابع هدف فرموله می‌شود و در عملیات ژنتیکی متوالی در نسل‌های

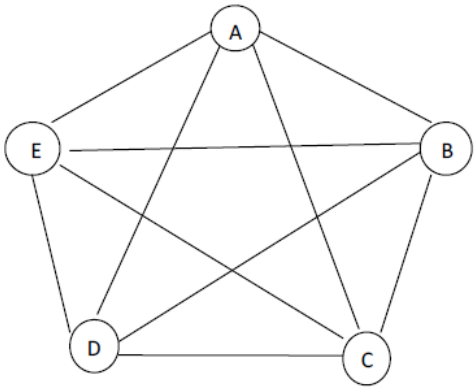
الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تابع در واقع میزان خوب بودن جواب مسئله را نشان می‌دهد.

عملگر ترکیب یا آمیزش: ترکیب یا آمیزش فاز حیاتی و مهم در الگوریتم ژنتیک می‌باشد. این عملگر همراهی بین افراد را نشان می‌دهد. ترکیب فرایند گرفتن دو کروموزوم و ایجاد یک تولید مثل می‌باشد.

جهش: در فرایند جهش، ژن‌هایی که برازندگی کمتری دارند جهش می‌یابند. عملگر جهش مکانیزم هوشمندانه‌ای برای جستجوی محلی در فضای جستجوی جواب‌های مسئله به شمار می‌آید. با استفاده از عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک، رشته‌ها یا کروموزوم‌های جدیدی در همسایگی رشته یا کروموزوم فعلی ایجاد می‌شوند. در نتیجه، عملگر جهش سبب ایجاد مکانیزم جستجوی محلی اطراف کروموزوم‌های فعلی می‌شود. همچنین، عملگر جهش سبب حفظ تنوع در جمعیت کروموزوم‌ها یا جواب‌های کاندید می‌شود.

۳،۳. مثالی از مسئله فروشنده دوره گرد با الگوریتم ژنتیک

P=(C1,C2,C3,…..CN) را در نظر بگیرید. یعنی فروشندگان از C1 به C2 به C3 به Cn منتقل می‌شوند. این شهرها A،B،C،D،E هستند. سفر از A شروع می‌شود و در A نیز پایان می‌یابد. فاصله



بین شهرها مطابق شکل ۱ در جدول ۱ نشان داده است.

شکل ۱ - پیوند از TSP

جدول ۱ - فاصله‌ی بین هر جفت شهر در مثال فوق

۱	A	B	۷
۲	A	C	۵
۳	A	D	۹
۴	A	E	۹
۵	B	C	۷
۶	B	D	۲
۷	B	E	۸
۸	C	D	۴
۹	C	E	۳
۱۰	D	E	۶

در این مثال هدف پیدا کردن کمترین مقدار بهینه سراسری می‌باشد. در زیر توضیحی در مورد محاسبات الگوریتم ژنتیک ارائه شده است جدول ۲ شش کروموزوم تصادفی را برای مثال ارائه می‌دهد.

جدول ۲ - جمعیت اولیه با شش کروموزوم تصادفی

۱	B	D	E	C
۲	D	B	E	C
۳	C	B	D	E
۴	E	B	C	D
۵	E	C	B	D
۶	C	D	E	B

برای هر کروموزوم از جمعیت بر اساس طول مسیر برازندگی محاسبه شده است جدول۳ محاسبه برازندگی را انجام می‌دهد.

جدول ۳ - محاسبه برازندگی

	مسیر					برازندگی
۱	AB	BD	DE	EC	CA	
	۷	۲	۶	۳	۵	۲۳
۲	AD	DB	BE	EC	CA	
	۹	۲	۸	۳	۵	۲۷
۳	AC	CB	BD	DE	EA	
	۵	۷	۲	۶	۹	۲۹
۴	AE	EB	BC	CD	DA	
	۹	۸	۷	۴	۹	۳۷
۵	AE	EC	CB	BD	DA	
	۹	۳	۷	۲	۹	۳۰
۶	AC	CD	DE	EB	BA	
	۵	۴	۶	۸	۷	۳۰

انتخاب کروموزوم به دلیل مسئله فروشنده دوره گرد به طور مطلوب انجام می‌شود که کروموزوم‌هایی که از برازندگی کمتری برخوردار هستند احتمال بیشتری برای تولید مثل دارند. جدول۴ احتمال انتخاب هر کروموزوم را محاسبه میکند.

جدول ۴ - احتمال انتخاب هر کروموزوم

	برازندگی	نرمال سازی	احتمال
۱	۲۳	۰,۰۴۳۴۷۸	۰,۲۰۸۳۳۷
۲	۲۷	۰,۰۳۷۰۳۷	۰,۱۷۷۴۷۲
۳	۲۹	۰,۰۳۴۴۸۳	۰,۱۶۵۲۳۳
۴	۳۷	۰,۰۲۷۰۲۷	۰,۱۲۹۵۰۷
۵	۳۰	۰,۰۳۳۳۳۳	۰,۱۵۹۷۲۵
۶	۳۰	۰,۰۳۳۳۳۳	۰,۱۵۹۷۲۵

با توجه به انتخاب کروموزوم‌هایی با برازندگی بیشتر انتظار می‌رود که با اعمال عملگر ترکیب کروموزوم‌های حاصل از ارزش برازندگی بیشتری برخوردار باشند. در اینجا مقدار احتمال ترکیب برابر است با ۰,۲۵ است. جدول ۵ مثالی از عملگر ترکیب را نشان می‌دهد.

جدول ۵- اعمال عملگر ترکیب

قدیم	جدید	کروموزوم			
۱	۲	D	B	E	C
۲	۱	B	D	E	C
۳	۳	C	B	D	E
۴	۶	C	D	E	B
۵	۵	E	C	B	D
۶	۴	E	B	C	D

در این بخش از فرآیند جهش انجام می‌شود. این جهش برای تبادل ژن با ژن‌های دیگر کروموزوم‌ها کار می‌کند .نتایج ثابت شده ارزش برازندگی را افزایش می‌دهد .اگر یک ژن در انتهای کروموزوم رد و بدل شود ، این ژن با ژن اول مبادله می‌شود. یک پارامتر وجود دارد که تعیین می‌کند چند ژن جهش می‌یابند. نرخ جهش ۰/۲ است. جدول ۶ اعمال عملگر جهش را نشان می‌دهد.

در نسل اول دیده شده است که کوچک‌ترین مقدار برازندگی وجود دارد که تغییر نمی‌کند. اگر محاسبه به نسبت NTH ادامه یابد، فرض می‌شود که کمترین مقدار برازندگی بدون تغییر باقی می‌ماند. اگرچه محاسبه به اندازه کافی برای نسل اول تعریف شده است، یک راه حل نزدیک بهینه از فرآیند الگوریتم ژنتیک بالا، نتیجه نهایی مسیر با کوتاه‌ترین فاصله بهینه A, B, D, E, C, A است.

۳,۴. چارچوب ارائه شده برای مسئله فروشنده دوره‌گرد

الگوریتم ژنتیک یک روش هوش محاسباتی می‌باشد که در حوزه‌ی علوم کامپیوتر، برای تشخیص دادن راه‌حل‌های مقایسه‌ای، برای بهینه‌سازی مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرد. مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد چندهدفه، در این کار مد نظر قرار گرفته است. مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه یکی از بهترین مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. فاصله‌ی اقلیدسی برای محاسبه‌ی فاصله‌ی بین نقاط مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای الگوریتم ژنتیک اعمال می‌شوند و کوتاه‌ترین مسیر در بین فواصل آن پیدا خواهند شد. بیشترین روش‌های بکارگرفته شده در مسائل چند هدفه، شامل بکارگیری کلیه‌ی اهداف در تابع و تضمین تولید جواب‌های بهینه پارتو می‌باشند. از نرم افزار متلب در این تحقیق استفاده شده است.

جدول ۶ - اعمال عملگر جهش

	مسیر					برازندگی
۱	AD	DB	BC	CE	EA	
	۹	۲	۷	۳	۹	۳۰
۲	AB	BD	DE	EC	CA	
	۷	۲	۶	۳	۵	۲۳
۳	AC	CE	ED	EB	BA	
	۵	۳	۶	۲	۷	۲۳
۴	AE	EC	CB	BD	DA	
	۹	۳	۷	۲	۹	۳۰
۵	AD	DB	BC	CE	EA	
	۹	۲	۷	۳	۹	۳۰
۶	AE	ED	DB	BC	CA	
	۹	۶	۲	۷	۵	۲۹

جدول ۷ - پارامترهای به کار رفته در الگوریتم ژنتیک

شماره	پارامترهای الگوریتم	مقادیر
۱	جمعیت	بر مبنای تعداد شهرها
۲	نسل های تولیدی	N فرزندان، تولید می‌شوند زمانی که ساز جمعیت n باشد.
۳	عملگر انتخاب(تولید مثل)	انتخاب مسابقه‌ای
۴	عملگر ترکیب	ترکیب تک نقطه‌ای
۵	عملگر جهش	جهش جابجایی
۶	رضایت‌بخشی خاتمه یافتن	پایان تکرار

شبه کد الگوریتم ژنتیک در شکل ۲ آورده شده است [ایجاد الگوریتم ژنتیک].

شروع

۱- آغاز به کار : ایجاد جمعیت تصادفی از راه‌حل‌های P کروموزوم‌ها

۲- برای هر فرد $i \in p$

i) محاسبه برازندگی

۳- تکرار

۴- برای $L = i$ به تعداد نسل‌ها ، (i) انتخاب عملیات تصادفی (ترکیب یا جهش)

۵- اگر ترکیب انتخاب شد

i)دو والد ia و ib به صورت تصادفی انتخاب شود

ii) در اثر ترکیب فرزند ایجاد شود (ترکیب ib و ia)=ic

۶- در غیر این صورت اگر جهش انتخاب شد

i) به صورت تصادفی یک کروموزوم i را انتخاب کنید

ii) تولید مثل ic را ایجاد کنید i جهش یافته = ic

۷- خاتمه اگر

۸- جستجوی محلی (ic)

i)برازندگی تولید مثل ic محاسبه شود

ii) اگر ic بهتر باشد ، سپس بدترین کروموزوم را با ic جایگزین کنید.

iii) i جدید را وارد کنید.

۹- انتها را چک کنید.

۱۰- پایان

۳,۴,۱. مراحل الگوریتم ژنتیک در حل مسئله فروشنده دوره‌گرد

۱- داده‌های ورودی برای نمونه‌های چندهدفه را بخوانید (کرولاک و اقلیدس).

۲- فاصله را برای نمونه‌های اقلیدس با استفاده از فرمول اقلیدس پیدا کنید.

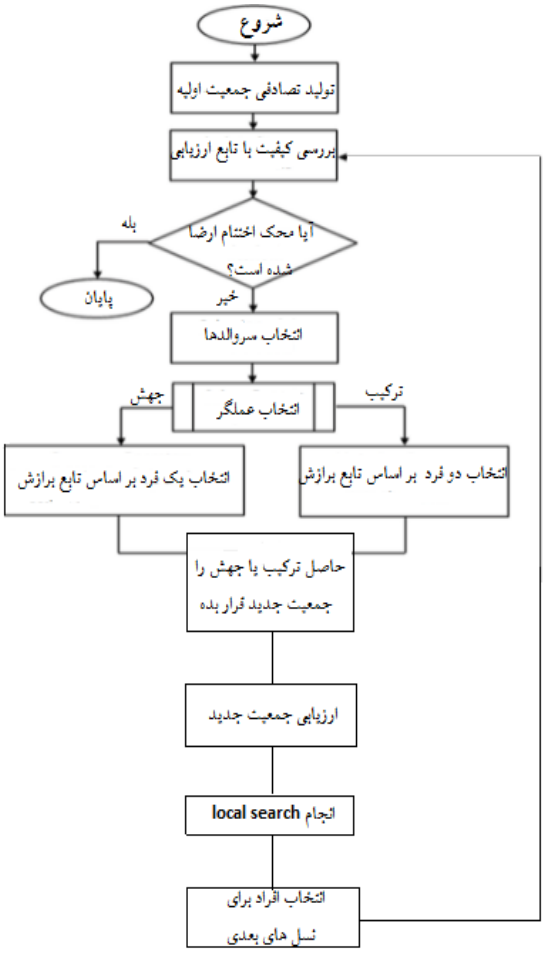
۳-ماتریس با توجه به شهر ارائه شده تشکیل شود.

۴-الگوریتم ژنتیک برای ایجاد کردن ماتریس بکار می‌رود.

۴-۱- جمعیت را به صورت تصادفی از ماتریس شروع کنید.

۴-۲- برازندگی جمعیت را از طریق ماتریس تعیین کنید.

۴-۳- ترکیب و جهش بر اساس افرادی که انتخاب شده‌اند انجام می‌پذیرد.



شکل ۲ ـ مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک در مسئله حاضر

۴-۴-برازندگی برای شهر تازه توسعه‌یافته از طریق ماتریس محاسبه می‌شود.

۴-۵- بهترین مسیر همراه با فاصله و نازلترین هزینه مربوط به آن را چاپ کنید.

۴.بحث در مورد نتایج

نمونه‌های داده، برای این کار تحقیقی از مجموعه داده‌های کتابخانه‌ای محک استاندارد جمع آوری شده‌اند. نمونه‌های مسئله فروشنده دوره‌گرد برای تست از نمونه‌های کورلاک با ۱۰۰ شهر، ۱۵۰ شهر، ۲۰۰ شهر و همچنین از اقلیدس با ۱۰۰ شهر، ۳۰۰ شهر، ۵۰۰ شهر از جدول کتابخانه‌ای [رینلت ، ۱۹۹۵] انتخاب شده‌اند. نمونه‌های کرولاک AB ۱۰۰ به عنوان اهداف هزینه و فاصله برای جفت اول در نظر گرفته شد ، سپس کرولاک AC ۱۰۰ ، کرولاک AD ۱۰۰ و.... در نظر گرفته شدند.

جدول ۸ نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی چندهدفه از نمونه‌های کورلاک با ۱۰۰ ، ۱۵۰ و ۳۰۰ شهر را نشان می‌دهد.

جدول ۹ نتایج بدست آمده برای نمونه‌های اقلیدسی ۱۰۰ ABتا EF۱۰۰ ، ۳۰۰ AB تا EF۳۰۰ و ۵۰۰ AB تا EF۵۰۰ با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد و بهترین راه‌حل بهینه بر اساس TSPLIB را نشان می‌دهد.

شکل ۳ جواب‌های بهینه پارتو که از نمونه‌های کورلاک AB۱۰۰ بدست آمده است را نشان می‌دهد.

شکل ۴ جواب‌های بهینه پارتو که نمونه‌های کورلاک AB۱۵۰ بدست آمده را نشان می‌دهد.

شکل ۵ جواب‌های بهینه پارتو که نمونه‌های کورلاک AB۲۰۰ به دست آمده را نشان می‌دهد.

شکل ۶ جواب‌های بهینه پارتو که از اقلیدس CD۱۰۰ بدست آمده را نشان می‌دهد.

شکل ۷ جواب‌های بهینه پارتو که برای نمونه‌های اقلیدس AB۳۰۰ بدست آمده را نشان می‌دهد.

شکل ۸ جواب‌های بهینه پارتو که برای نمونه‌های اقلیدس AB۵۰۰ بدست آمده را نشان می‌دهد.

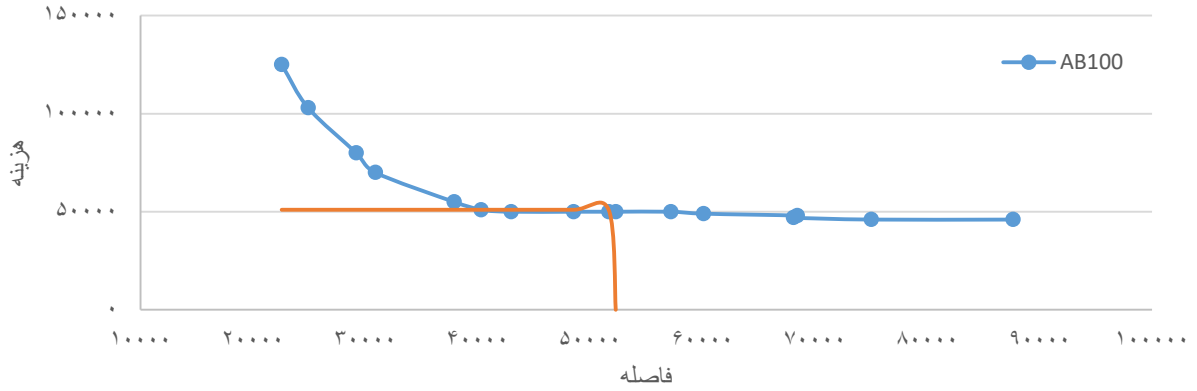
جدول ۸ - نتایج اجرا برای فروشنده دوره‌گرد چندهدفه (نمونه‌های کرولاک)

شماره	مورد	سایز	بهترین تا کنون		الگوریتم ژنتیک بهینه	
			فاصله	هزینه	فاصله	هزینه
۱	کرولاک ۱۰۰ AB	۱۰۰	۵۰,۵۲۳	۵۱,۴۴۷	۵۰۶۵۴,۴	۴۹,۷۷۲
۲	کرولاک ۱۰۰ AC	۱۰۰	۵۰,۸۴۰	۵۱,۸۳۳	۵۰,۳۸۳	۵۱۸۳۳,۴۸
۳	کرولاک ۱۰۰ AD	۱۰۰	۵۷,۸۰۳	۴۴,۱۵۹	۵۷۵۳۵,۷	۴۳۹۱۷,۴
۴	کرولاک ۱۰۰ AE	۱۰۰	۴۸,۸۸۶	۴۸,۸۹۱	۴۸۴۰۷,۰۷	۴۹۴۶۲,۳۵
۵	کرولاک ۱۰۰ BC	۱۰۰	۴۸,۴۷۳	۵۰,۴۸۲	۴۸۹۸۹,۳۳	۵۰۰۷۰,۸۱
۶	کرولاک ۱۰۰ BD	۱۰۰	۵۲,۹۵۶	۴۷,۸۷۲	۵۱۲۸۴,۵۵	۴۹۱۲۹۶,۰۶
۷	کرولاک ۱۰۰ BE	۱۰۰	۵۰,۳۸۸	۵۰,۶۴۸	۵۱۶۷۹,۹۸	۴۹۷۳۳,۵۶
۸	کرولاک ۱۰۰ CD	۱۰۰	۴۸,۷۱۱	۴۶,۵۹۴	۴۷۷۷۶,۸۱	۴۷۶۹۲,۲۴
۹	کرولاک ۱۰۰ CE	۱۰۰	۴۹,۰۳۲	۵۰,۶۹۹	۵۰۲۹۸,۷۷	۴۹۲۸۵,۶۶
۱۰	کرولاک ۱۰۰ DE	۱۰۰	۵۰,۵۹۴	۵۰,۳۰۰	۵۰۰۸۹,۳۲	۵۰۸۸۷,۶۸
۱۱	کرولاک ۱۵۰ AB	۱۵۰	۴۹,۱۰۸	۴۹,۵۶۹	۴۹۲۰۸,۹۸	۴۹۴۳۱,۰۳
۱۲	کرولاک ۲۰۰ AB	۲۰۰	۸۲۳۴۱	۸۲,۰۷۶	۸۳۴۱۳,۸۷	۸۱۲۳۴,۲۳

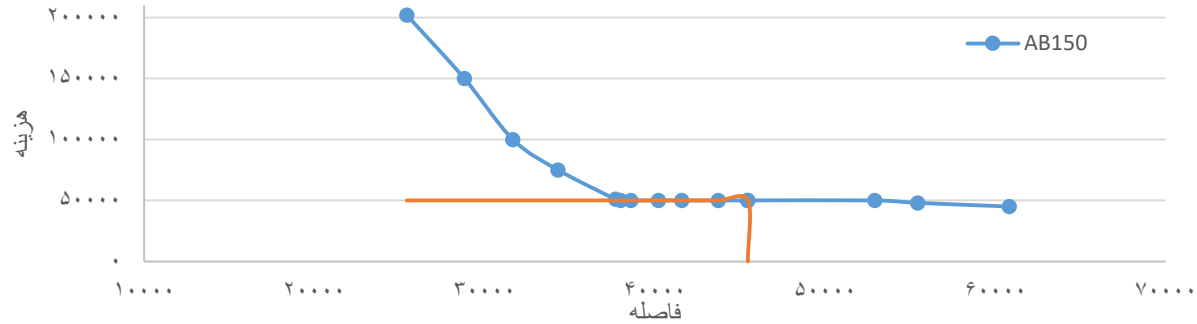
جدول ۹ - نتایج اجرا برای فروشنده دوره‌گرد چندهدفه (نمونه‌های اقلیدسی)

شماره	مورد	سایز	بهترین تا کنون		الگوریتم ژنتیک بهینه	
			فاصله	هزینه	فاصله	هزینه
۱	اقلیدس ۱۰۰ AB	۱۰۰	۵۴,۱۷۴	۵۵,۲۵۰	۵۳,۶۴۳	۵۵,۷۷۷
۲	اقلیدس ۱۰۰ CD	۱۰۰	۵۶,۶۲۶	۵۶,۷۳۱	۵۷,۹۳۴	۵۶,۴۹۳
۳	اقلیدس ۱۰۰ EF	۱۰۰	۵۴,۲۵۸	۵۳,۵۳۶	۵۴,۲۱۳	۵۳,۵۸۱
۴	اقلیدس ۳۰۰ AB	۳۰۰	۱۲۰,۱۴۹	۱۲۰,۲۰۸	۱۲۰,۳۶۸	۱۱۹,۹۴۹
۵	اقلیدس ۳۰۰ CD	۳۰۰	۱۱۹,۴۵۳	۱۱۹,۴۵۷	۱۱۹,۸۰۵	۱۱۹,۱۶۵
۶	اقلیدس ۳۰۰ EF	۳۰۰	۱۱۹,۷۲۶	۱۱۹,۷۳۵	۱۲۰,۰۰۲	۱۱۹,۴۹۰
۷	اقلیدس ۵۰۰ AB	۳۰۰	۱۷۲,۳۲۶	۱۷۲,۳۴۴	۱۷۲,۶۲۸	۱۷۲,۰۵۹

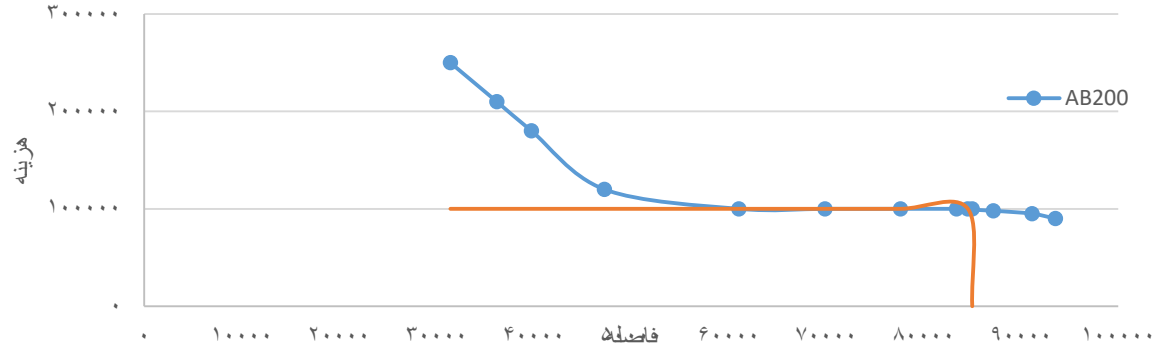
۸	اقلیدس CD ۵۰۰	۳۰۰	۱۷۴,۵۴۳	۱۷۴,۵۴۶	۱۷۵,۱۴۱	۱۷۳,۹۰۳
۹	اقلیدس EF ۵۰۰	۳۰۰	۱۷۵,۱۴۴	۱۷۵,۲۱۸	۱۷۶,۲۸۰	۱۷۴,۹۸۷



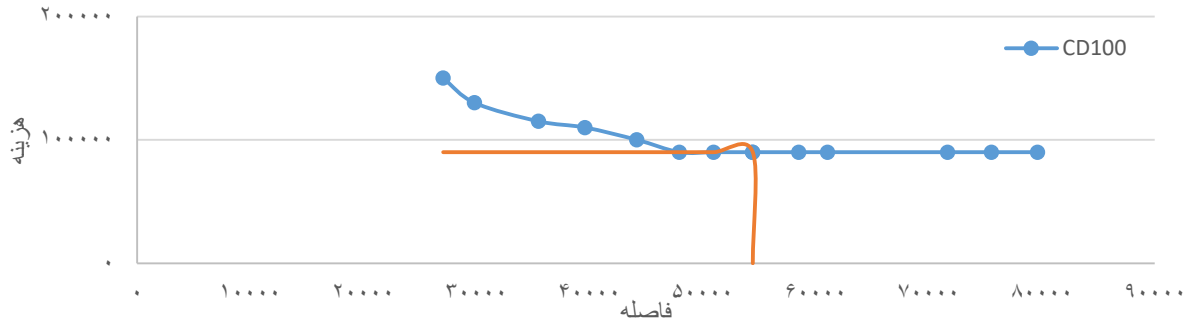
شکل ۳ – جواب‌های بهینه پارتو نمونه‌های کورلاک AB۱۰۰



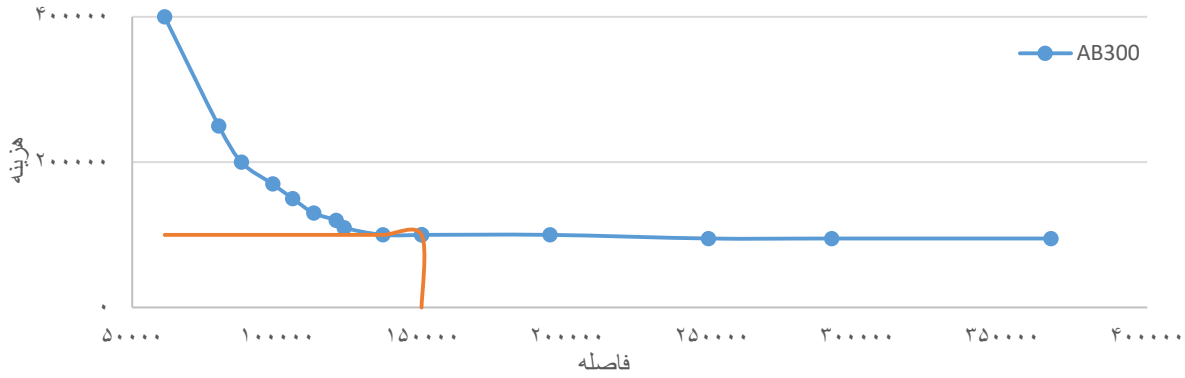
شکل ۴ – جواب‌های بهینه پارتو نمونه‌های کورلاک AB۱۵۰



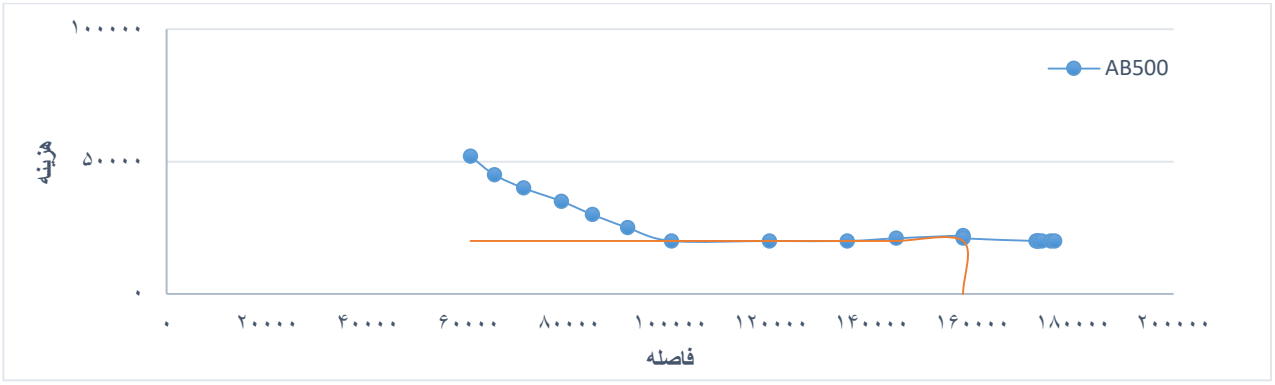
شکل ۵ – جواب‌های بهینه پارتو نمونه‌های کورلاک AB۲۰۰



شکل ۶ – جواب‌های بهینه پارتو نمونه‌های اقلیدس CD۱۰۰



شکل ۷ – جواب‌های بهینه پارتو نمونه‌های اقلیدس AB۳۰۰



شکل ۸ – جواب‌های بهینه پارتو نمونه‌های اقلیدس AB۵۰۰

۵. نتیجه‌گیری

مسئله فروشنده دوره‌گرد یک مسئله کاری مهم در زندگی روزمره می‌باشد و بهینه‌سازی فاصله و هزینه در این مسئله منجر به عملیات و کارهای کارآمد، قابل اطمینان و اقتصادی می‌شود. این کار تحقیقی، عمدتاً بر روی مسئله‌ی فروشنده‌ی چندهدفه تمرکز دارد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد چندهدفه همه‌ی توابع هدف را بهینه می‌کند و بهترین راه‌حل‌های مطلوب را پیدا می‌کند. مسئله‌ی فروشنده‌ی چندهدفه جواب‌های تقریبی بهینه پارتو را برای همه‌ی نمونه‌های داده موردآزمایش ارائه می‌دهد . الگوریتم ژنتیک نزدیک‌ترین راه‌حل بهینه را در طی یک دوره زمانی منطقی با بهینه‌سازی همه‌ی اهداف ارائه می‌دهد. نمونه‌های آزمایش برای این مسئله‌ی چندهدفه فروشنده‌ی دوره‌گرد از مجموعه داده‌های کتابخانه‌ای محک استاندارد جمع آوری شده است. نتایج مسئله‌ی چندهدفه فروشنده‌ی دوره‌گرد با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نزدیک‌ترین راه‌حل‌های مطلوب به نتایجی که در مجموعه ی TSP ارائه شده است را بیان می‌کند.

۶. مراجع

[1] Gupta, S., & Panwar, P. (2013). Solving travelling salesman problem using genetic algorithm. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 3(6).

[2] Pandey, S., & Kumar, S. (2013). Enhanced artificial bee colony algorithm and it's application to travelling salesman problem. HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research, 2.

[3] Matai, R., Singh, S. P., & Mittal, M. L. (2010). Traveling salesman problem: An overview of applications, formulations and solution approaches. November 2010.

[4] Plante, R. D., Lowe, T. J.,&Chandrasekaran, R. (1987). The productmatrix traveling salesman

problem: An application and solution heuristics. Operations Research, 35, 772–783.
[5] Miranda, P. A., Blazquez, C. A., Obreque. C., Maturana-Ross, J.,&Gutierrez-Jarpa, G. (2018). The bi-objective insular traveling salesman problem with maritime and ground transportation costs. European Journal of Operational Research.
[6] Arigliano, A., Ghiani, G., Grieco, A., Guerriero, E., & Plana, I. (2017). Time-dependent asymmetric traveling salesman problem with time windows: Properties and an exact algorithm. Discrete Applied Mathematics.
[7] Nuriyev, U.,Ugurlu,O.,&Nuriyeva, F. (2018). Self-organizing iterative algorithm for travelling salesman problem. IFAC PapersOnLine 51(30), 268–270.
[8] Venkatesh, P., Srivastava, G., & Singh, A. (2018). A general variable neighborhood search algorithm for the k-traveling salesman problem. In 8th International Conference on Advances in Computing and Communication ICACC, Procedia Computer Science, vol. 143 (pp. 189–196).
[9] Pereira, A. H., & Urrutia, S. (2018). Formulations and algorithms for the pickup and delivery traveling salesman problem with multiple stacks. Computers and Operations Research.
[10] Sun, L.,Karwan, M. K.,&Diaby, M. (2018). The indefinite period traveling salesman problem. European Journal of Operational Research.
[11] Kinable, J., Smeulders, B., Delcour, E., & Spieksma, F. C. R. (2017). Exact algorithms for the equitable traveling salesman problem. European Journal of Operational Research.
[12] Defryn, C., & Sörensen, K. (2017). Multi-objective optimisation models for the travelling
[13] salesman problem with horizontal cooperation. European Journal of Operational Research.
[14] Bernardino, R., & Paias, A. (2017). Solving the family traveling salesman problem. European Journal of Operational Research.
[15] Mestria, M. (2017). New hybrid heuristic algorithm for the clustered traveling salesman problem. Computers & Industrial Engineering.
[16] Cornu, M., Cazenave, T., & Vanderpooten, D. (2017). Perturbed decomposition algorithm applied to the multi-objective Traveling Salesman Problem. Computers and Operation Research.
[17] Iscan, H.,&Gunduz,M. (2017). An application of fruit fly optimization algorithm for traveling salesman problem. In 8th International Conference on Advances in Information Technology, IAIT2016, Procedia Computer Science, vol. 111, (pp. 58–63).
[18] Avs, B., & Aliabadi, D. E. (2015). Parallelized neural network system for solving Euclidean traveling salesman problem. Applied Soft Computing 34, 862–873.
[19] Psychas, I.-D., Delimpasi, E., & Marinakis, M. (2015). Hybrid evolutionary algorithms for the multiobjective traveling salesman problem. Expert Systems with Applications.
[20] Wang, Z.,Guo, J., Zheng, M.,&Wanga,Y. (2015).Uncertain multiobjective traveling salesman problem. European Journal of Operational Research 241, 478–489.
[21] Kumar, S., Jain, S., & Sharma, H. (2018). Genetic Algorithms. In Advances in Swarm Intelligence for Optimizing Problems in Computer Science (pp. 27–52). Chapman and Hall/CRC.
[22] elib.zib.de/pub/mp-testdata/tsp/tsplib/stsp-sol.html.visited on 7/16/2021.

حسگر فیبر نوری بر اساس رزونانس پلاسمون سطح

مهران کریمیان ریزی[۱]
وحید رنجبر عین‌الدین[۲]
محمد عادلی [۳]
حسیب بگلری [۴]

[۱] دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه تبریز، ایران، mehrankarimian97@ms.tabrizu.ac.ir
[۲] دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه تبریز، ایران، v.ranjbar98@ms.tabrizu.ac.ir
[۳] دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی بیومکانیک، دانشگاه تبریز، ایران، mohammad.adeli97@ms.tabrizu.ac.ir
[۴] دانشجو کارشناسی ارشد،مهندسی افزاره‌های میکرو ونانوالکترونیک،دانشگاه تبریز،ایران h.beglari97@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده: یک حسگر شاخص انکسار فیبر نوری میکرو ساختار، با استفاده از فیلم طلای نانومقیاس بر اساس رزونانس پلاسمون سطح (*SPR*) ، توسط روش المان محدود (*FEM*) پیشنهاد شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد که حساسیت متوسط ۱۵،۹۳۳ نانومتر / واحد شاخص شکست (*RIU*) با شاخص انکسار آنالیت در محدوده ۱،۴۰ تا ۱،۴۳ و حداکثر حساسی ۲۸،۶۰۰ nm/RIU و رزولوشن سنسور $3.5 \times 10^{-8} RIU$ است. سنسور شاخص انکسار فیبر نوری میکرو ساختار، برخی از تغییرات در سنسور فیبر D شکل را انجام می‌دهد، در مقایسه با سنسور فیبر متداول D شکل، حساسیت بیشتری دارد و از سنسور *SRR* سنتی، ساده تر تولید می‌شود.

کلیدواژه‌ها: *فیبر نوری میکرو ساختار، رزونانس پلاسمون سطح، حسگر*

۱. مقدمه

تکنولوژی رزونانس پلاسمون سطح (SPR) تکنولوژی جدیدی است که در دهه ۱۹۹۰ ساخته شده است و به طور گسترده در حوزه سنجش استفاده می‌شود. هنگامی که نور بر روی سطح فلز رخ می‌دهد و فرکانس آن مطابق با فرکانس الکترون آزاد از سطح فلز است، پدیده SPR رخ می‌دهد [۱-۳]. فیبر نوری میکرو ساختار بسیاری از ویژگی های عالی، مانند اتلاف کم ، منطقه حالت بزرگ ، دو طرفه شدن بالا را دارا می‌باشد [۴-۹]. و بسیاری از دستگاه ها بر اساس فیبرهای نوری میکرو ساختار یافته، از جمله سنسورها، توزیع کننده طول موج، اسپکتروم پلاریزاسیون، فیلترهای لیزر فیلتر قطبی و غیره طراحی و اجرا شده‌اند [۱۰-۱۳]. در سال های اخیر، سنسورهای فیبر نوری با ساختار میکرو سازگار بر اساس SPR با توجه به عملکرد حساس بالا، توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

برای به دست آوردن حسگر SPR فیبر نوری میکرو ساختار، نور هسته هدایت شده باید به سطح فلز نفوذ کند. چند روش برای دستیابی به آن وجود دارد. روش‌های معمول این است، ساخت فیلم فلزی بر روی سطح داخلی سوراخ‌های هوا فیبر نوری یا پر کردن سیم های فلزی، از طریق این طرح‌ها، حسگر SPR فیبر نوری می‌تواند تحقق یابد. با این حال، به دلیل ضخامت پوشش ناهموار، ساخت این طرح بسیار چالش برانگیز است. بنابراین، سنسور فیبر ساختار میکرو ساختار D پیشنهاد شده است، و سنسورهای SPR فیبر کریستال فوتونیک D دارای تعداد زیادی کاربرد در شاخص انکساری آنالیت هستند. در سال ۲۰۱۲، یک سنسور فیبر نوری فوتونی بر اساس SPR توسط تیان و همکاران پیشنهاد شده است. حساسیت می تواند به مقدار $7300\,nm/RIU$برسد. حسگر D شکل با حساسیت $7700\,nm/RIU$توسط Gangwar و همکاران در سال ۲۰۱۶ ارایه شد. [۱۴-۱۵]

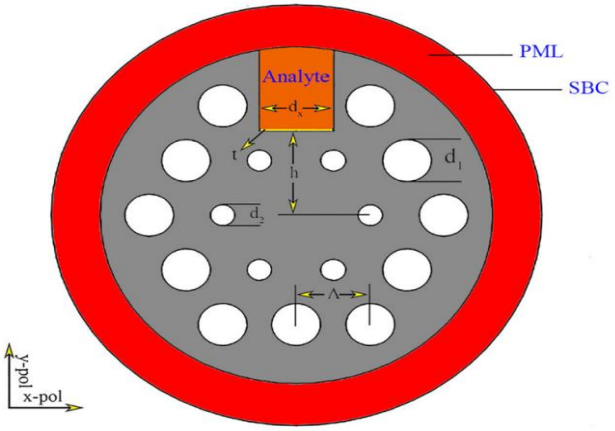
در این مقاله برخی از تغییرات در سنسور SPR D شکل گرفته

شده است. حسگر شاخص انکسار فیبر نوری با میکروساختار شیار با فیلم طلای نانو مقیاس بر اساس رزونانس پلاسمون سطح پیشنهاد شده است. حساسیت متوسط $15.933\,nm/RIU$است که شاخص انکساری آنالیت از ۱,۴۰ به ۱,۴۳ و حداکثر حساسیت $28.600\,nm/RIU$ می‌باشد. ساخت فیبر نوری میکرو ساختار می‌تواند تو سط فن آوری نانو ما شینکاری AFM تهیه شود [۱۶].

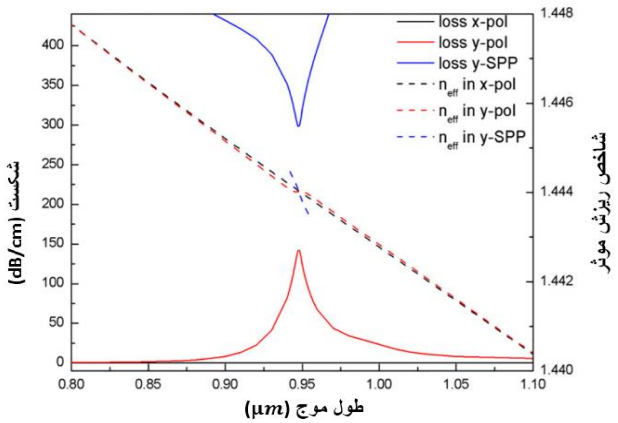
۲. ساختار و مدل سازی نظری:

سطح مقطعی از سنسور فیبر نوری میکرو ساختار شیار، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که می‌بینیم، فیبر نوری میکرو ساختار شامل دو لایه حفره های هوا است. قطر سوراخ های هوا بزرگ $d_1 = 2\ \mu m$، است و قطر سوراخ های هوا کوچک $d_1 = 1.2\ \mu m$،است. محدوده شبکه(توری) $\Lambda = 3$ است. شیار در قسمت بالای فیبر وجود دارد. عرض شیار $d_x = 3\ \mu m$، است. فاصله از مرکز فیبر نوری به شیار h = 4 میکرون است. یک فیلم طلایی پایین شیار را پوشش می‌دهد و ضخامت فیلم طلایی $t = 35\ nm$ است.

روش تجزیه و تحلیل عناصر محدود (FEM) برای تجزیه و تحلیل ویژگی های سنسور SPP میکرو ساختار فیبر نوری توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده می‌شود. لایه همگرا و شرایط مرزی پراکنده (SBC) برای جذب انرژی استفاده می‌شود. در شکل ۱، منطقه قرمز نشان دهنده لایه PML است، مایع آنالایزر در ناحیه نارنجی پر شده‌است، مواد پس زمینه سیلیکون خالص است که بخش خاکستری شکل ۱ است. پراکندگی رنگی آن را می توان با معادله Sellmeier محاسبه کرد [۱۷] که به صورت زیر تعریف می‌شود:



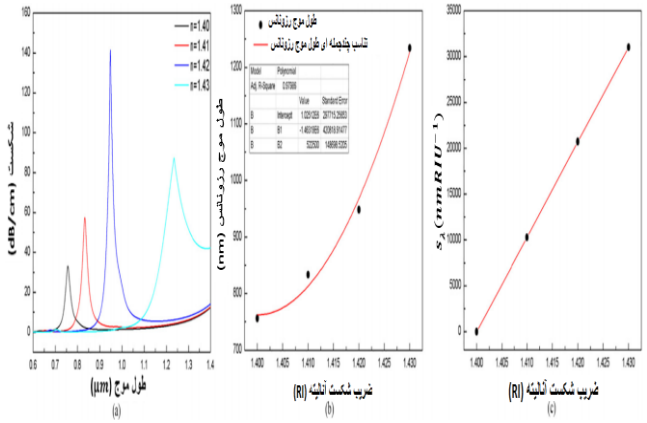
شکل ۱. سطح مقطع سنسور فیبر نوری و میکرو ساختار کانال



شکل ۲- ضریب شکست و ریزش موثر سنسور پیشنهاد شده با آنالیت RI n=1.4

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^{3} \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \qquad (۱)$$

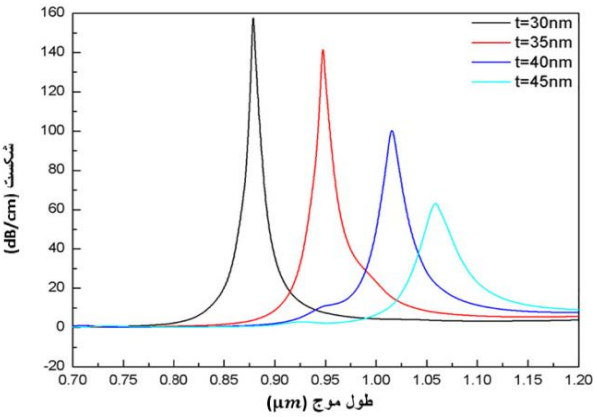
که λ طول موج نور حادثه است که واحد آن میکرومتر است. و $a_1 = 0.6961663$ $a_2 = 0.4079426$، $a_3 = 0.4079426$، $b_1 = 0.0684043\ \mu m$، $b_2 = 0.1162414\ \mu m$، $b_3 = 9.896161\ \mu m$. معادله (۱) طول موجی بین ۰,۳۷ تا ۲,۲ میکرو متر است.



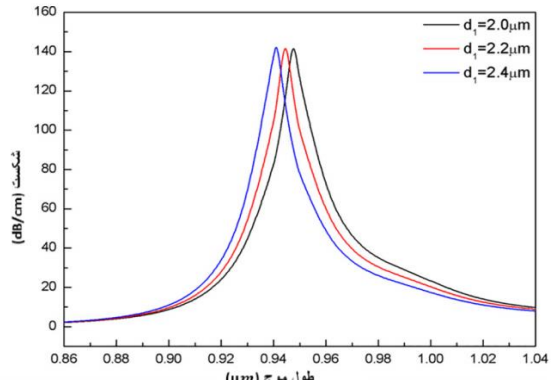
شکل ۳ – (a) تغییرات پیک‌های از دست رفته، (b) منحنی اتصالات عددی طول موج رزونانس و (c) منحنی حساسیت با RIهای مختلف تجزیه‌کننده

جدول ۱: تغییرات موج و طول موج رزونانس با RI های مختلف آنالایزر

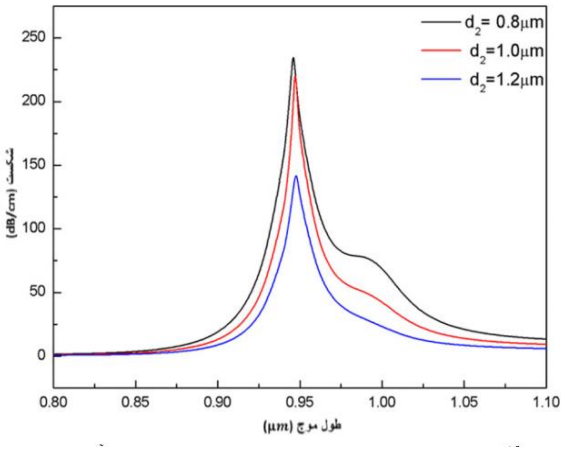
RI	1.40	1.41	1.42	1.43
طول موج (nm)	756	833	948	1234
شکست (dB/cm)	33.22	57.56	142.34	87.72



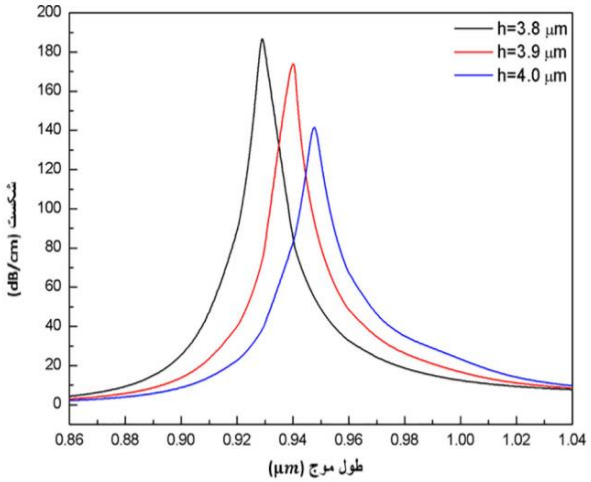
شکل ۴- طیف از دست دادن با ضخامت متفاوت فیلم طلا تغییر می‌کند زمانی‌که RI آنالیت n=1.42 باشد.



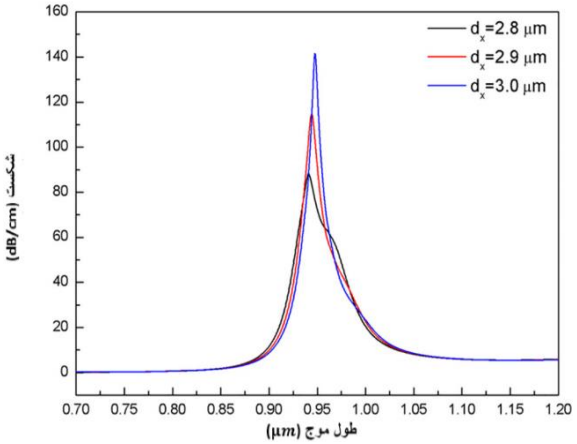
شکل ۵- طیف افت با قطر بزرگ سوراخ d1=20um , 2.4um تغییر می‌کند زمانی‌که RI آنالیت n=1.42



شکل ۶- طیف از دست دادن با قطر سوراخ کوچک تغییر می‌کند d2=0.8um زمانی‌که RI آنالیت است در n=1.42



شکل ۷- تاثیر بر پیک‌های از دست رفته توسط ارتفاع‌های مختلف از شیار به ناحیه هسته با RI آنالیت n=1.42



شکل ۸- تاثیر طیف از دست دادن توسط عرض مختلف شیار در شکل ۸ با تحلیل RI مورد بحث قرار گرفته است n=1.42

جدول ۲:خصوصیات سنسورهای فیبر نوری مبتنی بر SPR

ساختار نوری و مرجع	تشخیص محدوده RI	حساسیت (nm /RIU)
سنسور فیبر نوری فوتونیک D-شکل [۲۲]	1.33–1.34	2900
سنسور PCF انتخابی پوشش داده شده [۲۱]	1.37–1.41	5500
سنسور فیبر نوری فوتونیک D-شکل [۱۴]	1.33–1.3	7300
سنسور فیبر نوری فوتونیک D-شکل [۱۵]	1.43–1.46]	7700
سنسور فیبر فوتونیک شکل شیار (کار ما)	1.40–1.43	15,933

جریان الکتریکی طلا توسط Drude-Lorentz محاسبه می شود که مدل، آن را می توان به عنوان زیر بیان کرد [۱۸]:

(۲)

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\varepsilon \cdot \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) - j\Gamma_{L\omega}}$$

که ε_m تابش نسبی طلا است، ε_∞ محدودیت مجاز در فرکانس بالا است، $\varepsilon_\infty = 5.9673$ ، فرکانس پلاسمون $\omega_D/2\pi = 2013.6THz$، ω فرکانس دایره ای نور تصادفی است. فرکانس خنثی شده $\omega_D/2\pi = 15.92THz$ است، فاکتور وزن را می توان با $\Delta\varepsilon = 1.09$، Ω_L و Γ_L نشان داد فرکانس و عرض طیفی اصطلاح نوسانی لورنتز به ترتیب و $\Omega_L/2\pi = 650.07THz$ ؛ $\Gamma_L/2\pi = 104.76THz$. از دست دادن حالت تعریف شده است:

$$L = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} Im(n_{eff}) \times 10^4 \qquad (۳)$$

که واحدهای از دست دادن و طول موج به ترتیب dB/cm و میکرومتر هستند، و $Im(n_{eff})$ بخشی خیالی از شاخص ریزش موثر حالت است [۱۸].

برای هسته فیبر و حالت SPP، معادلات اتصال بین دو حالت می‌تواند بیان شود:

(۴)

$$\frac{dE_1}{dz} = i\beta_1 E_1 + ikE_2$$
$$\frac{dE_2}{dz} = ikE_1 + i\beta_2 E_2$$

که E1، E2 جزء میدان الکتریکی دو حالت اتصال است، β_1 و β_2 ثابت انتشار در دو حالت است، k قدرت استحکام اتصال است و z فاصله انتشار است [۱۹].

شکل ۲ ضریب شکست و ریزش موثر سنسور پیشنهادی را با ضریب شکست انحلال n = 1.42 نشان می‌دهد. همانطور که می بینیم، هنگامی که شرایط تطابق فاز راضی است، رزونانس سطح پلاسمون از بین خواهد رفت، و اوج تلفات حالت y-pol به تدریج افزایش می‌یابد و از دست دادن حالت y-SPP شروع به کاهش می‌کند. در ضمن، شاخص ریزش موی حالت y-pol و y-SPP جهش را نشان می‌دهد، که نشان می‌دهد که برخی از انرژی های حالت هسته به فیلم طلایی منتقل می‌شود. اما برای حالت-x pol هیچ تناقضی وجود ندارد.

۳. نتایج شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل

حساسیت حسگرها پارامتر مهمی است که می توان آن را با شیفت رزونانس و یا تغییر شاخص انکساری آنالیت(ماده مورد تجزیه) محاسبه نمود. حساسیت سنسور S_λرا می توان به صورت زیر بدست آورد :

$$S_\lambda(nmRIU^{-1}) = \Delta\lambda_{speak}/\Delta n \qquad 5$$

که در آن $\Delta\lambda_{speak}$، میزان جابه جایی طول موج رزونانس و Δnنیز تغییر آنالیت RI است.

شکل ۳ (الف) میزان شیفت نقطه ی پیک تلفات را با تغییر شاخص های انکساری مختلف آنالیت از ۱,۴۰ تا ۱,۴۳ نشان می‌دهد. واضح است که طول موج رزونانس با افزایش مقدار RI آنالیت به رنگ قرمز شیفت پیدا می‌کند. نتایج برازش عددی در شکل ۳ (b) نشان داده شده است. ضریب تعیین تعدیل شده ۰,۹۷۹۸۶ است. داده های دقیق تر در جدول ۱ نشان داده می شوند. شیب منحنی، حساسیت حسگر را نشان می دهد و منحنی حساسیت با مقادیر مختلف RI آنالیت در شکل ۳ (c)

نشان داده شده است.

رزولوشن حسگر به صورت زیر تعریف می شود:

$$R = \Delta n \Delta\lambda_{min}/\Delta\lambda_{speak} \quad (6)$$

که در آن، مقدار Δn میزان تغییر شاخص انکساری مایع در آنالیت است. $\Delta\lambda_{min}$ حداقل میزان رزولوشن طیفی است و با در نظر گرفتن مقدار $\Delta\lambda_{min} = 0.1$ نانومتر، $\Delta\lambda_{speak}$ میزان جابه جایی پیک رزونانس خواهد بود. سپس مقدار رزولوشن حسگر برابر با $RIU 3.5 \times 10^{-8}$ محاسبه می‌شود.

نسبت سیگنال به نویز(SNR) ، پارامتر مهم دیگری برای اندازه گیری مشخصات حسگر است. این مقدار را می توان با استفاده از شایستگی عددی (FOM) به دست آورد، که به صورت تعریف می‌شود :

$$FOM = \frac{S_\lambda}{FWHM} \quad (۷)$$

که در آن مقدارFWHM ، عرض کامل در نیمه ی حداکثر طیف است. S_λ نیز میزان حساسیت حسگر است.

شکل ۴ تغییرات طیف تلفات را در ضخامت های مختلف فیلم طلا نشان می‌دهد که در آن مقدار RI آنالیت برابر با $n = 1.42$ است. همان طور که می‌بینیم، مقدار پیک تلفات به تدریج کاهش یافته و مقدار FWHM با افزایش ضخامت فیلم طلا، افزایش می یابد. با این حال، تحقیقات نشان می‌دهد که حساسیت حسگر پیشنهادی به دلیل محدودیت عمق پوست در پلاسمون های سطح کاهش یافته است [۲۰]. در اینجا، ضخامت فیلم طلا برابر با ۳۵ نانومتر انتخاب شده است تا از حساسیت و SNR خوب، اطمینان پیدا کنیم.

شکل ۵، تغییرات طیف تلفات را با تغییر قطر حفره های بزرگ $d_1 = 2.0\ \mu m$، $2.4\ \mu m$ و $2.6\ \mu m$نشان می‌دهد که در آن مقدار RI آنالیت برابر با $n = 1.42$ است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقدار پیک تلفات تغییرات اندکی داشته و طول موج رزونانس با افزایش مقدار قطر حفره بزرگ d_1 ، به سمت منحنی آبی رنگ شیفت پیدا می‌کند.

شکل ۶ تغییرات طیف تلفات را با تغییر قطر حفره های کوچک $d_2 = 0.8\ \mu m$ ، $1\ \mu m$ و $1.2\ \mu m$ نشان می‌دهد که در آن، مقدار RI آنالیت $n = 1.42$ است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار پیک تلفات کاهش یافته و طول موج رزونانس نیز با افزایش قطر d_2 دارای شیفت ناچیزی در قرمز است؛ زیرا نور دارای نشتی کمتری به روکش است و با افزایش قطر حفره های کوچک، به تدریج کاهش می‌یابد.

تأثیر ارتفاع های مختلف، از شیار تا سطح هسته با مقدار RI آنالیت $n = 1.42$ در شکل ۷ نشان داده شده است. واضح است که مقدار پیک تلفات کاهش یافته و طول موج رزونانس نیز با افزایش مقدارh ، شیفت به قرمز می‌یابد. از آنجا که ارتفاع شیار تا هسته افزایش می‌یابد، برای حالت هسته و جفت شدن فیلم طلا سخت تر شده و انرژی بیش-تری در سطح هسته نگهداری می‌شود تا میزان تلفات کاهش یابد.

علاوه بر این، تاثیر طیف تلفات با عرض شیارهای مختلف و با مقدارRI آنالیت $n = 1.42$ در شکل ۸ مورد بحث قرار گرفته است. همانطور که عرض شیار افزایش می‌یابد، مقدار پیک تلفات نیز کاهش یافته و طول موج رزونانس به قرمز شیفت می‌یابد؛ زیرا با افزایش عرض شیار، سطح اتصال(جفت شدگی) بین هسته و فیلم طلا افزایش یافته و میزان تلفات نیز افزایش می‌یابد.

حسگر پیشنهادی با برخی از حسگرهای قبلی مقایسه شده و داده های خاص در جدول ۲ نشان داده شده است.

۴. ذنتیجه‌گیری

در این مقاله، یک حسگر شاخص انکساری فیبر نوری با شیارهای میکروساختار همراه با فیلم طلای نانو و براساس رزونانس پلاسمون سطح پیشنهاد شده است. ویژگی‌های حسگر توسط FEM و SBC تجزیه و تحلیل شده است. حسگر پیشنهادی می‌تواند آنالیت را در محدوده ۱,۴۰ تا ۱,۴۳ اندازه‌گیری کند.

نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد، زمانی که قطر حفره‌های بزرگ هوایی $d_1 = 2.0\ \mu m$ ، قطر حفره های کوچک هوایی $d_2 = 1.2\ \mu m$ ، ضخامت فیلم طلا $t = 35\ nm$، مقدار ارتفاع از هسته تا شیار $h = 4.0\ \mu m$ و عرض شیار $d_x = 3\ \mu m$ باشد، حداکثر میزان حساسیت، بالای 28,600 nm/RIU است و رزولوشن حسگر $RIU 3.5 \times 10^{-8}$ و ضریب تعیین تعدیل شده هم 0.97986 است. در مقایسه با حسگرهای موجود در گزارش‌های قبلی، حسگر پیشنهادی دارای میانگین حساسیت بالایی می‌باشد. نمونه‌ی حسگر پیشنهاد شده، به سادگی تولید و استفاده می‌شود و در زمینه‌ی حساسیت زیستی قابل رقابت می‌باشد.

۵. مرجع

[1] Jiří Homola, S.S. Yee, G. Gauglitz, Surface plasmon resonance sensors: review,Sensors Actuators B Chem. 54 (1–2) (1999) 3–15

[2] B.D. Gupta, R.K. Verma, Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors:principle, probe designs, and some applications, J. Sensors 2009 (2) (2009) 12.

[3] E.K. Akowuah, et al. A highly sensitive photonic crystal fibre (PCF) surface plasmonresonance (SPR) sensor based on a bimetallic structure of gold and silver. IEEE,International Conference on Adaptive Science & Technology, IEEE, 2012, 121-125.

[4] M.J. Gander, et al., Experimental measurement of group velocity dispersion inphotonic crystal fibre, Electron. Lett. 35 (1) (1999) 63–64.

[5] N.A. Mortensen, et al., Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers, Optics Lett. 28 (6) (2003) 393.

[6] C. Jacobsen, et al., Low-loss photonic crystal fibers for transmission systems and their dispersion properties, Optics Express 12 (7) (2004) 1372–1376.

[7] Meisong Liao, et al., A highly non-linear tellurite microstructure fiber with multiring holes for supercontinuum generation, Optics Express 17 (18) (2009) 15481.

[8] A. Ortigosablanch, et al., Highly birefringent photonic crystal fibers, Optics Lett. 25 (18) (2000) 1325–1327.

[9] K. Saitoh, et al., Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion, Optics Express 11 (8) (2003) 843–852.

[10] Yuanyuan Wang, et al., A super narrow band filter based on silicon 2D photonic crystal resonator and reflectors, Optics Commun. 363 (2016) 13–20.

[11] Shijie Zheng, M. Ghandehari, J. Ou, Photonic crystal fiber long-period grating absorption gas sensor based on a tunable erbium-doped fiber ring laser, Sensors Actuators B Chem. 223 (2016) 324–332.

[12] Mohammad Reza Almasian, K. Abedi, A proposal for optical WDM using embedded photonic crystal ring resonator with distributed coupling, Phys. E: Low-dimensional Systems Nanostruct. 79 (2016) 173–179.

[13] Wen Ying Yao, et al., Flat-topped hollow laser beams can be obtained by using the multi-core photonic crystal fiber mixed with GeO2, Optik – Int. J. Light Electron. Optics 126 (23) (2015) 3761–3766.

[14] Ming Tian, et al., All-solid D-shaped photonic fiber sensor based on surface plasmon resonance, Optics Commun. 285 (6) (2012) 1550–1554.

[15] Rahul Kumar Gangwar, V.K. Singh, Highly sensitive surface plasmon resonance based D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor, Plasmonics (2016) 1–6.

[16] P. Peng, et al., Combined AFM nano-machining and reactive ion etching to fabricate high aspect ratio structures, J. Nanosci. Nanotechnol. 10 (11) (2010) 7287.

[17] I.H. Malitson, Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica*, J. Optical Soc. Am. 55 (1965) 1205–1208.

[18] Alexandre Vial, et al., Improved analytical fit of gold dispersion: application to themmodeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method, Phys. Rev. B Condensed Matter 71 (8) (2005) 85416.

[19] Z. Zhang, Y. Shi, B. Bian, J. Lu, Dependence of leaky mode coupling on loss in photonic crystal fiber with hybrid cladding, Optics Express 16 (3) (2008) 1915–1922.

[20] J. Homola, Present and future of surface plasmon resonance biosensors, Anal. Bioanal. Chem. 377 (3) (2003) 528–539.

[21] Xia Yu, et al., A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor, J. Optics 12 (1) (2010) 015005.

[22] N. Luan, et al., Surface plasmon resonance sensor based on D-shaped microstructured optical fiber with hollow core, Optics Express 23 (7) (2015) 8576–8582.

طراحی، ساخت و آزمون پایه‌های بتنی پیش‌تنیده H شکل شبکه توزیع برق

علی‌اصغر ذکاوتی[۱]، علیرضا رهنورد[۲]

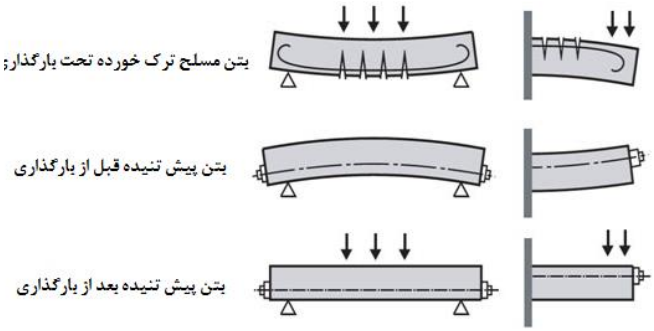
[۱]گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، azekavati@nri.ac.ir
[۲]گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو ، تهران، ایران، arehnavard@nri.ac.ir

چکیده: یکی از مهمترین و پرمصرفترین مولفه های شبکه توزیع، پایه های هوایی انتقال برق شبکه توزیع است. انواع مختلفی از پایه های هوایی در نقاط مختلف ایران استفاده شده است که یکی از پرکاربردترین آن‌ها پایه H شکل بتنی چهارگوش است. در کشورهای توسعه یافته، پایه های بتنی معمولی بدلیل هزینه بالا و عمر مفید کوتاه به ندرت تولید می شود و پایه های پیش تنیده جایگزین آن شده است. استفاده از بتن پیش تنیده در پایه های بتنی موجب افزایش کیفیت و عمر پایه می‌شود و میزان فولاد مصرفی و حجم بتن نسبت به مورد مشابه سنتی در این نوع پایه ها بدون کاهش در مقاومت اسمی و نهایی آن به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. در این تحقیق با هدف حفظ کارگاههای متعدد موجود ساخت پایه های بتنی H شکل چهارگوش، رویه طراحی، ساخت و آزمون یک نمونه پایه بتنی پیش‌تنیده H شکل با رده مقاومتی ۱۲۰۰-۱۲ ارائه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد میتوان با حفظ قالب های موجود و عدم تغییرات پیچیده در خط تولید پایه‌های سنتی اچ شکل، طرح این نوع پایه را بر اساس بتن پیش تنیده ارائه نمود بطوریکه علاوه بر افزایش عمر و کیفیت پایه، طرح پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ نسبت به طرح H شکل معمولی مشابه، ۲۸٪ کاهش هزینه مصالح و ۱۶٪ کاهش وزن خواهد داشت.

کلید واژه: *بتن پیش‌تنیده، پایه هوایی، شبکه توزیع، پایه H شکل، استرند، آزمون کشش*

۱. مقدمه

عوامل مهمترین ضعف بتن، ضعف در کشش می باشد. تدابیری که می توانند ضعف کششی بتن را برطرف کنند معمولا یا با کاهش تنش کششی و یا با حذف کلی کشش وارده و تبدیل آن به تنش فشاری، اتخاذ می شوند. موثرترین روش موجود در صنعت برای این مهم، استفاده از ایجاد فشار زودرس بر بتن به منظور خنثی کردن نیروی کششی می باشد. نام این عمل را "پیش-تنیدگی" نهاده اند. پیش تنیدگی عبارت است از ایجاد یک تنش ثابت دائمی در یک عضو بتنی به نحو دلخواه و به اندازه لازم، به طوری که در اثر این تنش مقداری از تنش ها و ترکهای کششی ناشی از بارهای وارد در این عضو خنثی شده و در نتیجه مقاومت کششی آن افزایش پیدا می کند. شکل ۱ مفهوم پیش‌تنیدگی را با بزرگنمایی رفتار یک نمونه تیر ساده و طره‌ای شکل نشان می‌دهد.



شکل ۹: مفهوم پیش تنیدگی

فِریسینت در دهه ۱۹۳۰ توانست برای اولین بار از بتن بصورت پیش‌تنیده در ساخت پایه ها استفاده کند. از سوی دیگر شاید بتوان آغاز نیاز روز افزون به بتن پیش تنیده برای استفاده در پایه های

توزیع را به دوران جنگ جهانی دوم ربط داد؛ زمانی که در اثر جنگ، فولاد ساختمانی نایاب شده بود، استفاده تجاری از این محصول از دهه ۵۰ روشن تر شد. در اوایل دهه ۶۰ میلادی نیز بتن پیش تنیده در آمریکا برای اولین بار بصورت صنعتی در درون پایه های توزیع نیرو مورد استفاده قرار گرفت و تا امروزه در تولید این پایه ها مورد استفاده قرار می گیرد[۱]. امروزه در اکثر کشورهای پیشرفته دنیا از جمله آمریکا، کانادا، سوئیس، ژاپن، استرالیا، فرانسه و آفریقای جنوبی از بتن پیش تنیده برای ساخت پایه های توزیع استفاده می شود. باتوجه به برتری های موجود در بتن پیش تنیده نسبت به بتن مسلح معمولی، قطعا می توان انتظار داشت که صنعت برق کشور نیز به این ماده ساختمانی ارزشمند توجه نشان داده باشد. مزایای متعددی را می توان برای چنین پایه هایی برشمرد؛ در زیر به تعدادی از آنها اشاره می شود:

- عمر مفید بیشتر
- هزینه نگهداری پایین تر
- پایداری بالاتر در برابر عوامل محیطی
- کاهش وزن فولاد مصرفی و حجم بتن و در نتیجه کاهش وزن پایه
- کاهش هزینه ساخت
- مزایای زیست محیطی

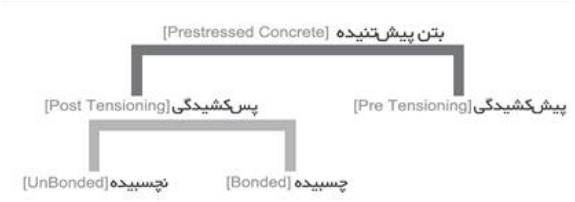
منظور از مزایای زیست محیطی کاهش وزن پایه ها و به دنبال آن کاهش حمل و نقل؛ افزایش عمر مفید و به دنبال آن کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری و در آخر کاهش حجم میلگرد و مصالح مصرفی و در نتیجه کاهش آلایندگی کارخانه تولیدی می باشد.



شکل ۱۰: پایه بتنی پیش تنیده چهارگوش شبکه توزیع نیوزلند و فرانسه [۲]

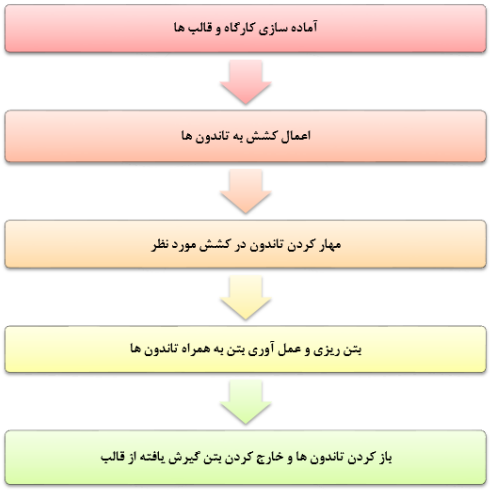
۲.روش‌های ساخت بتن پیش تنیده

نیروی پیش تنیدگی را می توان به طرق مختلف به یک پایه بتنی وارد کرد. پیش تنیدگی در دو روش کلی پیش کشیدگی و پس کشیدگی تقسیم بندی می شود. بدین معنی که عملیات کشش کابلها می تواند به ترتیب پیش از بتن ریزی یا پس از بتن ریزی انجام شود. در صورتی که ابتدا تاندون ها تحت کشش قرار گرفته و سپس بتن ریزی صورت گیرد، فرآیند همانطور که از نام آن پیداست پیش کشیده کردن نامیده خواهد شد. درصورتی که تاندون‌ها بعد از سخت شدن بتن کشیده شوند، فرآیند پس کشیدگی نام خواهد گرفت. فرآیند پس کشیدگی خود در دو دسته کلی جای خواهد گرفت (مطابق شکل ۳).



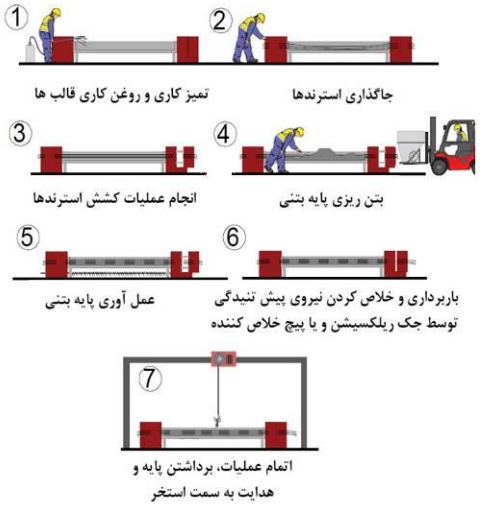
شکل ۱۱: دسته بندی کلی برای نحوه پیش‌تنیده کردن بتن

در این تحقیق از روش پیش کشیدگی برای پیش‌تنیده کردن بتن پایه استفاده شده است. مراحل کلی تولید پایه های پیش‌تنیده را می توان در قالب روند شکل ۴ نمایش داد.



شکل ۱۲: مراحل تولید پایه های پیش‌تنیده

شکل ۵ مراحل مصور تولید پایه بتنی پیش‌تنیده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: شمای یک کارگاه مجهز به تولید پایه های پیش تنیده

۳.طراحی پایه های بتنی پیش تنیده

پایه های پیش تنیده در این تحقیق با هدف کاهش وزن تمام شده و در نتیجه هزینه مصالح و نیز هزینه حمل، طراحی شده است بطوریکه با استفاده از مزایای عملیات پیش تنیدگی با حفظ رده مقاومتی از قالب های یک رده پایین‌تر نسبت به طرح H معمولی استفاده شده است. به عنوان نمونه، با استفاده از قالب پایه ۸۰۰-۱۲، ظرفیت و مقاومت تراز بالاتر یعنی مقاومت اسمی ۱۲۰۰ کیلوگرم حاصل شده است.

مواد و مصالح مورد استفاده

در پایه های پیش تنیده مورد نظر این تحقیق از مصالح مصرفی همچون سیمان، سنگدانه، آب، استرند و میلگرد استفاده شده است. در این بخش این مواد مورد بررسی قرار گرفته و شرایط و کیفیت مورد نیاز هریک جهت رسیدن به محصول نهایی با کیفیت، ارائه می گردد. لازم به ذکر است که کیفیت بالای محصولات (در کنار روش اجرای صحیح ساخت) تاثیر مستقیمی بر تامین طول عمر مفید بهره برداری پایه دارد. سیمان مصرفی از نوع پرتلند (تیپ۲) با حداقل عیار ۴۵۰ kg/m3 می‌باشد. بطور عمومی مشخصات مصالح مصرفی بایستی با مشخصات و تعاریف پیشنویس دستورالعمل "تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمونهای پایه های بتنی پیش تنیده چهارگوش" حاصل از مرجع [۳] مطابقت داشته باشد.

تاندون مورد استفاده در تحقیق فوق از نوع کابل۲ و از نوع هفت رشته‌ای و حداقل مقاومت تسلیم مجاز آنها برابر با ۱۷۲۵ مگاپاسکال می‌باشد و میلگردها عرضی یا سیم های فولادی (خاموت) بایستی از نوع A-I با حداقل مقاومت کششی نهایی ۳۶۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع باشد.

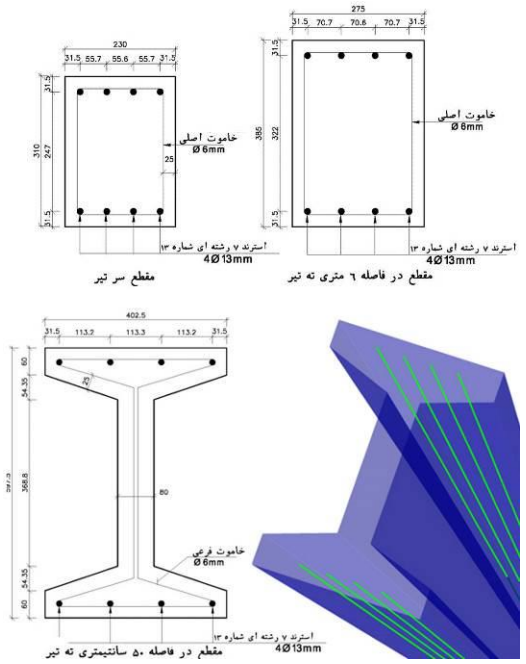


شکل ۱۴: کابل هفت رشته ای (PC Strand)

[۲] PC Strand

۳,۱. مدلسازی و طراحی پایه

مدلسازی پایه در نرم افزار SAP2000 انجام شده و طراحی مطابق ضـوابط آیین نامه ACI318-11 [۴] صـورت گرفته اسـت. برای نمونه نتایج مدلسـازی و طراحی پایه بتنی پیش تنیده ۱۲۰۰-۱۲ در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ابعاد مقطع فوق با ابعاد ۸۰۰-۱۲ طرح H معمولی همخوانی دارد و این مزیت موجب کاهش حجم بتن و سـبک شـدن پایه نسـبت به طرح‌های سابق شده است.



شـکل ۱۵: مدل پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ و نتایج طراحی

۴. تولید پایه و آزمون کشش

۴,۱. تولید پایه

پس از انجام کلیه مراحل طراحی، تولید پایه بین دو سـکو با قابلیت پیش کشیدگی استرند انجام می پذیرد. این سکو با هدف کوچک سازی هرچه بیشتر فضای اشغال شده جهت پیش تنیده کردن پایه ها طراحی شده است. در این سکو قابلیت اجرای پایه پیش‌تنیده در رده های مختلف مقاومتی وجود دارد و گزینه‌های مختلف اجرایی به تناسـب کارگاه‌ها و میزان تولید پایه‌ها قابل طراحی اسـت. یک طرف این سکو با ایجاد سوراخ های لوبیایی شکل متحرک بوده که بعد از اتمام عملیات پیش تنیدگی با خلاص کردن نیروهای پیش تنیده توسط پیچ و مهره و یا جک ریلکسیشن به سمت جلو حرکت خواهد کرد و نیروها آزاد می شود و طرف دیگر ثابت است.



شکل ۱۶: سکوی تولید پایه بتنی پیش تنیده (قسمت متحرک)

شکل ذیل تولید پایه ۱۲۰۰-۱۲ در قالب ۸۰۰ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: عملیات کشش کابل های (استرند) هفت رشته ای

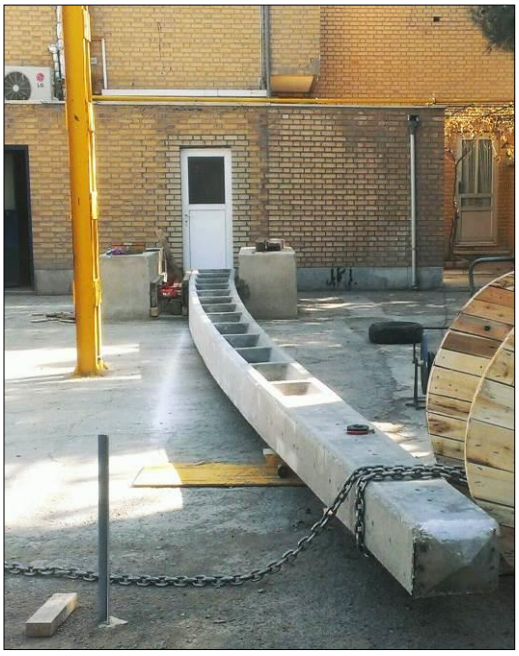


شکل ۱۸: کنترل جانمایی خاموت‌ها (بالا) و بتن ریزی پایه پیش تنیده (پایین)

در کنار احداث سکوهای نگهدارنده، تجهیزات اساسی عملیات پیش‌تنیدگی شامل گوه و گیره های نگهدانده ا سترند، جک اعمال کشش و پمپ می‌باشد که موارد فوق در داخل کشور قابل تامین است. در این تحقیق بعد از مرحله ساخت، عمل آوری پایه مطابق ضوابط [۳] انجام شده و در نهایت پایه جهت انجام آزمون آماده می شود. بطور خلا صه بای ستی ا شاره نمود ا ستفاده از روش عمل آوری با بخار برای تولید پایه های بتنی پیش تنیده ضروری ا ست و با توجه به ضرورت بازدید ناظر شرکت توزیع از فرآیند تولید و اطمینان از مطابقت حداقل زمان عمل آوری با تاریخ مندرج بر روی پایه‌ها، استفاده از دیگر روش‌های عمل‌آوری در کارگاه ممنوع می‌باشد.

۴,۲. آزمون کشش

پس انجام آزمون‌های نمونه‌ای بتن و بررسی و پذیرش اولیه پایه مطابق ضوابط پیش‌نویس دستورالعمل نوبت به اجرای آزمون کشش پایه می‌رسد. اجرای آزمون برای سه سطح مقاومت اسمی، ارتجاعی و نهایی برای پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ در قالب ۸۰۰ انجام پذیرفت و در نهایت آزمون پایه مذکور پس پذیرفته شدن مراحل اسمی و ارتجاعی، در مرحله نهایی با تحمل ۳۶۰۰ کیلوگرم نیرو و تغییر مکان ۷۰ سانتیمتر بدون گسیختگی با موفقیت پایان یافت و پایه به لحاظ عملکرد مورد پذیرش قرار گرفت.



شکل ۱۹: آزمون پایه پیش تنیده ۱۲۰۰-۱۲

۵. مقایسه اقتصادی

در این بخش با توجه به نتایج طراحی و آزمون کشش، دو نوع پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ (در قالب‌بندی ۸۰۰-۱۲) و پایه چهارگوش (H) معمولی ۱۲۰۰-۱۲ به لحاظ میزان مصالح مصرفی مقایسه اقتصادی می‌شوند.

در جدول ۱ میزان مصالح مصرفی و وزن دو نوع پایه با توجه به

نتایج طراحی، با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، صرفه جویی در هزینه تمام شده و کاهش وزن پایه به ترتیب ۲۸٪ و ۱۶٪ است.

جدول ۱: مقایسه پایه پیش تنیده و پایه H مسلح معمولی ۱۲ متری با مقاومت اسمی ۱۲۰۰ کیلوگرم نیرو

نوع پایه	فولاد طولی	حجم بتن	صرفه جویی در	وزن پایه	میزان کاهش
پیش	۷۲	۱,۱۸	٪۲۸	۲۹۰۴	٪۱۶
اچ	۲۳۰	۱,۳۴		۳۴۴۶	

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، بعد از ذکر مزایای قابل توجه بتن‌های پیش‌تنیده، روش‌های طراحی و ساخت پایه های بتنی پیش‌تنیده مورد بررسی قرار گرفت. دو طرح پیشنهادی پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ (اجرا شده در قالب ۸۰۰-۱۲) و پایه چهارگوش H شکل معمولی ۱۲۰۰-۱۲ به لحاظ فنی و اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج زیر را دربر داشت:

با توجه به امکان سنجی صورت گرفته ، تمامی تجهیزات مورد نیاز جهت تولید پایه پیش‌تنیده در داخل کشور موجود می‌باشد و مجهز شدن کارگاه‌های داخل کشور با حفظ قالب های موجود امکان‌پذیر است بطوریکه تغییر اصلی لازم برای تبدیل خط تولید پایه های عادی به نوع پیش تنیده، احداث سکوهای نگهدارنده و تهیه تجهیزات مربوط به کشش استرند می‌باشد.

نتایج ساخت پایه پیش‌تنیده حاکی از عملکرد مناسب سکوهای طراحی شده داشت بطوریکه با توجه به ابعاد و فضای اشغال اندک آن از مزایای اجرایی قابل توجهی برخوردار است.

آزمون پایه پیش‌تنیده پس از پذیرفته شدن مراحل اسمی و ارتجاعی، در مرحله نهایی با تحمل ۳۶۰۰ کیلوگرم نیرو و تغییر مکان ۷۰ سانتیمتر بدون گسیختگی با موفقیت پایان پذیرفت.

برای نمونه، پایه ۱۲۰۰-۱۲ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد، طرح پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ نسبت به طرح H شکل مشابه، ۲۸٪ کاهش هزینه مصالح و ۱۶٪ کاهش وزن خواهد داشت.

۶. مرجع

[1] Rodgers Jr., T. E. (1984). “Prestressed Concrete Poles: State-of-the-Art.” PCI Journal, (September-October), 53–103.

[2] "Busck Prestressed Concrete", New Zealand's leading Concrete power pole supplier, busck.co.nz

[۳]"تدوین دانش فنی طراحی، ساخت و آزمون نوعی پایه‌های بتنی پیش تنیده H شکل و نظارت بر اجرای یک نمونه پایلوت" گروه سازه‌های صنعت برق، ۹۵

[4] "Building Code Requirements for Structural Concrete" ACI318-11 American Concrete Institute, 2011

طراحی المانهای فیلتر با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمدحسین رضوانی[۱]

امین شیخ نجدی [۲]

[۱]فارغ‌التحصیل دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، mhr.rezvani@gmail.com
[۲] استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، najdi@iaud.ac.ir

چکیده: در این مقاله سعی شده تا با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهترین المانها را برای یک فیلتر اکتیو و یا پسیو پیدا کنیم.در واقع مامی توانیم با داشتن خروجی یک شبکه الکتریکی و استفاده از معادلات حاکم بر آن شبکه الکتریکی المانهای مجهول در آن را با استفاده از این سیستم بدست آوریم. در این مقاله که ما بطور خاص بر روی یک فیلتر میانگذر بحث شده تابع هزینه را به صورت ترکیبی از فرکانس مرکزی ، پهنای باند و بهره فیلتر در نظر گرفته ایم. همچنین برای اینکه تمام مقادیر دلخواه با دقت مناسب بدست آیند موارد فوق را به صورت نرمالیزه در تابع هزینه لحاظ کرده ایم. خصوصیت مهم روش فوق این است که حجم محاسبات تحلیلی ریاضی که توسط کاربرانجام می شود را فوق العاده کم کرده و فقط محاسبه تابع تبدیل مورد نیاز است همچنین احتمال خطا در محاسبات دستی را نیز کاهش می دهد .

کلید واژه‌ها: *الگوریتم ژنتیک، نسل، تابع هزینه ، نرمالیزه، جهش*

۱. مقدمه

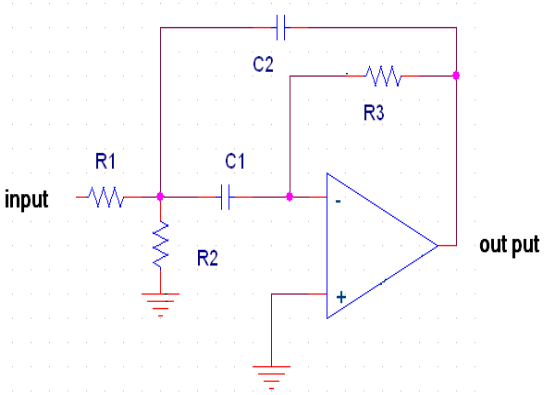
امروزه کاربردهای هوش محاسباتی در زمینه های مختلف گسترش یافته و نمونه های جدید با الگو برداری از طبیعت پیرامون جایگزین روشهای قبلی میشود. هر کدام از این روش ها به نوعی از حجم محاسبات ریاضی کم کرده و سرعت دست یابی به پاسخ مطلوب و دقیق تر را افزایش میدهد. الگوریتم ژنتیک که با الگو بر داری از اصل وراثت بنیان گذاری شده و با تکیه برجهش (mutation)و تزویج (crossover) که ماده خام تغییر و تکامل در نسل های موجودات بوده یکی از قوی ترین ابزار برای حل مسائل ریاضی پیچیده می بلشد . ما دراین مقاله سعی داریم از این روش برای طراحی فیلتر های مختلف استفاده کنیم.

۲. روش تعیین المان‌ها

ابتدا تابع تبدیل یک فیلتر فعال میانگذر مرتبه ۲ را طبق معادله(۱) در نظر میگیریم:

$$H(s)=\frac{-\frac{H_p}{Q}\frac{s}{\omega_0}}{1+\frac{1}{Q}\frac{s}{\omega_0}+\frac{s^2}{\omega_0^2}} \qquad (1)$$

که Hp بهره فیلتر در فرکانس مرکزی، Q ضریب کیفیت فیلتر و ω_0 فرکانس مرکزی فیلتر بر حسب رادیان بر ثانیه میباشد. اگر از مدار شکل (۱) استفاده شود.



شکل ۱: مدار یک فیلتر میانگذر

با توجه به تابع تبدیل مدار فوق و معادله(۱) مقادیر فرکانس مرکزی بر حسب هرتز(f_0)، پهنای باند (Bw) بر حسب هرتز و بهره (Hp) به ترتیب از معادلات (۲) و (۳) و (۴) بدست می آیند:

$$f_0 = (\frac{1}{2\pi})\sqrt{\frac{R1+R2}{R1R2R3C1C2}} \quad (۲)$$

$$Bw = (\frac{1}{2\pi})\frac{C1+C2}{R3C1C2} \quad (۳)$$

$$Hp = \frac{R3C1}{R1(C1+C2)} \quad (۴)$$

در اینجا ۵ پارامتر مجهول و سه معادله وجود دارد که پیدا کردن مجهولات را دشوار میکند. ما در این مقاله با استفاده از یک تابع که آن را Gaf می نامیم می خواهیم در نرم افزار مطلب به کمک الگوریتم ژنتیک این مشکل را حل کنیم. برای نوشتن Gaf تابعی تعریف میکنیم که ورودی آن ۵ پارامتر مجهول (مقاومت ها و خازن ها) می باشند خرو جی Gaf تابع هزینه می باشد.در واقع تابع هزینه, مقدار خطای مقادیر مطلوب از مقادیر هر نسل الگوریتم ژنتیک می باشد برای تعریف تابع هزینه گزینه های متفاوتی در اختیار داریم. یکی از حالت ها این است که مقدار خطا را مجموع قدر مطلق تفاضلات مقادیر مطلوب و مقادیری که الگوریتم ژنتیک در هر نسل به ما می دهد در نظر گیریم. به عنوان مثال اگر فرکانس مرکزی مطلوب ۱۰ کیلوهرتز، پهنای باند ۴ کیلوهرتز و بهره ۲ باشد تابع هزینه به شکل معادله (۵) خواهد بود:

$$Cost = |10000 - f_0| + |Bw - 4000| + |Hp - 2| \quad (۵)$$

حالت دوم این است که مقدار خطا را مجموع توان دوم های تفاضلات مقادیر مطلوب و مقادیری که الگوریتم ژنتیک در هر نسل به ما می دهد در نظر گیریم. برای مقادیر مثال فوق تابع هزینه به شکل معادله (۶) زیرخواهد بود:

$$Cost = (10000 - f_0)^2 + (4000 - Bw)^2 + (Hp - 2)^2 \quad (۶)$$

تفاوت دو حالت فوق در این موضوع می باشد که مقدار خطای حالت دوم برای هر نسل چندین برابر مقدار خطای حالت اول می باشد. اما مشکل اصلی دو حالت فوق این است که تاثیر پارامترهای مختلف به صورت یکسان در تابع هزینه لحاظ نشده است برای مثال اگر الگوریتم را با تابع هزینه فوق اجرا کنیم مقادیر فرکانس مرکزی و پهنای باند و بهره به صورت زیربدست می آید:

$$f_0 = 1.0033e+004$$
$$Bw = 7.9631e+003$$
$$Hp = 14.1327$$

همانطور که مشاهده می کنیم مقدار فرکانس مرکزی چون عدد بزرگتری نسبت به دو پارامتر دیگر است با دقت قابل قبولی بدست آمده اما هر چه مقدار پارامتر کوچکتر می شود دقت جواب آن نیز کاهش می یابد مثلا چون بهره مطلوب عددی کوچک در مقابل فرکانس بوده , جوابی که برای آن بدست آمده به هیچ وجه مناسب نیست

برای رفع این مشکل ترم های تابع هزینه را باید نرمالیزه کنیم یعنی کاری کنیم که محدوده خطای هر ترم بین ۰ و۱ قرار گیرد. مثلا برای حالت اول تابع هزینه را به شکل معادله (۷) تغییر می دهیم:

$$Cost = \left|\frac{10000 - f_0}{10000}\right| + \left|\frac{4000 - Bw}{4000}\right| + \left|\frac{Hp - 2}{2}\right| \quad (۷)$$

با تابع هزینه فوق اگر الگوریتم ژنتیک را در حالتی اجرا کنیم که جمعیت اولیه را برابر ۱۰۰۰۰ و مقدار CrossOver را در حالت Intermediate و همچنین مقیاس جهش را به مقدار ۸,۲ قرار

دهیم و تعداد نسلها را ۴۰۰۰ در نظر بگیریم و اجرا کنیم مقادیر زیر بدست می آیند:

R1=0.3751 R2=0.0027 R3=0.7423 C1=0.0023
C2= 0.000054978

مقادیر فرکانس مرکزی و پهنای باند و بهره به صورت زیر است:

$f_0 = 1.0033e+004$

$Bw = 3.9931e+003$،

$Hp = 1.9327$

همانطور که مشاهده میشود مقادیر فرکانس و گین و پهنای باند با دقت بسیار خوبی بدست امده اند،اما ضعف اصلی منطقی نبودن مقادیر مقاومت و خازن ها می باشد. برای رفع این مشکل می توان در صورتیکه از مطلب های نسخه 2600a استفاده می کنیم ، میتوانیم در قسمت Constrain برای هر کدام از پارامتر های مقاومت و خازن محدوده مشخص کنیم..مثلا مقاومت ها بزرگتر از ۱۰ اهم باشند و خازنها کوچکتر از ۰,۱ میکرو فاراد باشند. این یک پیشنهاد مناسب است اما باید در نظر داشت که مقادیر بدست آمده برای مقاومت ها را میتوان با استفاده از مقاومت متغیرپیاده سازی کرد اما استفاده از خازن متغیر برای طراحی یک فیلتر به هیچ وجه منطقی نیست علاوه بر این حجم مدار با المانهای متغیر زیاد میشود. برای رفع این مشکل بهتر است از روشی استفاده کنیم که مقادیر مقاومت و خازن را به گونه ای محاسبه کند که با مقاومت های استاندارد و خازنهای استاندارد که به سادگی در دسترس ما می باشد قابل ساختن باشد.

بدین منظور دو تابع Rselect (شکل۲)و Cselect (شکل۳) را معرفی می کنیم. عملکرد دو تابع فوق بدین صورت است که ورودی آنها هر عددی باشد ، نزدیک ترین مقدار استاندارد را در خروجی به ما خواهد داد. توابع Rselect و Cselectهرکدام به ترتیب نزدیکترین مقدار استاندارد مقاومت و خازن را به تابع Gaf باز میگردانند، در واقع وظیفه این دو تابع پیدا کردن مقادیر استاندارد مقاومت و خازن در هر نسل می باشد.

شکل برنامه Rselect و Cselect به صورت زیر می باشد:

```
function z=rselect(r);
ar1=[100 120 150 180 220 270 330 390 470 560 680];
rarray=[ar1 820 ar1.*10 8200 ar1.*100 82000 ar1.*1000
    820000 ar1.*10000 10000000 15000000 22000000];
[k m]=min(abs(rarray-r));
z=rarray(m);
end
```

شکل ۲:برنامه تعیین مقاومت استاندارد(rselect)

```
function z=cselect(c);
ar1=1.0e-12.*[5 10 12 15 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47];
ar2=1.0e-12.*[50 51 56 62 68 75 82 91 100 110 120 130 150
    160 180 200 220 240 250 270 300 330 360 390 430 470];
ar3=1.0e-009.*[5 5.1 5.6 6 6.2 6.8 7.5 8 8.2 9.1 10 12 15
    18 20 27 30 33 39 40 47];
ar4=1.0e-009.*[50 56 60 68 82 100];
carray=[ar1 ar2 ar3 ar4];
[k m]=min(abs(carray-c));
z=carray(m);
end
```

شکل ۳:برنامه تعیین خازن استاندارد(cselect)

حال برای اثر دادن مقادیر استاندارد در Gaf دو روش متفاوت میتوان در پیش گرفت. روش اول این است که در ابتدای تابع Gaf اول ۵ مقدار مجهول را استاندارد کنیم و سپس مقادیر استاندارد را در تابع هزینه اثر دهیم. تکه برنامه شکل ۴ این روش را برای ما پیاده سازی میکند:

```
function Cost=Gaf(p)
r1=Rselect(p(1));
r2=Rselect(p(2));
r3=Rselect(p(3));
c1=Cselect(p(4));
c2=Cselect(p(5));
fc=(1/(2*pi))*((r1+r2)/(c1*c2*r1*r2*r3))^.5;
bw=(1/(2*pi))*((c1+c2)/(r3*c1*c2));
hp=(r3*c1)/(r1*(c1+c2));
cost=abs((4000-bw)/4000)+abs((2-hp)/2)+abs((10000-fc)/10000);
end
```

شکل ۴: برنامه تابع Gaf در حالت اول

تابع شکل ۴ تابع Gaf می‌باشد که ورودی آن ۵ پارامتر مجهول مقاومت و خازن می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌کنید

پارامترهای محهول ابتدا توسط توابع Rselect و Cselect به مقادیر استاندارد تبدیل شده و سپس به وسیله مقادیر استاندارد بهره، فرکانس مرکزی و پهنای باند در هر نسل بدست می آید و سپس مقادیر بدست آمده در تابع هزینه لحاظ میشود. روش دوم این است که پارامترهای مجهول را در ابتدا استاندارد نکنیم و مقادیر استاندارد را به صورت مستقیم در تابع هزینه لحاظ کنیم، در نتیجه Gaf به صورت شکل ۴ تغییر میکند.

در تابع شکل ۵ ماتریس p ورودی Gaf میباشد که درایه های آن به ترتیب در مقاومت ها و خازن ها قرار گرفته اند. با استفاده از این مقادیر در هر نسل فرکانس مرکزی طبق فرمول معادله (۲)، پهنای باند طبق معادله (۳) و بهره طبق معادله(۴) بدست آمده .مقادیر فوق را پس از نرمالیزه کردن طبق معادله(۷) در متغیر cost1 قرار میدهیم، همچنین برای استاندارد کردن پارامترهای ورودی مطابق تکه برنامه فوق قدر مطلق تفاضل مقدار مقاومت ها را از مقادیر استاندارد همچنین قدر مطلق تفاضل مقدار خازن ها را از مقادیر استاندارد بدست آورده و در متغیر cost2 و cost3 ذخیره می کنیم. همچنین برای نرمالیزه کردن مقادیر خطای مقاومت ها وخازن ها ، تفاضل هرکدام را بر مقادیر استانداردشان تقسیم می کنیم. حال تابع هزینه ای که برای Gaf در نظر میگیریم را به صورت مجموع ۳ متغیر cost1 ، cost2 و cost3 در نظر گرفته ایم.حال اگر الگوریتم ژنتیک را با تنظیماتی که قبلا گفته شد اجرا کنیم مقادیر زیر برای مقاومت ها و خازن ها بدست می آید .

$$R3 = 2245.49\Omega \quad R2 = 220\Omega \quad R1 = 100\Omega$$

C1=20n C2=82.05n

با استفاده از مقادیر مقاومت و خازن بدست آمده مقادیر فرکانس مرکزی، پهنای باند و بهره به فرم زیر بدست می آیند.

$$f_0 = 1.000000445360270e+004$$

$$Bw = 4.408352068943938e+003$$

$$Hp = 1.999999905739 9$$

همانطور که مشاهده می شود هر سه پارامتر پهنای باند، بهره و فرکانس مرکزی با دقت مطلوبی بدست آمده اند. همچنین مقادیر مقادیر مقاومت و خازن استاندارد می باشند. تا اینجا ما یک سیستم کامل در اختیار داریم یک پیشنهاد مناسب برای کارا تر نمودن این برنامه این است که تغیری در برنامه بوجود آوریم که پس از اجرا کردن برنامه و بدست آوردن مقادیر دلخواه بتوانیم فرکانس ویا پهنای باند و یا دیگر ترم های برنامه را بصورت دستی تغیر دهیم برای نمونه می خواهیم تابع Gaf را بگونه ای تغیر دهیم که در پایان بتوان فرکانس را بصورت دستی تغیر داد .

همانطور که مشاهده می کنید مقاومت R2 فقط در فرکانس مر کزی تاثیر دارد حال ما R2 را از بین مقاومت های استاندارد خارج میکنیم و اجازه می دهیم که مقدار R2 بصورت غیر استاندارد بدست آید در پایان بجای R2 یک مقاومت متغییر قرار می دهیم حال می توان دید که با تغیر این مقاومت فرکانس قابل تغیر است .

۳. نتیجه گیری

عملکرد سیستم فوق نشان می دهد که الگوریتم ژنتیک قادر است مقادیر المانهای هر نوع فیلتری اعم از میان گذر , بالا گذر و یا پایین گذر را با هرنوع پیچیدگی با دقت مناسب تخمین بزند در واقع اگر موضوع را بصورت کلی بررسی کنیم خواهیم دید که مدار مورد نظر می تواند فراتر از یک فیلتر باشد و پارامتر های خروجی مطلوب نیز می تواند هر کدام از ویژگی های مدار مثل توان خروجی , فرکانس تشدید و یا غیره باشد. موضوع مهم پیدا کردن مناسب ترین تابع هزینه برای خروجی مطلوب است که این تابع هزینه بسته به توپولوژی مسئله تغیر می کند .محاسبات فوق نشان می دهد که استفاده از الگوریتم ژنتیک در محاسباتی که مجهولات بیش از معادلات معلوم می باشد بسیار کارآمد است.

```
function Cost=Gaf(p)
r1=p(1);
r2=p(2);
r3=p(3);
c1=p(4);
c2=p(5);
fc=(1/(2*pi))*((r1+r2)/(c1*c2*r1*r2*r3))^.5;
bw=(1/(2*pi))*((c1+c2)/(r3*c1*c2));
hp=(r3*c1)/(r1*(c1+c2));
cost1=abs((4000-bw)/4000)+abs((2-hp)/2)+abs((10000-fc)/10000);
cost2=abs(r1-Rselect(r1))/Rselect(r1))+(abs(r2-Rselect(r2))/Rselect(r2))
+(abs(r3-rselect(r3))/Rselect(r3));
cost3=abs((c1-Cselect(c1))/Cselect(c1))+abs((c2-Cselect(c2))/Cselect(c2));
Cost=cost1+cost2+cost3;
end
```

شکل ۵: برنامه تابع Gaf در حالت دوم

۴. مراجع

[1] Randy L. Haupt and Sue Ellen, Haupt ,"PRACTICALGENETIC ALGORITHMS " , JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION,2004

[2] Oliver nelles,"Nonlinear System identification", springer-verlag berlin Heidelberg New York 2001

|۳| رسول دلیرروی فرد،"فیلتر و سنتز مدار"،انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیر کبیر ،۱۳۸۲

راه‌اندزای موتورهای تک‌فاز

سیدپرویز موسوی[۱]، مریم فریور[۲]

[۱]مربی سازمان آموزش فنی‌و حرفه‌ای کشور، اداره‌کل استان همدان، ip.adrapana2@gmail.com
[۲]مربی سازمان آموزش فنی و حرفه ای کشور، ادا کل استان اصفهان، farivar.maryam@yahoo.com

چکیده: یکی از تجهیزاتی که در مراکز صنعتی، تجاری و حتی مسکونی به کار می‌رود موتورهای الکتریکی می‌باشد. موتور الکتریکی وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. انواع مختلفی از موتورها در صنعت کاربرد دارد که یکی از آن‌ها موتور تک‌فاز است. با توجه به اهمیت شناخت این دسته از موتورها، در این مطالعه به بررسی عملکرد موتورهای تک‌فاز به صورت تخصصی پرداخته‌ایم. این مقاله شامل ۹ بخش می‌باشد که در بخش ۱ مقدمه‌ای از موتورها تشریح شده است. در بخش ۲ کنترل سلامت موتور که یکی از موارد مهم در کار است بررسی شده است. در بخش ۳ تعیین مشخصات فنی از طریق پلاک موتور تشریح شده است. در بخش‌های ۴و ۵ به ترتیب به موضوع اتصال موتورهای تک‌فاز و راه‌اندازی موتورهای تک‌فاز با کنتاکتور پرداخته‌ایم. تغییر جهت چرخش موتورهای تک‌فاز و تغییر سرعت موتورهای تک‌فاز از مباحث مهم در زمینه موتورها است که در بخش‌های ۶ و ۷ این دو موضوع پوشش داده شده است. در نهایت در بخش ۸ نتیجه گیری و در بخش ۹ مراجع ذکر شده است.

کلیدواژه‌ها: *موتور الکتریکی تک‌فاز، پلاک‌خوانی، کنتاکتور، تغییر جهت، تغییر سرعت*

۱. مقدمه

در تأسیسات مراکز صنعتی، تجاری و حتی مسکونی تجهیزات متعددی به‌کار می‌رود یکی از مهمترین این تجهیزات موتورهای الکتریکی می‌باشد، موتور الکتریکی، وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. موتورهای الکتریکی از نظر نوع جریان مصرفی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱ ـ موتورهای جریان متناوب (AC)

۲ ـ موتورهای جریان مستقیم (DC)

بیشتر موتورهایی که در تأسیسات استفاده می‌شود از نوع جریان متناوب است. موتورهای جریان متناوب، نسبت به موتورهای جریان مستقیم دارای ساختمان ساده‌تر، عمر مفید بیشتر و تعمیر نگهداری راحت‌تری است که موجب برتری اقتصادی این موتورها نسبت به موتورهای جریان مستقیم می‌شود. اما موتورهای DC از نظر امکانات گسترده کنترل‌دور و نیز گشتاور راه‌اندازی زیاد، هم‌چنان کاربردهای خاص خود را دارد.

موتورهای جریان متناوب به دو گروه کلی تقسیم می‌شود:

۱- موتورهای سه‌فاز

۲- موتورهای تک‌فاز

موتورهای تک‌فاز به چهار دسته کلی تقسیم می‌شود:

۱- موتور آسنکرون القایی تک‌فاز

۲- موتور دفعی (ربولسیونی)

۳- موتور یونیورسال

۴- موتور سنکرون با قطب دائم (رلوکتانسی – هیسترزیسی)

در موتورهای الکتریکی تک‌فاز با حرکت اولیه‌ای رتور به سمت راست یا چپ، موتور راه‌اندازی می‌شود. با ایجاد این حرکت اولیه در یک جهت، رتور در همان جهت به چرخیدن خود ادامه خواهد داد تا به سرعتی نزدیک به سرعت سنکرون برسد.

با ایجاد چرخش اولیه، حالت کارکرد موتور به صورت ژنراتوری در خواهد آمد و بنا به قانون دست راست، جریان-هایی در رتور تولید خواهد شد که این جریان‌ها، میدانی را در رتور به وجود می‌آورد که بر شار استاتور عمود است، در نتیجه گشتاوری در رتور تولید خواهد شد و موتور به چرخش خود ادامه خواهد داد.

اجرای این شیوهٔ راه‌اندازی گرچه عملی است اما مطلوب نیست و همواره راه‌اندازی خودکار موتور تک‌فاز مورد نظر است. بر این اساس موتورهای تک‌فاز مختلفی مانند موتور تک‌فاز با فاز شکسته، موتور تک‌فاز با خازن راه‌اندازی موتور تک‌فاز با خازن دائمی و موتور تک‌فاز دو خازنه طراحی می-شود.

در این فصل از مقاله، ساختمان، انواع، طرز کار و کاربردهای موتورهای آسنکرون القایی تک‌فاز و یونیورسال بررسی می-شود. محدودهٔ توان موتورهای تک فاز از $\frac{۱}{۶}$ اسب بخار تا چند اسب بخار است.

۲. کنترل سلامت

۲,۱. ساختمان موتورهای القایی آسنکرون تک‌فاز

موتورهای آسنکرون القایی تک‌فاز، چند نوع‌اند:

۱- موتور فاز شکسته[۳]

۲- موتور با راه‌انداز خازنی[۴]

۳- موتور با خازن دائم

۴- موتور دو خازنی

۵- موتور قطب چاک‌دار

شکل۱ تصویر یک موتور آسنکرون القایی تک‌فاز را نشان می‌دهد. در شکل ۲، یک موتور آسنکرون برش‌خورده نشان داده شده است.

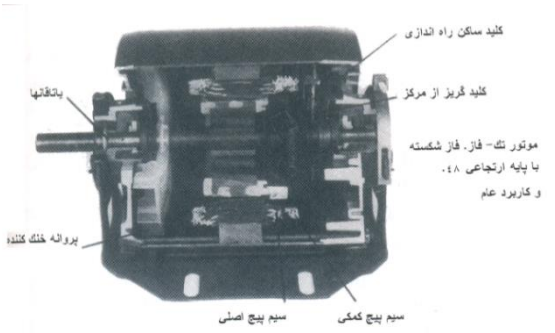
ساختمان موتورهای آسنکرون القایی تک‌فاز از دو قسمت اصلی تشکیل شده است:

۱- استاتور

۲- روتور



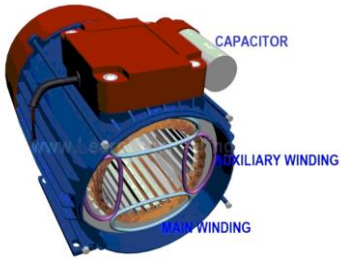
شکل ۱



شکل ۲

استاتور

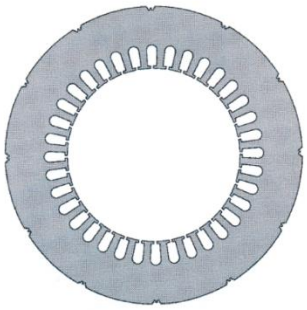
استاتور (یا قسمت ساکن) موتورهای آسنکرون تک فاز، دارای محفظه چدنی است که هسته مغناطیسی داخل آن قرار دارد و سیم‌پیچی استاتور در داخل شیارهای این هسته مغناطیسی قرار می‌گیرد. شکل ۳ استاتور یک موتور آسنکرون تک فاز را نشان می‌دهد. هسته مغناطیسی از کنار هم قرارگرفتن چندین ورق نازک فولاد سیلیسیم‌دار که نسبت به هم عایق هستند ساخته شده است. شکل ۴ یک نمونه ورق استاتور را نشان می‌دهد.



شکل ۳

[۳] - به آن، موتور با راه‌انداز مقاومتی نیز می‌گویند.

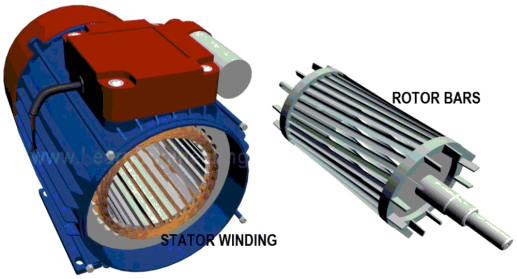
[۴] - به آن، موتور با خازن راه‌انداز نیز می‌گویند.



شکل ۴

رتور

رتور یا قسمت گردنده این موتورها، محوری فولادی است که بر روی آن یک هسته آهنی به شکل استوانه قرار دارد. این استوانه نیز از کنار هم قرار گرفتن ورق‌های نازک فولادی که نسبت به هم عایق‌اند تشکیل شده‌است. رتور موتورهای آسنکرون تک‌فاز روتور قفسی ساخته می‌شود. به‌طوری که در اطراف هسته مغناطیسی استوانه‌ای شکل، تعدادی میله آلومینیمی یا مسی قرار دارد. این میله‌ها از هر دو طرف، توسط دو حلقه هم جنس میله‌ها به‌هم وصل می‌شود. چون مجموعه این میله‌ها و حلقه‌ها شبیه به قفس است (شکل ۵)، به این نوع موتورها، موتورهای آسنکرون رتور قفسی می‌گویند.



شکل ۵

۲,۲. موتور فاز شکسته

در استاتور موتور فاز شکسته (split-phase induction motor) دو نوع سیم‌پیچ وجود دارد[۵]:

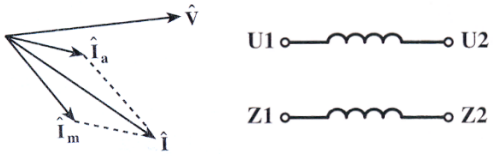
۱- سیم‌پیچ اصلی

۲- سیم‌پیچ کمکی یا راه‌انداز

شکل ۶ سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی استاتور یک موتور آسنکرون تک‌فاز را نشان می‌دهد. این دوسیم‌پیچ به صورت موازی با هم قرار می‌گیرد. بدون سیم‌پیچ کمکی، موتور آسنکرون تک فاز، میدان مغناطیسی دوار و در نتیجه گشتاور راه‌اندازی ندارد[۶]

هر چه اختلاف فاز بین جریان‌های سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی به ۹۰° نزدیک‌ترشود گشتاور راه‌اندازی موتور بیشترخواهد شد.

برای ایجاد اختلاف فاز بین جریان‌های سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی موتور فاز شکسته، مقاومت سیم‌پیچ کمکی بیشتر از سیم‌پیچ اصلی و راکتانس سیم‌پیچ اصلی و راکتانس سیم‌پیچ اصلی بیشتر از راکتانس سیم‌پیچ کمکی انتخاب می‌شود. برای این منظور، سیم‌پیچ اصلی دارای تعداد دور زیاد و سطح مقطع بزرگ و سیم‌پیچ کمکی دارای تعداد دور کم و و سطح مقطع کوچک است. در نتیجه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان سیم‌پیچ کمکی، کمتر از اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان سیم‌پیچ اصلی است. شکل ۷ نمودار برداری موتورهای فاز شکسته را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود اختلاف فاز بین جریان‌های سیم پیچ‌های اصلی و کمکی کمتر از ۹۰° است.



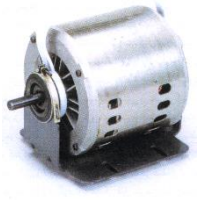
شکل ۶

شکل ۷

[۵] - و دیگر موتورهای اسنکرون تک فاز (به جز موتور قطب چاک‌دار)

[۶] - بررسی علت این موضوع، خارج از بحث این مقاله است.

سیم‌پیچ کمکی پس از راه‌اندازی و رسیدن سرعت رتور به ۷۵٪ سرعت نامی، توسط یک کلید گریز از مرکز (شکل ۸) از مدار خارج می‌شود[۷]. شکل ۹نمای ظاهری یک موتور فاز شکسته و شکل ۱۰ مدارالکتریکی این موتور را نشان می‌دهد.



(split-phase induction motor)

شکل ۹

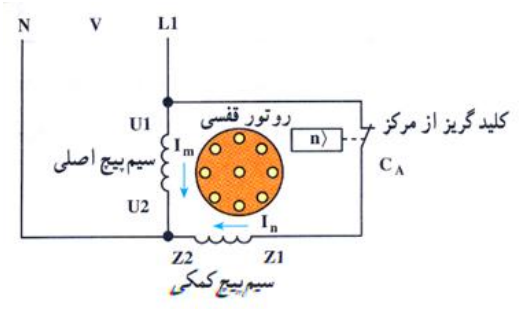


(centrifugal switch)

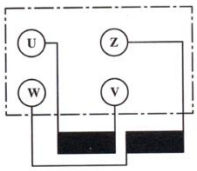
شکل ۸

بر روی تخته کلم موتورهای فاز شکسته[۸] دراستاندارد قدیم از حروف U و V برای مشخص‌کردن سرهای سیم‌پیچ اصلی و از حروفW وZ برای تعیین سرهای سیم‌پیچ کمکی استفاده می‌شود(شکل ۱۱).

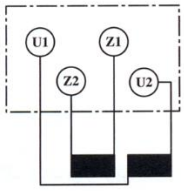
در استاندارد IEC [۹] از حروفU1 وU2 برای نشان‌دادن سرهای سیم‌پیچ اصلی و از حروفZ1 وZ2 برای مشخص کردن سرهای سیم‌پیچ کمکی استفاده می‌شود[۱۰](شکل ۱۲)



شکل ۱۰

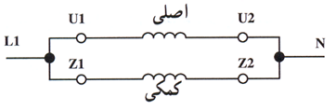


شکل ۱۱

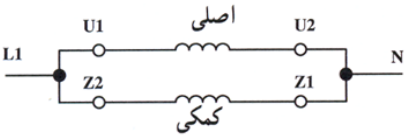


شکل ۱۲

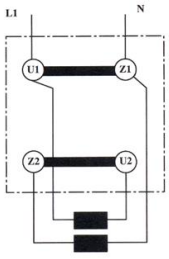
از موتورهای فاز شکسته در بادبزن‌ها، پمپ‌ها، جداکننده-های گریز از مرکز، یخچال‌های خانگی، کولرهای آبی هوایی و... استفاده می‌شود. قدرت این موتورها معمولاً بین $\frac{۱}{۳}$ تا $\frac{۱}{۲}$اسب بخار می‌باشد. برای تغییر جهت چرخش این موتورها کافی است اتصال دو سر سیم‌پیچ کمکی یا دو سر سیم‌پیچ اصلی را عوض کنیم. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مدار و تخته کلم موتور را در حالت راست‌گرد و شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب مدار و تخته کلم موتور را در حالت چپ‌گرد نشان می‌دهند.



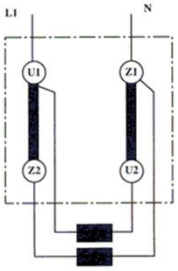
شکل ۱۳



شکل ۱۴



شکل ۱۵



شکل ۱۶

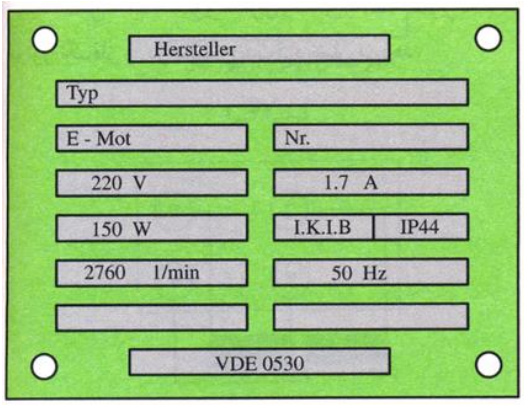
[۷] - بررسی علت این که پس از خارج شدن سیم‌پیچ کمکی از مدار، چرخش رتورادامه می‌یابد خارج از بحث این مقاله است.

[۸] - و دیگر موتورهای آسنکرون تک فاز (به جز موتور قطب چاک‌دار)

[۹] - کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک International Electro technical Commission

[۱۰] - در بعضی از موتورها دو سر کلید گریز از مرکز بر روی تختهٔ کلم آمده و دربعضی دیگر پس از اینکه با سیم‌پیچ کمکی سری شد یک سر از کلید و یک سری از سیم‌پیچ کمکی بیرون آمده و بر روی تخته کلم وصل می‌شود.

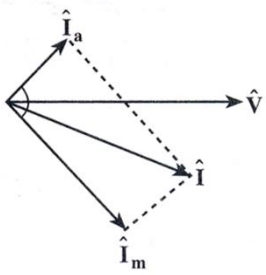
بر روی بدنه موتورهای فاز شکسته، یک پلاک مشخصات وجود دارد. در شکل ۱۷ پلاک مشخصات یک موتور فاز شکسته نشان داده شده است.



شکل ۱۷

۲،۳. موتور با راه‌اندازی خازنی

در بعضی از کاربردها، گشتاور راه‌اندازی تولید شده توسط موتور فاز شکسته برای راه‌اندازی بار روی محور موتور کافی نیست. در این موارد می‌توان از موتورهای با راه‌انداز خازنی (capacitor start motor) استفاده کرد. در موتور با راه‌انداز خازنی، یک خازن با سیم‌پیچ کمکی سری می‌شود. با انتخاب مناسب اندازهٔ خازن می‌توان اختلاف فاز بین جریان‌های سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی را به حدود 90° رساند. شکل ۱۸ نمودار برداری موتور با راه‌انداز خازنی را نشان می‌دهد. خازن مورد استفاده در این موتورها معمولاً از نوع الکترولیتی است و معمولاً به صورت جداگانه روی بدنهٔ موتور نصب می‌شود (شکل ۱۹)

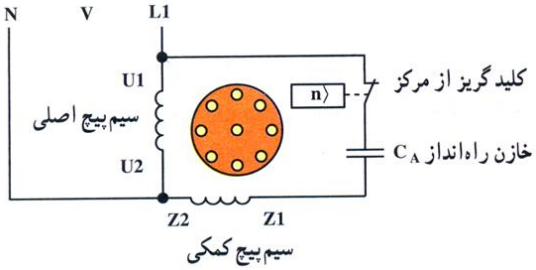


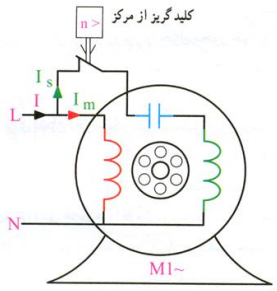
شکل ۱۸



شکل ۱۹

در موتورهای با راه‌انداز خازنی نیز از یک کلید گریز از مرکز در مدار سیم‌پیچ کمکی و خازن راه‌انداز استفاده می‌شود. هنگامی که سرعت موتور به ۷۵٪ سرعت نامی رسید کلید گریز از مرکز، سیم‌پیچ کمکی و خازن راه‌انداز را از مدار خارج می‌کند. شکل ۲۰ مدار الکتریکی موتور با راه‌انداز خازنی را نشان می‌دهد. از موتورهای با راه‌انداز خازنی در پمپ‌ها، کمپرسورها، تهویه مطبوع، ماشین‌های لباسشویی بزرگ و... استفاده می‌شود. محدودهٔ قدرت موتورهای با راه‌اندازی خازنی بیشتر از $\frac{۱}{۸}$ اسب بخار می‌باشد.

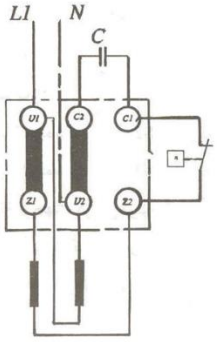




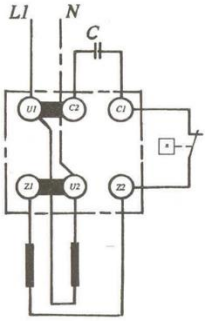
شکل ۲۰

معکوس‌کردن جهت چرخش این موتورها، مانند معکوس‌کردن جهت چرخش موتورهای فاز شکسته است. کافی است اتصال دو سر سیمی که مجموعهٔ خازن، کلید گریز از مرکز و سیم‌پیچ کمکی به آن وصل است یا دو سر سیم‌پیچ اصلی را عوض کرد.

در شکل ۲۱ تخته کلم یک موتور با راه‌انداز خازنی به‌صورت راستگرد نشان داده شده است و شکل ۲۲ تخته کلم موتور با راه‌انداز خازنی با جهت چرخش چپ‌گرد را نشان می‌دهد. در این موتور، خازن راه‌انداز ۶۰ میکروفاراد ظرفیت دارد و ولتاژ تا ۳۲۰ ولت را تحمل می‌کند.



شکل ۲۱

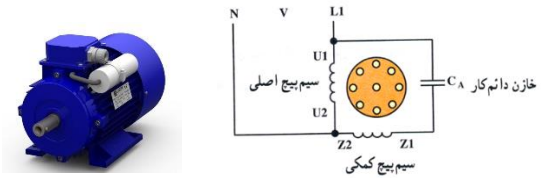


شکل ۲۲

موتور با راه‌انداز مقاومتی (resistor start motor) نوع دیگر موتور AC تک فاز رایج است. در این نوع موتور، به‌جای خازن راه‌انداز از یک مقاومت راه‌انداز استفاده شده است و میزان گشتاور راه‌اندازی کمتری نسبت به موتور استارت خازنی دارد. هزینه تولید این موتور کمتر از موتور استارت خازنی است. این موتورها در تسمه نقاله‌های (belts)کوچک، پمپ‌ها و دمنده‌ها استفاده می‌شود.

۲,۴. موتور با خازن دائم

در این موتورها یک خازن به طور دائم با سیم‌پیچ کمکی سری می‌شود و کلید گریز از مرکز وجود ندارد. شکل ۲۳ نمای ظاهری و مدار الکتریکی موتور با خازن دائم را نشان می‌دهد. خازن استفاده شده در این موتورها از نوع روغنی است و مقدار ظرفیت آن از خازن الکترولیتی استفاده شده در موتور با راه‌انداز خازنی کمتر است.



شکل ۲۳

موتورهای با خازن دائم نسبت به موتورهای فاز شکسته و با راه‌انداز خازنی، ضریب توان، بازده و گشتاور و کار بیشتر و سر و صدای کمتری دارد اما گشتاور راه‌اندازی آن‌ها از گشتاور راه‌اندازی موتورهای با راه‌انداز خازنی کمتر است. از این موتورها در پنکه‌های رومیزی و سقفی، دمنده‌ها، ماشین لباسشویی، پمپ آب و... استفاده می‌شود.

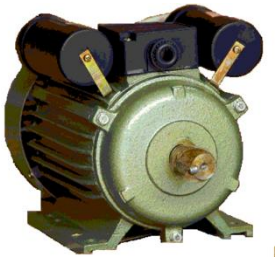
معکوس کردن جهت چرخش این موتورها مانند معکوس کردن جهت چرخش موتورهای با راه‌انداز خازنی است.

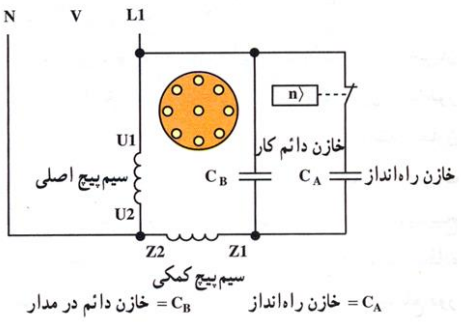
۲,۵. موتور دو خازنی

در موتورهای دو خازنی (PSC; Permanent Split-Capacitor motor) (capacitor start / capacitor run motor) هم گشتاور راه‌اندازی زیاد و هم شرایط کار خوب مد نظر است، شکل ۲۴ نمای ظاهری و شکل ۲۵ مدار الکتریکی موتور دو خازنی را نشان می‌دهد.

در ابتدای راه‌اندازی، دو خازن در مدار سیم‌پیچ کمکی قرار دارد. هنگامی که سرعت موتور به ۷۵٪ سرعت نامی رسید کلید گریز از مرکز، یکی از خازن‌ها (خازن راه‌انداز) را از مدار خارج می‌کند و خازن دیگر (خازن دائم) در مدار سیم‌پیچی کمکی باقی می‌ماند. خازن راه‌انداز از نوع الکترولیتی و خازن دائم از نوع روغنی است. ظرفیت خازن راه‌انداز معمولاً چند برابر ظرفیت خازن دائم است.

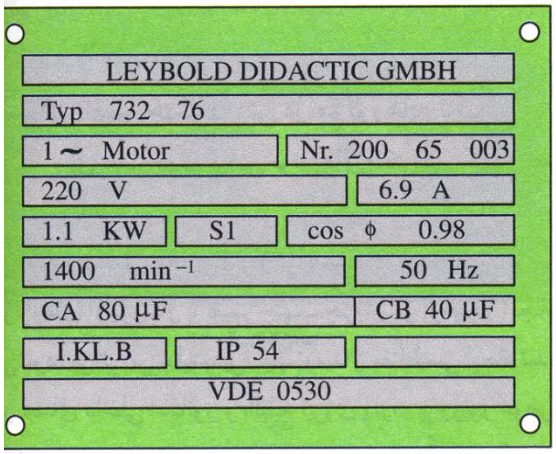
این موتور بیش از هر موتور AC تک فاز دیگر در صنعت استفاده می‌شود. این کاربری‌ها شامل ماشین‌های مرتبط با چوب، یخچال‌های صنعتی، کمپرسورهای هوا، پمپ‌های آب فشار قوی، پمپ‌های تخلیه و دیگر کاربردهای نیازمند گشتاورهای بالا در حد ۱ تا ۱۰ اسب بخار می‌شود.معکوس‌کردن جهت چرخش این موتورها مانند معکوس‌کردن جهت چرخش موتورهای با راه‌انداز خازنی است.


شکل ۲۴



شکل ۲۵

در شکل ۲۶ پلاک مشخصات یک موتور دو خازنی نشان داده شده است. در این موتور، ظرفیت خازن راه‌انداز، $80\mu F$ و ظرفیت خازن دائم $40\mu F$ است.



شکل ۲۶-۱

۲,۶. موتور با خازن دائمی دوگانه

(PSC; Permanent Split-Capacitor motor)

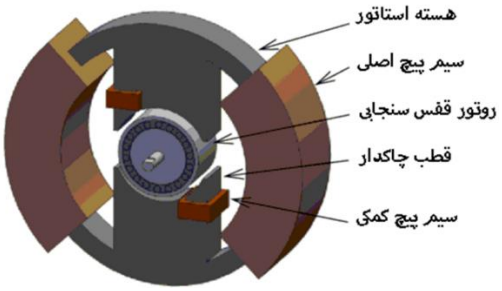
از دیگر موتورهای AC تک‌فاز رایج است. این موتور به عنوان موتور با یک خازن راه انداز-دائم شناخته می‌شود و همانند موتور استارت خازنی که در بالا توضیح داده شد عمل می‌کند، با این تفاوت که کلید گریز از مرکزی ندارد و سیم پیچ دوم به همراه خازن دائما به منبع تغذیه متصل می‌ماند. از آنجا که خازن، باید برای استفاده مداوم طراحی شده باشد، نمی‌تواند توان راه‌اندازی معادل یک موتور استارت خازنی ایجاد کند. موتورهای (PSC) جریان راه-اندازی پایین، (کمتر از ۲۰۰ درصد جریان نامی) دارد و برای دستگاه‌هایی که زیاد قطع و وصل می‌شود، مناسب است. موتورهای PSC امتیازهای فراوانی دارد. همچنین می‌تواند برای بازدهی بهینه و ضریب توان بالا در فشار برآورد شده طراحی شود. موتور با خازن دائمی دوگانه به عنوان قابل اطمینان‌ترین موتور الکتریکی تک فاز مطرح می‌شود؛ بیش‌تر به این خاطر که به کلید گریز از مرکز نیازی ندارد و به‌راحتی با کنترل‌کننده‌های سرعت تغییر دور می-دهد. موتورهای PSC بسته به طراحی‌شان کاربری بسیار متنوعی دارد (مانند: فن‌ها، دمنده‌ها با نیاز به گشتاور استارت کم و سیکل‌های کاری غیر دائمی مانند تنظیم دستگاه‌ها (طرز کارها)، عملگر درگاه‌ها، بازکننده‌های در گاراژها و...). همچنین موتورهای PSC در هواسازها (air handlers)، فن‌ها، دمنده‌ها و موارد دیگر که سرعت متغیر مورد نیاز است استفاده می‌شود.

۲,۷. موتور قطب چاک‌دار

موتور قطب چاک‌دار،(shading-pole motor) فقط یک سیم‌پیچ دارد. این موتور به جای سیم‌پیچ کمکی، قطب‌های برجسته‌ای دارد که بخشی از هر یک از آن‌ها توسط یک یا چند حلقهٔ اتصال کوتاه شده احاطه شده است. شکل ۲۷ نمای داخلی، شکل ۲۸ نمای ساده و شکل ۲۹ تخته کلم یک موتور قطب چاک‌دار را نشان می‌دهد. بررسی طرز کار این موتور، خارج از بحث این مقاله است.

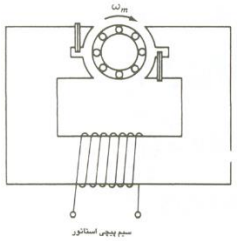
موتورهای قطب چاک‌دار، ساختمان ساده و قیمت کمی دارد و گشتاور راه‌اندازی و بازده آن‌ها کم است. از این موتورها در پنکه‌های رومیزی، پمپ آب کولر، انواع بادبزن و... استفاده می‌شود.

موتورهای قطب چاک‌دار در اندازه‌های کوچک، تقریباً از $\frac{۱}{۲۵۰}$ تا $\frac{۱}{۶}$ اسب بخار، ساخته می‌شود.

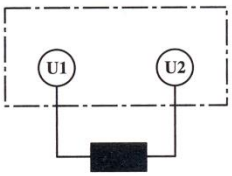


شکل ۲۷

جهت چرخش رتور موتور قطب چاک‌دار همان‌طور که در شکل ۲۸ نشان داده شده است از طرف ناحیه بدون حلقه به طرف ناحیه حلقه‌دار هر قطب است. موتورهای قطب چاک‌داری وجود دارد که جهت چرخش آن‌ها را می‌توان تغییر داد. در این موتورها در هر قطب، دو حلقه نصب می‌شود و به اختیار، یکی از آن دو اتصال کوتاه می‌شود.



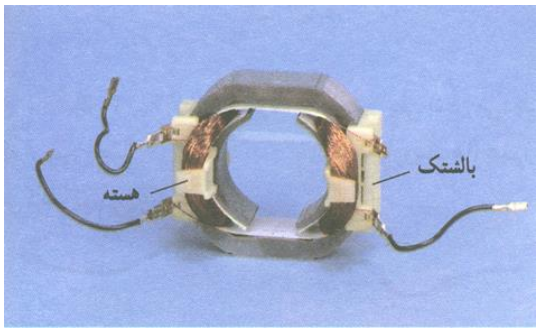
شکل ۲۸



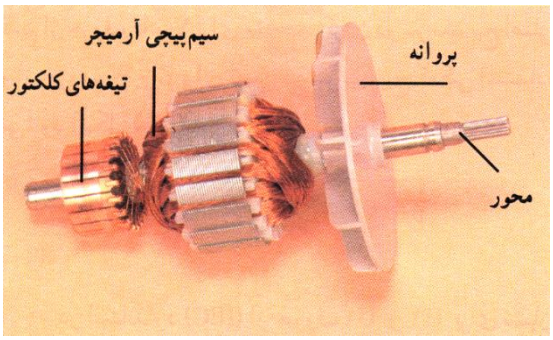
شکل ۲۹

۸،۲. موتور یونیورسال[11]

استاتور موتور یونیورسال (Universal motors) معمولاً به صورت قطب برجسته است (شکل ۳۰) و رتور آن دارای سیم‌پیچی‌ای است که سرهای آن به تیغه‌هایی مسی به نام کموتاتور وصل می‌شود. به رتور موتور یونیورسال، آرمیچر نیز می‌گویند. شکل ۳۱ آرمیچر یک موتور یونیورسال را نشان می‌دهد. برای رساندن جریان به سیم‌پیچی آرمیچر از جاروبک که با تیغه‌های کموتاتور در تماس است استفاده می‌شود. شکل ۳۲ تخته کلم موتور یونیورسال را نشان می‌دهد.



شکل ۳۰



شکل ۳۱

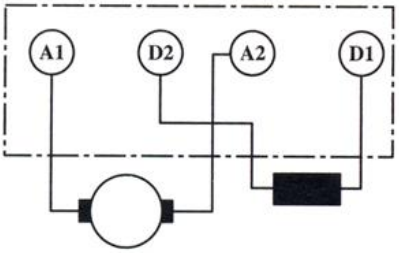
سیم‌پیچی آرمیچر و قطب‌های استاتور موتور یونیورسال به طور سری با هم قرار می‌گیرند. شکل ۳۳ نمای ظاهری موتور یونیورسال را نشان می‌دهد. این موتور می‌تواند هم با منبع AC و هم منبع DC کار کند؛ به همین علت به آن‌ها یونیورسال (عمومی) می‌گویند.

موتورهای یونیورسال در مقایسه با دیگر موتورهای تک فاز، به ازای یک آمپر معین، گشتاور بیشتری ایجاد می‌کند. سرعت بی‌باری این موتورها زیاد و در حدود ۲۰۰۰۰ دور در دقیقه است اما در بار کامل، سرعت معمولاً به ۴۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ دور در دقیقه می‌رسد. از این موتورها در جاروبرقی، دریل دستی، لوازم گردنده آشپزخانه و... استفاده می‌شود.

جهت چرخش موتور یونیورسال (از نوع قطب گسترده) را می‌توان با معکوس‌کردن جهت جریان سیم‌پیچی آرمیچر یا سیم‌پیچی قطب‌های استاتور و جابه‌جا کردن جاروبک‌ها بر خلاف جهتی که موتور در آن جهت می‌چرخد، تغییر داد. و برای تغییر جهت چرخش موتور الکتریکی تک فاز یونیورسال از نوع قطب متمرکز (قطب برجسته) باید جهت

[11] - Universal motor

عبور جریان سیم‌پیچی آرمیچر یا سیم‌پیچ قطب‌های استاتور را تغییر داد و روش معمول، تغییردادن سرهای سیم‌های متصل به جاروبک‌ها می‌باشد.

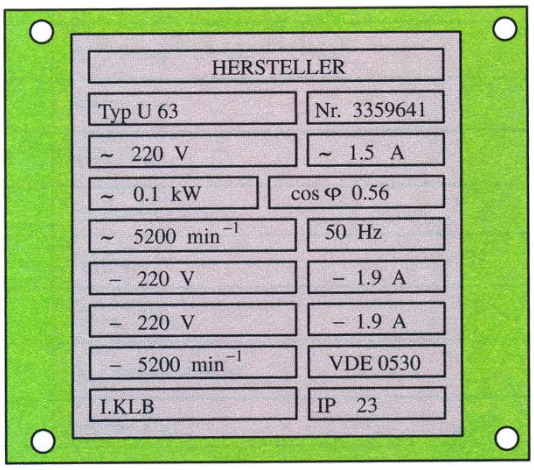


شکل ۳۲



شکل ۳۳

در شکل ۳۴ پلاک مشخصات یک موتور یونیورسال نشان داده شده است.



شکل ۳۴-۱

۳. مرجع

۱- طراحی الگوی برنامه ریزی درسی و تدوین سند حرفه "سامانه ملی استاندارد مهارت" استانداردهای آموزشی رشته برق سازمان آموزش فنی وحرفه‌ای کشور

۲- نصب و راه‌اندازی موتورهای الکتریکی، مؤلف سیدپرویز موسوی، حسین اسکندری و مریم فریور- انتشارات سازمان آموزش فنی وحرفه‌ای کشور

۲ – تکنولوژی برق جلد چهارم (ماشین‌های الکتریکی A.C.)،مؤلف B.L.THERAJA، ترجمه سعید شعاری نژاد- انتشارات جعفری

۳ – کارگاه برق و مدار فرمان، مؤلف محسن بندرآبادی، ویراستار علمی حسین اسکندری- انتشارات دانشگاه جامع علمی کاربردی

۴ – جداول مهندسی برق و قدرت ، مؤلف گریگور هابرل و...، مترجم مهندس امیر هاشمی و...، انتشارات طراح

ارتباط با کهربا

متخصصان و مهندسین گران‌قدر می‌توانند از طریق آدرس سایت مجله www.kahrobaonline.ir سایر اطلاعات مجله ازجمله نحوه ارسال مقالات جهت انتشار در نشریه و نیز فرم اشتراک مجله را دریافت کنند. همچنین به اطلاع می‌رسانیم طی توافق صورت گرفته بین پایگاه علمی سیویلیکا و مجله کهربا ازاین‌پس به مقاله برتر هر شماره یک کارت اشتراک رایگان دانلود از این پایگاه هدیه داده می‌شود.

اپلیکیشن این مجله را می‌توانید از مارکت نرم‌افزارهای موبایل (گوگل پلی) به آدرس زیر دریافت کنید.

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.kahroba.wwwnoandishaan

ایمیل مجله kahroba@noandishaan.com پل ارتباطی ما با مهندسین و متخصصین می‌باشد، لطفاً ما را از پیشنهادها و انتقادات ارزشمند خود بهره‌مند سازید. جهت حمایت‌های مالی و معنوی از نشریه و یا معرفی محصولات خود نیز می‌توانید از طریق همین ایمیل با ما در ارتباط باشید.