

## طراحی بهینه ترانسفورماتور به کمک الگوریتم ژنتیک

سید هادی حسینی\*

دانشجوی دکتری بخش برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

حسین سیفی\*\*

استاد بخش برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۷۹/۹/۲۶، تاریخ تصویب ۸۱/۳/۴)

### چکیده

انتقال انرژی الکتریکی در مسافتهای طولانی همراه لزوم کاهش تلفات و افت ولتاژ شبکه باعث استفاده از ترانسفورماتور در شبکه در سطوح ولتاژی مختلف آن می‌شود. نقش این عنصر در شبکه همراه قیمت بالای آن که به سبب استفاده از مواد گرانبه‌تر در ساخت آن ناشی می‌شود، لزوم طراحی بهینه آن را آشکارتر می‌سازد. در این مقاله با کمک‌گیری از مفهوم روش مدرن بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک، روشی متفاوت با روشهای بهینه‌سازی پیشین برای طراحی بهینه ترانسفورماتور ارائه شده است. بر اساس روش فوق، نرم‌افزاری جهت طراحی بهینه ترانسفورماتور پیاده سازی شده است و نتایج طراحی بوسیله این نرم‌افزار برای یک نمونه ترانسفورماتور توزیع آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: طراحی بهینه، ترانسفورماتور، الگوریتم ژنتیک.

### مقدمه

شدن نحوه طراحی ترانسفورماتور گردیده است. نمونه‌هایی از استفاده از روش المانه‌های محدود برای طراحی ترانسفورماتور در مراجع [۲] و [۳] آورده شده است. مرجع [۴] مدل جدیدی را جهت محاسبات گرمایی برای ترانسفورماتور معرفی کرده است. در مرجع [۵] روش جدیدی جهت محاسبه تلفات هسته معرفی شده است. همچنین مرجع [۶] مایع جدیدی را با خصوصیات عایقی، الکتریکی و گرمایی بهتر جهت استفاده در ترانسفورماتور بجای روغنهای معدنی یا سیلیکونی مورد مصرف کنونی معرفی کرده است.

علاوه بر استفاده از فن‌آوریهای جدید، پیشرفتهای انجام شده در ساخت رایانه‌ها، باعث گردیده طراحی ترانسفورماتور از این ابزار نیز جهت طراحی مطلوب‌تر ترانسفورماتور استفاده کنند، که این امر در نهایت باعث سریع‌تر شدن فرآیند طراحی ترانسفورماتور گشته است. در مراجع [۷، ۸ و ۹] نمونه‌هایی از استفاده از رایانه برای طراحی برخی قسمت‌ها یا قسمت‌های مختلف ترانسفورماتور

ترانسفورماتور به عنوان ماشینی الکتریکی که واسطه انتقال انرژی بین دو قسمت از شبکه برق با سطوح ولتاژ معمول متفاوت می‌باشد، نقش مهمی را در کاهش تلفات و افت ولتاژ شبکه ایفا می‌کند. در مرجع شماره [۱] بطور مفصل تاریخچه ترانسفورماتور از ابتدای اختراع آن به همراه پیشرفتهای انجام شده در مورد طراحی و ساخت آن و رویکرد آینده در فن‌آوری ترانسفورماتور ذکر شده است. لزوم کاهش تلفات بی‌باری و بار ترانسفورماتور در شبکه‌های برق به همراه رفتارهای خاص الکتریکی ترانسفورماتور (نظیر رفتار عایقی) موجب پیشرفتهای چشمگیری در مواد اولیه مورد نیاز در ساخت ترانسفورماتور گردید که در این میان می‌توان به ظهور ورقهای آمورف جهت ساخت هسته و ابرهادیهای گرم جهت ساخت بوبینها اشاره کرد. از طرفی ظهور روشهای عددی برای محاسبه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی به همراه پیشرفتهای حاصله در علوم نظیر الکترومغناطیس، ترمودینامیک و مکانیک باعث متحول

\*siedhadi@hotmail.com

\*\*seifi\_ho@modares.ac.ir

سعی و خطا، روشهای مبتنی بر تکنیک مونت کارلو مدلسازی چند جمله‌ای تابع هدف مورد مقایسه و بحث قرار گرفته و در نهایت از مدلسازی تابع هدف بصورت یک چند جمله‌ای وابسته به متغیرهای مستقل طراحی ترانسفورماتور برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

همچنانکه در این مقاله ذکر شده است نقص روشهای مبتنی بر تکنیک سعی و خطا در رسیدن به نقطه بهینه محلی بجای بهینه مطلق و نقص روش مبتنی بر تکنیک مونت کارلو وابستگی نتایج به نقطه شروع می‌باشد، علاوه بر این میزان انحراف جواب از بهینه واقعی که در اثر تقریب تابع هدف به یک چند جمله‌ای پدید می‌آید ( نظیر روش مرجع [۱۴] )، قابل تشخیص نیست. در این مقاله روشی نوین بر مبنای الگوریتم ژنتیکی [۱۵] برای طراحی بهینه ترانسفورماتور پیشنهاد و پیاده‌سازی می‌شود که علاوه بر در نظر گرفتن کلیه پارامترهای موثر بر طراحی، ساخت و بهره‌برداری، امکان رسیدن به نقطه بهینه مطلق واقعی را افزایش می‌دهد، بدین صورت مشکلات تحقیقات گذشته در خصوص چگونگی رسیدن به پاسخ بهینه [۱۱، ۱۲، ۱۴] را مرتفع می‌سازد. ویژگی دیگر مطلوب الگوریتم ژنتیکی در آن است که رسیدن پاسخ به نقطه بهینه را در شرایطی که اکثر پارامترهای طراحی به صورت گسسته هستند را نیز فراهم می‌سازد. بطور خلاصه مزیت استفاده از این الگوریتم در مقایسه روشها، فرار از بهینه محلی (در مقایسه با روشهایی نظیر روش سعی و خطا)، عدم نیاز به تقریب تابع هدف به یک چند جمله‌ای وابسته به متغیرهای طراحی ( نظیر روش مرجع [۱۰] ) و عدم وابستگی به نقطه شروع ( همانند الگوریتم مبتنی بر تکنیک مونت کارلو) است.

### پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در فرآیند طراحی ترانسفورماتور

اساس کار الگوریتم ژنتیک کار بر روی کروموزومها و تصحیح طراحی و متغیرها ( ژنها) در هر مرحله بر اساس تابع هدف محاسبه شده متناظر با هر کروموزوم می‌باشد. بدین معنا که متغیر و پارامترهای اساسی تاثیر گذار بر طراحی که هر کدام ژن نامیده می‌شوند در کنار هم مجموعه‌ای را تشکیل می‌دهند که کروموزوم نامیده

آورده شده است.

در کنار تمامی پیشرفتهای فوق مراجع گوناگونی نیز با کمک‌گیری از تکنیکهای مختلف بهینه‌سازی، روشهایی را جهت طراحی بهینه ترانسفورماتور معرفی کرده‌اند.

در این مقاله در ابتدا بطور خلاصه مروری بر کارهای انجام شده در مورد طراحی بهینه ترانسفورماتور آورده می‌شود و در ادامه پس از معرفی مختصر الگوریتم ژنتیکی به نحوه پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیکی در فرآیند طراحی ترانسفورماتور پرداخته می‌شود. در نهایت اعمال موفق روش بر روی یک ترانسفورماتور توزیع ارائه شده است. بخش پایانی نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از بحث می‌پردازد.

### مروری بر کارهای گذشته و مبنای پیشنهاد روش جدید

همچنانکه گفته شد، با کمک‌گیری از تکنیکهای مختلف بهینه‌سازی، مراجع گوناگون، روشهایی را جهت طراحی بهینه ترانسفورماتور معرفی کرده‌اند. در اینگونه تحقیقات علاوه بر تکنیکهای متفاوت استفاده شده، توابع هدف متفاوت بهینه‌سازی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. بطور مثال در مرجع شماره [۱۰] نویسنده از روش المانهای محدود برای طراحی بهینه عایقی ترانسفورماتور استفاده کرده است. به عبارت دیگر بهینه کردن ترکیب عایقی تحت قید تحمل ترانسفورماتور در مقابل ولتاژهای اعمالی به آن، هدف اصلی این تحقیق بوده است.

در مراجع شماره [۱۱] و [۱۲] از تکنیکهای سعی و خطا و طراحیهای مکرر جهت بهینه‌سازی تنها با تابع هدف حداقل سازی قیمت مواد مصرفی تحت قید پوشاندن خصوصیات خواسته شده استفاده شده است.

در مرجع شماره [۱۳] از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه شکل بوبینهای ترانسفورماتور به منظور کاهش نیروهای اتصال کوتاه کمک گرفته شده است.

در بین مقاله‌هایی که ارائه شده است مرجع شماره [۱۴] تنها مقاله‌ای است که تابع هدف را حداقل سازی قیمت تمام شده ساخت ترانسفورماتور بعلاوه هزینه انرژی تلف شده ناشی از تلفات بار و بی‌باری در نظر گرفته است. در این مرجع تکنیکهای مختلف بهینه‌سازی نظیر روشهای

۲ - تولید کروموزوم فرزند از دو کروموزوم انتخابی با اعمال عملگرهای جابجایی و جهش [۱۵].

۳ - انجام فرایند طراحی برای کروموزوم جدید.

۴ - محاسبه تابع هدف برای ترانسفورماتور طراحی شده، متناظر با کروموزوم جدید.

۵ - مقایسه تابع هدف و کنترل معیار رسیدن به نقطه بهینه و در صورت نرسیدن به نقطه بهینه، ضبط این کروموزوم در جمعیت اولیه و تکرار از مرحله ۱.

۶ - پایان

خروجی طراحی بهینه ترانسفورماتور به این روش یک کروموزوم می‌باشد که تحت ژنهای آن می‌توان به نقطه بهینه تابع هدف دست یافت.

#### تابع هدف

تابع هدف مورد نظر جهت بهینه‌سازی به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

= تابع هدف

قیمت مواد مورد استفاده در ساخت

+ هزینه کارگر و تجهیزات مورد نیاز جهت فرآوری و ساخت

+ هزینه تلفات در طول عمر ترانسفورماتور

- قیمت ضایعات در سال پایانی عمر ترانسفورماتور

(۱)

که اجزای تابع هدف را بصورت زیر می‌توان بسط داد:

= هزینه تلفات در طول عمر ترانسفورماتور

تلفات بار ترانسفورماتور \* قیمت واحد تلفات بار

+ تلفات بی‌باری \* قیمت واحد تلفات بی‌باری

(۲)

= قیمت مواد مصرفی

قیمت واحد وزن مواد مصرفی \* وزن مواد مصرفی

(۳)

= هزینه کارگر و تجهیزات

زمان مورد نیاز جهت فرآوری و ساخت

\* قیمت هر ساعت کار کارگر یا تجهیز

(۴)

مواد مصرفی مورد استفاده در ساخت ترانسفورماتور، مس، ورق‌هسته، روغن، ورق آهن و مواد عایقی جامد دیگر نظیر کاغذها و غیره می‌باشند. مقدار وزن مورد استفاده این مواد

می‌شود. خصوصیت اصلی یک کروموزوم این است که بطور مثال بین ترانسفورماتورهای طراحی شده و کروموزومها یک رابطه یک به یک برقرار است یعنی هر ترانسفورماتور تنها یک کروموزوم متناظر داشته و هر کروموزوم تنها و تنها به یک ترانسفورماتور مشخص دلالت می‌کند.

چون متناظر با هر کروموزوم یک ترانسفورماتور وجود دارد بنابراین به هر کروموزوم عددی را نیز می‌توان نسبت داد که همان تابع هدف محاسبه شده برای ترانسفورماتور طراحی شده متناظر می‌باشد. نکته دیگر در مورد ژنهای این است که هر ژن در کروموزوم بصورت کد شده ظاهر می‌شود یعنی پارامترها یا متغیرها بر اساس روشی خاص کدبندی شده و در کروموزوم قرار می‌گیرند. بطور مثال جنس سیم بوبین فشار ضعیف که یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر طراحی ترانسفورماتور می‌باشد می‌تواند مس یا آلومینیوم در نظر گرفته شود. از اینرو به این پارامتر در کروموزوم یک بیت اختصاص داده می‌شود و در صورتیکه عدد متناظر با این بیت صفر باشد به مفهوم مسی بودن سیم بوبین فشار ضعیف و یک بودن آن به معنای آلومینیومی بودن آن است. بنابراین با توجه به این مثال هر ژن نیز متشکل از تعدادی بیت کنار هم می‌باشد که هر بیت صفر یا یک می‌تواند باشد و مجموعه بیتها در کنار هم شکل کدبندی شده پارامتر متناظر می‌باشد.

نکته‌ای که در اختصاص تعداد بیت به هر ژن و کدبندی آن باید در نظر گرفت و در واقع مزیت دیگر الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روشهای بهینه‌سازی نیز می‌باشد این است که می‌توان قیود مساله را با انتخاب تعداد بیت و کدبندی مناسب بدون نیاز به وارد کردن نامساویهای ناشی شده از قیود در قسمتهای مختلف طراحی در کل مساله و طراحی اعمال کرد.

اولین قدم در پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در فرایند طراحی ترانسفورماتور، تشکیل کروموزوم و مشخص کردن ژنهای می‌باشد. مراحل بعدی را بصورت زیر می‌توان بیان کرد:

۱ - انتخاب دو کروموزوم از جمعیت کروموزومهای موجود بصورت تصادفی با توجه به تابع هدف محاسبه شده متناظر با آنها.

ساعت) تلفات بی‌باری در تمام مدت برقرار بودن ترانسفورماتور بطور ثابت و مستقل از بار ترانسفورماتور وجود خواهد داشت).

در مورد قیمت واحد تلفات بار نیز می‌توان نوشت:

$$R * \int_0^T P' k . dt \quad (۶)$$

که  $P'k$  تلفات بار متناسب با بار متصله به ترانسفورماتور می‌باشد که:

$$P'k = Pk * (Pl / Pn)^2 \quad (۷)$$

$Pl$  بار متصله به ترانسفورماتور،  $Pn$  بار نامی ترانسفورماتور و  $Pk$  تلفات بار ترانسفورماتور در بار نامی (توانها و تلفات بر حسب کیلو وات) در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\text{قیمت واحد تلفات بار} = \frac{R}{Pn^2} * \int_0^T Pl . dt \quad (۸)$$

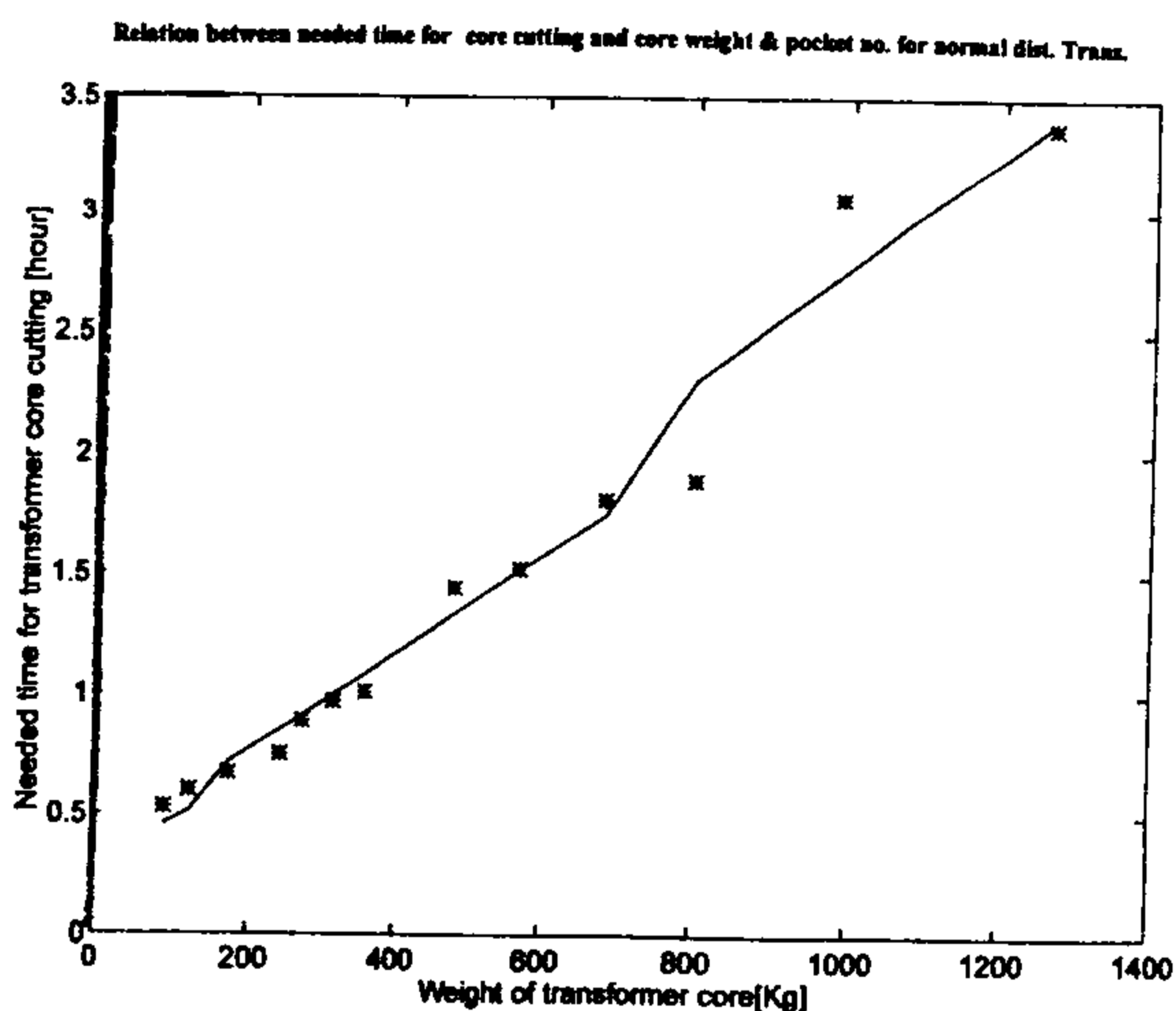
قیمت ضایعات در سال پایانی عمر ترانسفورماتور را نیز می‌توان با توجه به وزن مواد مصرفی و قیمت واحد وزن ضایعات آن محاسبه کرد.

### فرایند طراحی

مهمترین مسائل حاکم بر طراحی ترانسفورماتور که باعث پیچیده شدن این فرایند می‌شود را می‌توان در مسائل حرارتی و عایقی دانست. بعبارت دیگر از یک طرف ایجاد حرارت ناشی از تلفات بار و بی‌باری در ترانسفورماتور و ازدیاد دمای نقاط درونی به‌مراه محدودیت تحمل دمایی عایقهای ترانسفورماتور و از طرف دیگر توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی در ترانسفورماتور به‌مراه محدودیت تحمل عایقی عایقهای ترانسفورماتور و به‌مراه توزیع خاص و غیرخطی ولتاژهایی نظیر ولتاژ ضربه بوبینهای اولیه و ثانویه بعلت ظهور خازنهای بین نقاط مختلف آن در فرکانسهای بالا (در حد KHz) از جمله مواردی هستند که در طراحی ترانسفورماتور باید مورد توجه واقع شوند.

در ترانسفورماتور ابتدا با توجه به خصوصیات گرمایی مواد مختلف ترانسفورماتور، میزان جهش دمایی نقاط مختلف

در ترانسفورماتور بعد از اتمام فرایند طراحی برای هر کروموزوم بدست می‌آید، قیمت واحد وزن این مواد نیز در کشورها و نقاط مختلف می‌تواند متفاوت باشد. مقدار زمان مورد نیاز جهت ساخت یا نفر ساعت صرف شده برای ساخت ترانسفورماتور نیز در اینجا با تفکیک مراحل مختلف تولید از همدیگر و تشخیص پارامترهای موثر بر مدت زمان صرف شده در هر مرحله و شبیه‌سازی این ارتباط و جمع‌بندی نهایی محاسبه می‌شود. بطور مثال نمونه‌ای از این شبیه‌سازی که نفر ساعت مورد نیاز جهت برش هسته را در ارتباط با وزن و تعداد پاکتهای هسته بیان می‌کند در شکل (۱) آورده شده است. (منحنی مورد نظر بر اساس اطلاعات اخذ شده از واحد حسابداری صنعتی شرکت ایران ترانسفو (تنها شرکت تولید کننده ترانسفورماتورهای توزیع و قدرت در ایران) رسم شده است).



شکل ۱: نفر ساعت مورد نیاز جهت برش هسته متناسب با وزن و تعداد پاکتهای آن.

تلفات بار و بی‌باری ترانسفورماتور نیز مشابه وزن مواد مصرفی بعد از اتمام فرایند طراحی ترانسفورماتور بدست می‌آیند. قیمت واحد تلفات بی‌باری را نیز می‌توان بر اساس روابط زیر محاسبه کرد:

$$\text{قیمت انرژی تلف شده به سبب تلفات بی‌باری} = P0 * T * R \quad (۵)$$

که  $R$  قیمت واحد انرژی (ریال بر کیلو وات ساعت)،  $P0$  تلفات بی‌باری ترانسفورماتور (کیلووات) و  $T$  مدت زمان کار یا عمر مفید ترانسفورماتور می‌باشد (بر حسب

ترانسفورماتور باید به محیط بیرون انتقال دهد تا مواد عایقی بتوانند در محدوده دمایی مجاز خود کار کنند).  
و - طراحی مکانیکی ترانسفورماتور با توجه به حداقل فواصل عایقی مورد نیاز (از بدنه فلزی زمین شده تا بوبینهای ولتاژدار)، ابعاد و وزن قسمت‌های مختلف بدست آمده و میزان تلفات دفع شوندگی (این توان با توجه به نوع خنک‌کنندگی ترانسفورماتور در اثر تماس مستقیم بدنه ترانسفورماتور یا رادیاتورها با محیط بیرون یا در اثر کار آنها و غیره به آن منتقل می‌شود).

### محدودیتها و قيود طراحی

محدودیت‌های این مساله را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. قسمت اول از محدودیت‌های ساخت ناشی می‌شوند که می‌توان آنها را محدودیت‌های فن آوری نامید بطور مثال در فن آوری موجود که بحث بهینه سازی در مورد آن انجام می‌شود در طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور بیش از هشت سیم نمی‌توان باهم موازی کرد یا تنها ابعاد بخصوصی از سیمها موجود می‌باشد. این محدودیتها را می‌توان به راحتی در اختصاص بیتها به هر ژن یا نحوه کدبندی در نظر گرفت که اینکار انجام شده است (برخی از این محدودیتها در جدول (۱) آمده است).  
قسمت دوم محدودیت‌هایی نظیر امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور قابلیت تحمل دمایی و ولتاژی عایقها می‌باشند که در مورد این محدودیتها بطور مثال ترانسفورماتوری در میان جمعیتها قرار گرفته و مورد مقایسه قرار می‌گیرد که امپدانس اتصال کوتاه مطلوبی در نزدیکی مقدار خواسته شده داشته باشد و یا فرآیند طراحی طوری انجام می‌شود که عایقها در معرض شرایط دمایی و ولتاژی بیش از حد مجاز خود واقع نشوند.

### پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای طراحی

#### بهینه ترانسفورماتور توزیع

روش گفته شده فوق برای ترانسفورماتورهای توزیع (ترانسفورماتورهای با قدرت پایین تر از ۲MVA و ولتاژ فشار قوی پایین تر از ۳۳KV برای کار در فرکانس ۵۰Hz) بصورت بسته نرم‌افزاری آماده گردیده است.

آن نسبت به محیط در حالیکه ترانسفورماتور بار نامی خود را تغذیه می‌کند محاسبه می‌شود و سپس با توجه به دما و سایر خصوصیات محیط، تجهیزات خنک‌کنندگی ترانسفورماتور به گونه‌ای طراحی می‌شوند که این مواد در محدوده دمایی مجاز خود قرار بگیرند. برای در نظر گرفتن مسائل عایقی نیز با توجه به ولتاژ فشارقوی و ولتاژهای اعمالی به ترانسفورماتور که توسط استانداردها مشخص می‌شوند، ترکیب مواد عایقی در نقاط مختلف ترانسفورماتور مشخص می‌گردد. بر اساس مطالب فوق فرایند طراحی ترانسفورماتور بصورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۶]:

الف- محاسبه قطر، سطح مقطع و ابعاد پاکتهای هسته با توجه به رابطه ولتاژ، سطح مقطع، فرکانس و چگالی شار هسته و تعداد دور بوبین (برای رسیدن به سطح مقطع دایروی شکل در هسته از دسته ورقهای مختلف با عرضهای متفاوت با هم که هر کدام از دسته‌ها از ورقهای با عرض یکسان تشکیل شده‌اند، استفاده می‌شود به هر کدام از این دسته‌ها پاکت هسته اطلاق می‌شود).

ب- محاسبه ابعاد ارتفاعی و شعاعی بوبین فشار ضعیف با توجه به تعداد دور سیم فشار ضعیف، محاسبه تلفات مقاومتی و گردابی در بوبین فشار ضعیف با توجه به روابط موجود بر اساس چگالی جریان و ابعاد بوبین فشار ضعیف، محاسبه جهش حرارتی بوبین فشار ضعیف (توضیح داده شده در بالا) با توجه به تلفات محاسبه شده آن، خصوصیات حرارتی مواد مختلف و تعداد سطوح خنک‌کنندگی بوبین فشار ضعیف (سطوحی که با مایع خنک‌کننده (روغن) در تماس می‌باشند).

ج- محاسبه مشخصات بوبین فشارقوی مطابق بوبین فشار ضعیف با در نظر گرفتن فواصل عایقی مورد نیاز (اشاره شده در بالا).

د- محاسبه امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور با توجه به نتایج تلفات و ابعاد بدست آمده از قسمت‌های پیشین بر اساس روابط الکترومغناطیسی.

ه- محاسبه ابعاد نهایی قسمت فعال ترانسفورماتور (قسمت فعال به مجموعه هسته و نگهدارنده‌های آن و بوبینها اطلاق می‌شود) به همراه محاسبه میزان تلفات دفع شوندگی (تلفات دفع شوندگی توانی است که

جدول ۱ : اطلاعات مربوط به ژنها .

توضیحات	تعداد بیت اختصاصی به ژن	ژن متناظر با پارامتر
مدلی برای ولت بر دور اعشاری	۸	تعداد دور بوبین فشار ضعیف
حداکثر ۱۶ پاکت	۴	تعداد پاکت هسته
حداکثر ۴ لایه	۲	تعداد لایه بوبین فشار ضعیف
از بین سیمهای تخت موجود	۸	سیم فشار ضعیف
از طرف طولی سیم یا عرضی آن	۱	نحوه پیچش سیم فشار ضعیف
حداکثر ۸ سیم موازی	۳	تعداد سیم موازی فشار ضعیف
حداکثر ۲ سیم موازی	۱	تعداد سیم موازی در جهت شعاع فشار ضعیف
مس یا آلومینیوم	۱	جنس سیم فشار ضعیف
لایه‌ای با سیم گرد یا تخت، بشقابی یا لایه‌ای سری	۲	نوع بوبین فشار قوی
از بین سیمهای گرد و تخت موجود	۸	سیم فشار قوی
در صورت تخت بودن سیم	۱	نحوه پیچش سیم فشار قوی
حداکثر ۲ سیم موازی	۱	تعداد سیم موازی فشار قوی
مس یا آلومینیوم	۱	جنس سیم فشار قوی
-	۱	وجود یا عدم وجود کانال خنک‌کنندگی در بوبین فشار ضعیف
-	۱	وجود یا عدم وجود کانال خنک‌کنندگی در بوبین فشار قوی
Hi-B یا M5	۱	جنس ورق هسته
با توجه به نوع ورق انتخابی	۸	چگالی شار ماکزیمم هسته
برای سیمهای تخت	۱	ضخامت عایق سیم فشار ضعیف
برای سیمهای تخت	۱	ضخامت عایق سیم فشار قوی
حداکثر ۱۶ میلیمتر	۴	اختلاف ارتفاع مغناطیسی دو بوبین
-	۲	مشخصه خاص بوبین فشار قوی
حداکثر دو کانال	۱	تعداد کانال خنک‌کنندگی بوبین فشار قوی

نوع از ترانسفورماتورها اجرا گردید.

#### کروموزوم ترانسفورماتور توزیع

کروموزوم در نظر گرفته شده برای ترانسفورماتور توزیع مشتمل بر ۲۲ ژن بصورت جدول (۱) می‌باشد (تعداد بیت‌های اختصاصی به ژنها و توضیحات

با توجه به روندی که در قسمتهای پیشین توضیح داده شد روش پیشنهادی برای طراحی بهینه کلیه ترانسفورماتورها قابل پیاده‌سازی است. در اینجا بخاطر مقایسه نتایج و بخاطر آنکه از نظر برخی مسائل عایقی و حرارتی، ترانسفورماتورهای توزیع نسبت به ترانسفورماتورهای قدرت ساده‌ترند، روش فوق برای این

جدول ۲ : نتایج طراحی ترانسفورماتور نمونه.

موضوع مورد مقایسه	نمونه موجود	نتیجه طراحی برای نسبت قیمت تلفات بار به بی باری ۱:۱
قیمت کل مواد [ریال]	۴۹۶۸۵۹۵	۵۸۳۹۹۸۲
قیمت تجهیزات و کارگر مورد نیاز [ریال]	۵۲۴۹۴۲	۵۷۲۰۲۲
قیمت تلفات بی باری [ریال]	۹۲۸۷۳۵۲	۱۰۹۴۲۹۹۲
قیمت تلفات بار [ریال]	۴۹۹۰۵۷۲۰	۳۶۲۵۰۶۳۲
تلفات بار [KW]	۳/۱۶۵	۲/۲۹۹
ورق هسته	M5	M5
تلفات بی باری [KW]	۰/۵۸۵	۰/۶۹۴
چگالی شار ماکزیمم هسته [T]	۱/۷۶۵	۱/۶۸۵
وزن هسته [Kg]	۲۸۷	۳۴۱
وزن مس [Kg]	۱۴۴	۱۸۵
وزن روغن [Kg]	۲۴۰	۲۵۰
ارتفاع کل [mm]	۱۶۶۸	۱۶۲۵
طول کل [mm]	۱۲۸۶	۱۳۸۴
عرض کل [mm]	۶۹۹	۷۲۲
کل قیمت تمام شده [ریال]	۶۴۶۸۶۶۰۹	۵۳۶۰۱۶۲۸
درصد کاهش قیمت [%]	-	۱۷

داده شده در مورد ژنها با توجه به فن آوری تولید این ترانسفورماتورها در ایران می باشد (که در واقع همان محدودیتهای ساخت و در نتیجه قیود مساله می باشند)). این نرم افزار قادر است با گرفتن اطلاعات اولیه مورد نیاز شامل توان نامی، ولتاژ نامی، تعداد و درصد تپها، گروه اتصال، ارتفاع نصب، دمای محیط نصب و امپدانس اتصال کوتاه، ترانسفورماتور بهینه متناظر را طراحی کند. زمان اجرای برنامه با استفاده از یک کامپیوتر ۲۳۳ MHz تقریباً حدود نیم ساعت می باشد.

#### نمونه طراحی شده

با استفاده از نرم افزار تهیه شده برای یک نمونه ترانسفورماتور، طراحی صورت گرفت. در جدول (۲) نتایج برنامه به همراه مقایسه تابع هدف با ترانسفورماتور موجودی که بر اساس استاندارد DIN طراحی شده، آمده است (اجزای تابع هدف و ضرایب آن با توجه به فن آوری تولید

ترانسفورماتور در ایران و مشخصات بار آن محاسبه شده است، که برخی از این ضرایب در ضمیمه آورده شده اند). مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه ۲۰۰ کیلو ولت آمپر، ۲۰ کیلو ولت به ۴۰۰ ولت (با تپ ۲/۵ درصدی) امپدانس اتصال کوتاه ۴ درصد، ارتفاع نصب ۱۰۰۰ متر از سطح دریا، ماکزیمم درجه حرارت محیط ۴۰ درجه سانتیگراد و گروه اتصال Yzn5 است.

همچنانکه گفته شد، نمونه بهینه شده در اینجا با هدف کاهش کل مجموعه هزینه ساخت، مواد و تلفات بدست آمده است و ضرایب تابع هدف نیز با توجه به شرایط ایران محاسبه شده اند، لذا در برخی موارد همچنانکه دیده می شود علیرغم کاهش کل مجموع تابع هدف، برخی از اجزای آن نظیر قیمت مواد افزایش یافته است.

طراحی مشابهی برای تعداد دیگری از ترانسفورماتورهای توزیع صورت گرفته که جهت اطلاعات بیشتر به مرجع شماره [۱۷] مراجعه شود.



## نتیجه گیری

روشهای موجود طراحی بهینه ترانسفورماتور، معایبی همچون گیر افتادن در نقطه بهینه محلی، خطای ناشی از تقریب تابع هدف و وابستگی به نقطه شروع دارند. در این مقاله، روشی نوین بر مبنای الگوریتم ژنتیکی پیشنهاد گردید که تا حدود زیادی قادر است مشکلات روشهای قبلی را مرتفع نماید. ایده این روش بر روی یک ترانسفورماتور نمونه توزیع پیاده سازی گردید. مولفین مقاله، پیاده سازی روش را در خصوص ترانسفورماتورهای قدرت در دست انجام دارند. بعلاوه گامهای بعدی که در جهت تکمیل روش ارائه شده می توان برداشت ( که در

## مراجع

- 1 - Allan, D. J. (1991). "Power transformers – the second century." *Power Engineering Journal*, Vol. 51, PP. 5-14.
- 2 - Allcock, R., McClelland, R., Holland, S. A. and Roue, A. (1995). "Transformer design and analysis using finite element methods." *IEE Colloquium on Computation in Electrostatics*, PP. 8/1-8/3.
- 3 - Holland, S. A., Haydock, L. and Oconnell, G. P. (1991). "Power transformer design with finite elements a company experince." *International Conference on Computation in Electromagnetics*, PP. 315-318.
- 4 - Pierce, L. W. and Holifield, T. (1999). "A thermal model for optimized distribution and small power transformer design." *Trasmission and Distribution Conference, IEEE*, Vol. 2, PP. 925-929.
- 5 - Basak, A., Chi-hang, Yu. and Liloyd, G. (1994). "Efficient transformer design by computing core loss using a novel approach." *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 3052, PP. 3725-3728.
- 6 - Gonzalez, D. A., Gauger, G., Yerges, A. and Goelde, G. (1997). "Distribution transformer for the 21th century." *IEE Conference*, Publ. No. 438, Vol. 1, PP. 25/1-25/5.
- 7 - Goethe, P. K. and Goethe, W. D. (1993). "Transformer design using windows." *Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1993, Proceeding Chicago93, EEIC/ICWA Exposition*, PP. 57-63.
- 8 - Patekar, S. A., Bhole, A. H. and Kulkarni, S. K. (1992). "Computer aided transformer design – an exposure to undergraduates." *Modeling, Measurment & Control*, Vol. 47, Iss: 2, PP. 53-64.
- 9 - Nelson, D. (1988). "Computer – aided design for transformer manufacturing." *Electrical Manufacturing*, Vol. 2, Iss: 6, PP. 31-32.
- 10 - Darrey, V. (1992). "The use of finite element techniques to optimise the insulation design of power transformers." *Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurment and Application, Conf.*, Pub. L, No. 363, PP. 174-7.
- 11 - Rubbai, A. (1994). "Computer aided instruction of power transformer design in the undergraduate power engineering class." *IEEE Transaction on Power System, IEEE*, Vol. 93, PP. 1174-1181.

حال حاضر در دست انجام می باشند) را بصورت زیر می توان بیان کرد:

الف - تکمیل و رفع نواقص تابع هدف مثل افزودن برخی از عوامل دیده نشده مانند هزینه ای که از بابت حمل و نقل یا زمین اختصاصی به ترانسفورماتور در پست صرف می شود.

ب - استفاده از تکنیکهای تحلیل میدان و یافتن ترکیب عایقی مناسب در فرایند طراحی بجای استفاده از ترکیبهای عایقی آماده .



- 12 - Shahzad, F. and Shwehdi, M. H. (1997). "Human – computer interaction of single/three phase transformer design and performance." *Industrial and Commercial Power System Technical Conference, IEEE*, PP. 193-196.
- 13 - Di. Barba, P., Kladas, A., Neittaanmaki, P., Radnicki, M. and Savini, A. (1994). "Application of global optimization strategies to the shape design of a transformer winding." *Advances in Engineering Software*, Vol. 19, Iss: 2, PP. 121-5.
- 14 - Saravolac, M. P. (1998). "Use of advanced software techniques in transformer design." *IEE Collquium on Design Technology of T&D Plant*, PP. 9/1-9/11.
- 15 - Davice, L. (1991). *Handbook of Genetic Algoritm*, RainHold .
- 16 - Franklin, A. C. And Franklin, D. P. (1998). *The J&P Transformer Book*, Twelfth Edition, Butterworths, Britania.
- ۱۷ - حسینی، س. ه. "طراحی بهینه ترانسفورمر توزیع." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۷۹).

### ضمیمه

#### برخی از ضرایب تابع هدف

- ۱ - قیمت واحد تلفات بی‌باری : با احتساب مدت عمر مفید ۳۰ سال برای ترانسفورماتورها و قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی ۶۰ ریال، با توجه به فرمول ارائه شده در متن مقاله قیمت واحد تلفات بی‌باری برای شرایط ایران برابر ۱۵۷۶۸۰۰۰ ریال می‌شود.
- ۲ - قیمت واحد تلفات بار : مطابق آنچه گفته شد متناسب با مشخصات خاص بار این مقدار متفاوت خواهد بود. در جدول شماره ۳ مقدار این کمیت برای برخی از بارها آورده شده است.
- ۳ - قیمت واحد وزن برخی از مواد : برای مس ۱۲۰۰۰ ریال، هسته M۵ ۶۶۴۲ ریال، هسته Hi-B ۷۳۱۲ ریال. روغن ترانسفورماتور ۲۴۰۰ ریال و آهن ۱۵۰۰ ریال به ازای هر کیلوگرم از این مواد می‌باشد.
- ۴ - قیمت هر نفر ساعت کار کارگر برابر ۵۸۸۵ ریال.

جدول ۳ : قیمت واحد تلفات بار برای برخی از بارهای نمونه.

نوع بار	صنعتی نوع ۱	صنعتی نوع ۲	کشاورزی	تجاری	خانگی گرمسیر	خانگی سردسیر	تلفیق خانگی و تجاری
قیمت واحد تلفات بار [ریال/kW]	۱۵۷۶۸۰۰۰	۶۰۱۱۵۵۰	۶۶۹۶۰۰۰	۱۴۶۴۶۴۵	۳۴۲۳۴۴۰	۵۲۲۵۳۱۵	۶۳۰۷۲۰۰
نسبت قیمت تلفات بار به بی‌باری	۱:۱	۲/۶:۱	۲/۴:۱	۱۰/۷:۱	۴/۶:۱	۳:۱	۲/۵:۱

