

## بهینه‌سازی موتور BLDC با استفاده از روش پارتوی مبتنی بر الگوریتم هوشمند SOA

سید عباس طاهر<sup>۱</sup>، محمدرضا شیبانی<sup>۲</sup> و غلامرضا لاله زار<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- گروه مهندسی قدرت- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

sataher@kashanu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- گروه مهندسی قدرت- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

mr.sheibani@ieee.org

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی- گروه مهندسی برق- دانشگاه یزد- یزد- ایران

lalezar@stu.yazduni.ac.ir

**چکیده:** امروزه موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دایم بدون جاروبک (BLDC) به علت دارا بودن مزایای زیادی نسبت به سایر موتورهای مورد استفاده در صنعت، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این رو طی سالیان اخیر، طراحی این موتورها موضوع بسیاری از مطالعات است. در این مقاله، به طراحی بهینه یک موتور BLDC با استفاده از روش پارتوی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی SOA پرداخته شده است. در این روش افزایش همزمان بازده و نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور، مبنای قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش پیشنهادی، انعطاف‌پذیری پاسخ به دست آمده از الگوریتم طراحی است، به این معنا که با تعیین درجه اهمیت هر کدام از اهداف می‌توان بهترین پاسخ را انتخاب کرد. در پایان، الگوریتم پیشنهادی بر روی نوعی موتور BLDC با ولتاژ ۲۲۰ ولت و توان خروجی ۳ کیلووات پیاده‌سازی شده و کارایی آن بررسی و ارزیابی شده است. **واژه‌های کلیدی:** موتور BLDC، بازده، گشتاور تولیدی، روش پارتوی، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر (SOA).

### ۱- مقدمه

می‌باشد. در این موتور برای کموتاسیون به جاروبک نیاز نیست، بلکه این کار به وسیله ادوات الکترونیکی انجام می‌شود. این موتورها می‌توانند یک و یا چند قطب داشته‌باشند. هنگام کار کردن با این موتور، اینورتر نقش کموتاتور را بازی می‌کند [۱-۴].

از نقطه نظر فنی موتور BLDC در مقایسه با موتورهای DC معمولی و القایی از مزایای زیر برخوردار است:

- سادگی سیستم کنترل و حداقل نیاز به سنسور
- عمر طولانی و نیاز کم به نگهداری
- مشخصه گشتاور- سرعت مناسب
- پاسخ دینامیکی مناسب
- بازده بالا
- عملکرد بدون نویز
- محدوده سرعت بالا
- بالا بودن نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور

با بررسی عملکرد موتورهای مختلفی که امروزه استفاده می‌شوند می‌توان به این نتیجه رسید که موتورهای DC مرسوم بازده بالایی دارند. اگر چه نکته منفی آن‌ها نیاز داشتن به کموتاتور و جاروبک و بالطبع احتیاج به مراقبت‌های خاص است. این مسأله باعث پیشنهاد نوع خاصی از این موتورها شده که موسوم به موتورهای DC بدون جاروبک<sup>۱</sup> (BLDC) است. موتور BLDC، موتور مغناطیس دایمی<sup>۲</sup> است که رتور آن از جنس مغناطیس دایم بوده و سیم پیچ استاتور آن مشابه موتورهای معمولی

\* تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۱۳

نام نویسنده مسئول: سید عباس طاهر

نشانی نویسنده مسئول: ایران- کاشان- دانشگاه کاشان- دانشکده

مهندسی برق و کامپیوتر- گروه مهندسی برق- قدرت

شاخص‌های نامعلوم نیز با توجه به توان، گشتاور و یا سرعت مورد نیاز تعیین می‌شوند. شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب ساختار هندسی موتور BLDC و شیارهای آن و شکل (۳) برش یک گام قطب موتور را نمایش می‌دهند. در شکل (۱)،  $R_{si}$  و  $R_{so}$  به ترتیب شعاع داخلی و خارجی استاتور و  $R_{ri}$  و  $R_{ro}$  به ترتیب شعاع داخلی و خارجی رتور هستند. با توجه به این سه شکل می‌توان دریافت که با وجود مشخص بودن تعدادی از شاخص‌های نشان داده در این شکل‌ها، سایر شاخص‌ها نیز مشخص خواهند شد. به این معنا که بسیاری از این شاخص‌ها به هم وابسته‌اند [۱].

با توجه به شکل‌های (۱) و (۲) داریم:

$$R_{sb} = R_{so} - \omega_{bi} \quad (۱)$$

$$R_{si} = R_{sb} - d_s = R_{ro} + g \quad (۲)$$

$$R_{ri} = R_{ro} - l_m - \omega_{bi} \quad (۳)$$

که در معادلات بالا  $d_s = d_1 + d_2 + d_3$ ،  $l_m$  پهنای ماده مغناطیس دایم و  $g$  طول فاصله هوایی است.

با مشخص بودن تعداد مغناطیس‌های دایم به کار رفته در موتور ( $N_m$ )، گام قطب در سطح داخلی استاتور بر حسب رادیان به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_p = R_{si}\theta_p \quad (۴)$$

که در این رابطه،  $\theta_p = \frac{2\pi}{N_m}$  است. همچنین، با مشخص بودن تعداد شیارهای استاتور ( $N_s$ )، گام شیار در شعاع داخلی رتور با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_s = R_{si}\theta_s \quad (۵)$$

که در این رابطه،  $\theta_s = \frac{2\pi}{N_s}$  است.

پهنای دندان در سطح استاتور به شکل رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\omega_t = \tau_s - \omega_s \quad (۶)$$

با توجه به ویژگی‌های بیان شده می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از این موتور در کاربردهایی که نیاز به توان و گشتاور مناسب وجود داشته و محدودیت فضا نیز وجود دارد، منطقی است.

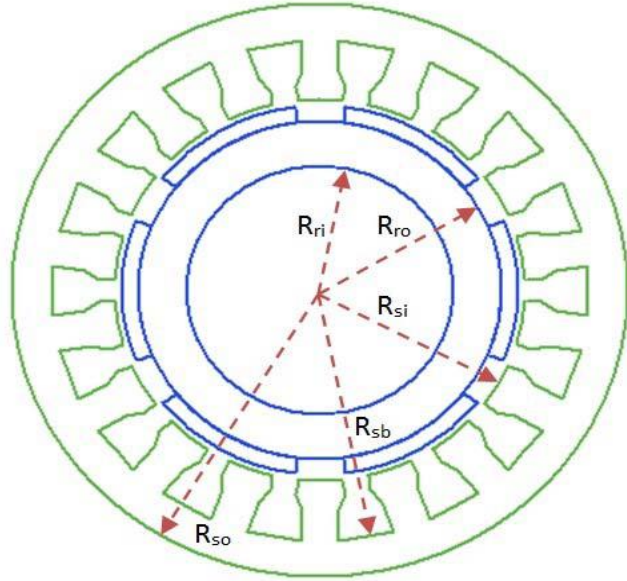
طی سالیان اخیر، کوشش‌هایی برای طراحی مناسب و بهینه موتور BLDC انجام شده است [۵-۱۰]. بیشتر بهینه‌سازی‌های انجام شده در طراحی‌های یاد شده، تک هدفه هستند. بهینه‌سازی‌های چند هدفه به کار رفته در طراحی این موتور نیز از روش وزن‌گذاری اهداف در تابع هدف استفاده کرده‌اند که چگونگی تعیین مقدار عددی به کار برده شده برای این اوزان را توجیه نکرده و در بیشتر اوقات به شکل سعی و خطا و یا سلیقه‌ای آن‌ها را انتخاب کرده‌اند.

در این مقاله، از یک تابع دو هدفه به منظور طراحی نوعی موتور BLDC با استفاده از ترکیب روش پارتو و الگوریتم بهینه‌سازی SOA استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی مناسب این روش در طراحی موتور است.

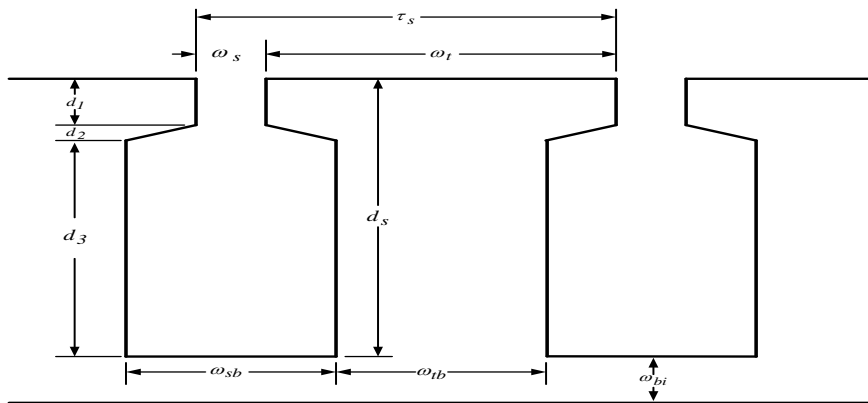
در این مقاله، پس از مقدمه، در بخش دوم اصول طراحی موتور BLDC و معادلات لازم به این منظور بررسی شده‌اند. تابع هدف مورد نظر برای طراحی موتور در بخش سوم معرفی شده است. در بخش چهارم الگوریتم پارتو<sup>۳</sup> و الگوریتم بهینه‌سازی SOA<sup>۴</sup> بررسی شده‌اند و در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی‌های آورده شده است. در خاتمه نتیجه‌گیری کلی در بخش ششم ارائه شده است.

## ۲- طراحی موتور BLDC

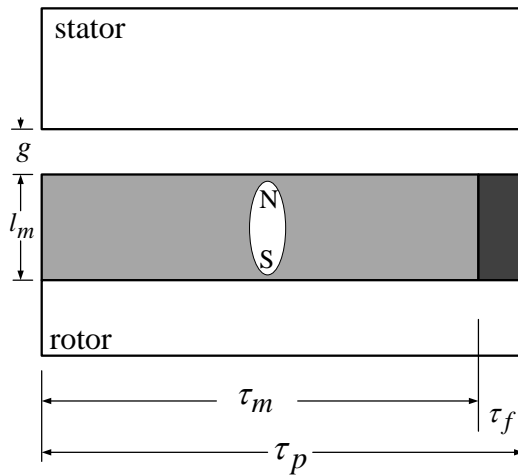
در این قسمت به طور خلاصه معادلات لازم برای طراحی موتور BLDC بررسی شده‌اند. معمولاً در طراحی موتورهای الکتریکی، تعدادی از شاخص‌ها با توجه به محدودیت‌های طراحی، از قبل مشخص هستند.



شکل (۱): ساختار هندسی موتور BLDC



شکل (۲): ساختار شیارهای استاتور موتور BLDC



شکل (۳): برش یک گام قطب موتور BLDC

تعداد کل هادی های شیار است. در رابطه (۱۳)،  
 $k_d = \alpha_{cp}$  در نظر گرفته شده و ضرایب  $k_p$  و  $k_s$  با  
 استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$k_p = \frac{\text{int}(N_{spp})}{N_{spp}} \quad (14)$$

$$k_s = 1 - \frac{\theta_{se}}{2\pi} \quad (15)$$

$$\theta_{se} = \frac{\pi \times N_m}{N_s} \quad (16)$$

تلفات اهمی کل به شکل:

$$P_r = N_{ph} I_{ph}^2 R_{ph} \quad (17)$$

تعریف می‌شود، که  $R_{ph}$  و  $N_{ph}$  به ترتیب تعداد  
 فازها و مقاومت اهمی هر کدام از فازهای موتور هستند.  
 همچنین تلفات هسته به شکل زیر در می‌آیند:

$$P_{cl} = \rho_{bi} V_{st} \Gamma(B_{max} f_e) \quad (18)$$

که  $\rho_{bi}$  چگالی جرمی پشته آهنی،  $V_{st}$  حجم استاتور  
 و  $\Gamma(B_{max} f_e)$  چگالی تلفات هسته ماده تشکیل دهنده  
 استاتور است. در معادله (۱۸) حجم استاتور با دقت مناسب  
 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{st} = [\pi(R_{s0}^2 - R_{si}^2) - N_s A_s] L k_{st} \quad (19)$$

در این رابطه  $A_s$  سطح مقطع شیار است. با در نظر  
 گرفتن روابط بالا، بازده موتور در سرعت نامی با استفاده از  
 رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{T \omega_m}{T \omega_m + P_r + P_{cl} + P_s} \cdot 100\% \quad (20)$$

که در این رابطه  $P_s$  تلفات چرخشی شامل تلفات  
 لرزش، اصطحاک و غیره است.

### ۳- تعریف تابع هدف مورد استفاده در

#### بهینه‌سازی

تابع هدف تعریف شده به منظور بهینه‌سازی موتور  
 طراحی شده در این مقاله، یک تابع دو هدفه است. نخستین

همچنین، پهنای انتهای شیار با توجه معادله (۷) محاسبه  
 می‌شود.

$$\omega_{sb} = R_{sb} - \omega_{tb} \quad (7)$$

با تعیین ضریب  $\alpha_{sd}$  به شکل:

$$\alpha_{sd} = \frac{d_1 + d_2}{\omega_{tb}} \quad (8)$$

بین ۱۵ تا ۵۰ درصد، پهنای شیار در مقابل کفشک  
 عبارت است از:

$$\omega_{si} = (R_{si} + \alpha_{sd} \omega_{tb}) \theta_s - \omega_{tb} \quad (9)$$

دو شاخص هندسی  $\omega_{tb}$  و  $\omega_{bi}$  در شکل (۲) با  
 تحلیل مدار معادل مغناطیسی موتور تعیین می‌شوند. با  
 بررسی مدار مغناطیسی می‌توان به این نتیجه رسید که شار  
 مغناطیسی عبوری از یوغ استاتور و فاصله هوایی با استفاده  
 از رابطه (۱۰) با یکدیگر در ارتباط هستند.

$$\varphi_{bi} = \frac{\varphi_g}{2} \quad (10)$$

به این ترتیب پهنای یوغ استاتور با استفاده از رابطه زیر  
 مشخص می‌شود.

$$\omega_{bi} = \frac{\varphi_g}{2 B_{max} k_{st} L} \quad (11)$$

که در این رابطه،  $B_{max}$  ماکزیمم چگالی شار یوغ،  
 $k_{st}$  ضریب تورق و  $L$  طول محور موتور است. همچنین،  
 پهنای دندان از رابطه:

$$\omega_{tb} = \frac{\varphi_g}{N_{sm} B_{max} k_{st} L} = \frac{2}{N_{sm}} \omega_{bi} \quad (12)$$

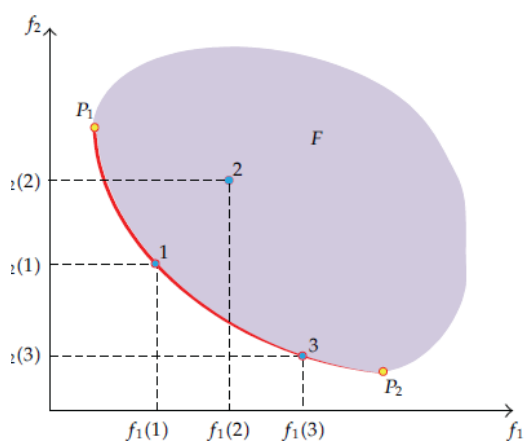
محاسبه می‌شود که در این رابطه،  $N_{sm}$  تعداد دندانه  
 های موتور است.

گشتاور الکتریکی تولیدی توسط موتور به شکل:

$$T = N_m k_p k_d k_s B_g L R_{ro} N_{spp} n_{si} \quad (13)$$

بیان می‌شود. که در این رابطه  $k_p$ ،  $k_d$  و  $k_s$  به  
 ترتیب ضریب توزیع، گام و مورب شدن هستند، همچنین  
 $N_{spp}$  تعداد شیارها به ازای هر قطب به ازای هر فاز و  $n_s$

می‌شود که برای هر کدام از جواب‌های مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف  $f_1$ ، مقدار  $f_2$  مربوط به آن نقطه و برای هر کدام از جواب‌های مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف  $f_2$ ، مقدار  $f_1$  مربوط به آن نقطه محاسبه می‌شود. پس از آن، مقایسه‌ای بین جواب‌های مسائل همزمان (نقاط به دست آمده در صفحه مختصات  $f_1$ ،  $f_2$ ) انجام می‌گیرد و تعدادی از جواب‌ها حذف می‌شوند. طبق این روش، شرط حذف شدن نقطه ۲ توسط نقطه ۱ آن است که  $f_1(1) < f_1(2)$  و  $f_2(1) < f_2(2)$ . در این صورت نقطه ۱ نسبت به نقطه ۲ هم برای برآورده کردن  $f_1$  و هم  $f_2$  مناسب‌تر است. اما همان طور که از شکل نیز مشخص است نقاط ۱ و ۳ همدیگر را حذف نمی‌کنند زیرا نقطه ۳ تابع  $f_2$  و نقطه ۱ تابع  $f_1$  را بهتر برآورده می‌سازد. بنابراین، منحنی پارتو، پاسخ‌های باقی‌مانده و حذف نشده را نشان می‌دهد که بسته به نظر کاربر مبنی بر میزان اهمیت بیشتر هر کدام از توابع، بهترین پاسخ بین این نقاط انتخاب می‌شود. در واقع منحنی نشان داده شده در شکل (۴) دسته جواب‌های حاصل از روش پارتو است [۱۰-۱۲].



شکل (۴): منحنی نمونه پارتو

در حل مسأله بهینه‌سازی مطرح شده در این مقاله از روش پارتو استفاده شده است. به این شکل که در این مسأله  $f_1$  تابع هدف افزایش نسبت گشتاور نامی به حجم موتور و  $f_2$  تابع هدف افزایش بازده موتور است که هر کدام از بهینه‌سازی‌ها با استفاده از الگوریتم SOA که در قسمت بعد توضیح داده شده، انجام می‌گیرد. در نهایت،

هدف، افزایش نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور و هدف دوم افزایش بازده موتور طراحی شده در نظر گرفته شده است. به این ترتیب تابع هدف مورد نظر به شکل زیر در می‌آید:

$$\text{objective function : } \min \begin{cases} f_1 = \frac{I}{(T/V)} \\ f_2 = \frac{I}{\eta} \end{cases} \quad (21)$$

که در آن  $T$  گشتاور،  $V$  حجم و  $\eta$  بازده موتور است.

#### ۴- استفاده از روش پارتو به منظور حل

##### مسائل بهینه‌سازی چند هدفه

بسیاری از مسایل دنیای واقعی با بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف مواجه هستند که این توابع در بیشتر موارد، هم واحد نبوده و با یکدیگر در تضام می‌باشند. بهینه‌سازی چند هدفه با توابع هدف متضاد، به جای رسیدن به یک جواب منحصر به فرد به ایجاد یک مجموعه جواب بهینه منجر می‌شود. علت قابل قبول بودن تمامی نقاط مجموعه جواب آن است که با در نظر گرفتن همه توابع هدف، هیچ یک نمی‌توانند بر دیگری برتری داشته باشند. این جواب‌های بهینه تحت عنوان مجموعه جواب بهینه پارتو شناخته می‌شوند [۱۱-۱۳]. در قسمت بعد این روش بررسی شده است.

##### ۴-۱- مروری بر روش پارتو

همان‌گونه که بیان شد از این روش به منظور حل مسایل بهینه‌سازی چند هدفه می‌توان استفاده کرد. به منظور تشریح کامل این روش فرض شده است که هدف، برآورده کردن هم‌زمان دو تابع هدف  $f_1$  و  $f_2$  است. پارتو عمل بهینه‌سازی را هم‌زمان به شکل جداگانه برای دو تابع هدف انجام می‌دهد و در هر مرحله بین جواب‌های به دست آمده از نتایج دو مسأله بهینه‌سازی، مقایسه انجام داده و تعدادی از جواب‌ها را حذف می‌کند. در این شرایط به تمام جواب‌های به دست آمده، یک نقطه در صفحه مختصات، طبق شکل (۴) تعلق می‌گیرد. این کار به این شکل انجام

می‌شوند. در این صورت:

$$x_{knj,worst} = \begin{cases} x_{lj,best}, & \text{if } R_j \leq 0.5 \\ x_{knj,worst}, & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

که  $R_j$  یک عدد حقیقی تصادفی یکنواخت در بازه  $[0, 1]$  و  $x_{knj,worst}$  مربوط به  $j$  امین بعد  $n$  امین بدترین موقعیت در  $k$  امین زیر جمعیت و  $x_{lj,best}$   $j$  امین بعد بهترین موقعیت در  $l$  امین زیر جمعیت با  $k \neq l, k = 1, 2, \dots, K-1, n, l, k = 1, 2, \dots, K-1$  است. در روش ارائه شده در این قسمت، اطلاعات خوب به وسیله هر زیرجمعیت بین زیر جمعیت‌ها مبادله می‌شود، بنابراین، گوناگونی جمعیت افزایش می‌یابد [14].

#### 4-2-2- مسیر جستجو

در الگوریتم SOA، مسیر جستجوی هر جستجوگر بر اساس چندین درجه‌بندی تجربی<sup>o</sup> (EG) با مقایسه موقعیت کنونی و قبلی جستجوگرها و همسایه‌های آن‌ها مشخص می‌شود. درجه‌بندی می‌تواند به شکل زیر انجام شود:

$$\bar{d}_{i,ego}(t) = \text{sign}(\bar{p}_{i,best}(t) - \bar{x}_i(t)) \quad (24)$$

$$\bar{d}_{i,alt1}(t) = \text{sign}(\bar{g}_{i,best}(t) - \bar{x}_i(t)) \quad (25)$$

$$\bar{d}_{i,ego}(t) = \text{sign}(\bar{p}_{i,best}(t) - \bar{x}_i(t)) \quad (26)$$

که  $\bar{d}_{i,ego}(t)$  مسیر خودپرستانه،  $\bar{d}_{i,alt1}(t)$  و  $\bar{d}_{i,alt2}(t)$  مسیرهای نوع‌دوستانه هر جستجوگر،  $\bar{p}_{i,best}(t)$ ،  $\bar{g}_{i,best}(t)$  و  $\bar{l}_{i,best}(t)$  به ترتیب، بهترین موقعیت قبلی جستجوگر، بهترین موقعیت قبلی همسایه‌ها و بهترین موقعیت کنونی همسایه‌هاست.  $\text{sign}(\cdot)$  تابع علامت هر بعد بردار ورودی و  $\bar{x}_i(t) = [\bar{x}_{i1}, \bar{x}_{i2}, \dots, \bar{x}_{iD}]$  موقعیت  $i$  امین جستجوگر در زمان  $t$  است. در این الگوریتم، هر جستجوگر  $i$  می‌تواند با ارزیابی موقعیت‌های اخیرش به صورت زیر به یک درجه‌بندی دست یابد:

$$\bar{d}_{i,pro}(t) = \text{sign}(\bar{x}_i(t_1) - \bar{x}_i(t_2)) \quad (27)$$

که در این رابطه  $t_1, t_2 \in \{t, t-1, t-2\}$  و  $\bar{x}_i(t_1)$  از  $\bar{x}_i(t_2)$  بهتر است. هر بعد مسیر جستجوی  $i$  امین

تعدادی از پاسخ‌ها حذف شده و منحنی پارتو باقی می‌ماند.

#### 4-2- الگوریتم بهینه‌سازی SOA

الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر (SOA) یک الگوریتم جستجوی اکتشافی بر مبنای جمعیت است که در آن عملیات بهینه‌سازی به عنوان جستجوی یک جواب بهینه به وسیله یک جمعیت جستجوگر در نظر گرفته می‌شود. این الگوریتم روی یک تعداد پاسخ که جمعیت جستجو نامیده می‌شوند عمل می‌کند. اعضای جمعیت جستجو، جستجوگر نامیده می‌شوند. به منظور به اشتراک گذاشتن اطلاعات، برای هر جستجوگر یک همسایه تعریف می‌شود. همه جستجوگرها پاسخ‌هایی در زیر جمعیت‌های همسایه تولید می‌کنند. در این مطالعه، مسأله بهینه‌سازی مورد نظر یک مسأله مینیمم‌سازی در نظر گرفته شده است [14-18].

#### 4-2-1- چگونگی عملکرد SOA

در SOA، یک مسیر جستجوی  $d_{ij}(t)$  و یک طول گام  $\alpha_{ij}(t)$  جداگانه برای هر جستجوگر  $i$  در هر بعد  $j$  برای هر گام زمانی  $t$  محاسبه می‌شود که:  $\alpha_{ij}(t) \geq 0$  و  $d_{ij}(t) \in \{-1, 0, 1\}$ .  $d_{ij}(t) = 1$  به این معناست که  $i$  امین جستجوگر به سمت مسیر مثبت محور مختصات روی بعد  $j$  می‌رود.  $d_{ij}(t) = -1$  به این معناست که جستجوگر به سمت مسیر منفی می‌رود و  $d_{ij}(t) = 0$  به این معناست که جستجوگر در موقعیت قبلی باقی می‌ماند. برای هر جستجوگر  $i$   $(1 \leq i \leq s)$  اندازه جمعیت است، موقعیت روی هر بعد  $j$   $(1 \leq j \leq D)$  به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + \alpha_{ij}(t) d_{ij}(t) \quad (22)$$

به این علت که هر یک از زیرجمعیت‌ها به وسیله اطلاعات خودشان جستجو می‌کنند، ممکن است به سادگی به نقاط بهینه محلی همگرا شوند. به منظور جلوگیری از این شرایط، موقعیت بدترین جستجوگرهای  $k-1$  هر زیر جمعیت با بهترین آن‌ها در هر  $k-1$  زیر جمعیت دیگر با استفاده از اپراتور تقاطع دو جمله‌ای مربوط ترکیب

متفاوت از  $\bar{x}_{best}$  بوده و  $\delta$  برای همه جستجوگرها در زیرجمعیت‌های مشابه یکسان است [۱۷-۱۴].

در نهایت طول گام از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\mu_{ij} = \text{RAND}(\mu_i, 1) \quad (31)$$

$$\alpha_{ij} = \delta_j \sqrt{-\ln(\mu_{ij})} \quad (32)$$

#### ۴-۳- روش پارتوی مبتنی بر SOA به کار رفته

##### در بهینه‌سازی موتور BLDC

فلوچارت روش پیشنهادی به منظور بهینه‌سازی موتور BLDC در شکل (۵) آورده شده است. همان‌گونه که در فلوچارت نشان داده شده است، نخستین گام، تعیین موقعیت اولیه جستجوگرهاست. چنانچه در قسمت‌های قبل نیز توضیح داده شد، موقعیت اولیه جستجوگرها به شکل تصادفی در محدوده مجاز، برای هر کدام از شاخص‌ها مشخص می‌شود. در هر تکرار، پاسخ‌های غالب که مقدار  $f_1$  و  $f_2$  آن‌ها بهینه است برجای می‌مانند. بدین ترتیب در پایان، پاسخ‌های پارتو به شکل دسته‌ای جواب است که در ادامه بیشتر در مورد آن توضیح داده می‌شود.

#### ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج طراحی بهینه موتور BLDC با استفاده از روش پیشنهادی بررسی شده است. موتور طراحی شده، سه فاز، با توان خروجی ۳ کیلووات و ولتاژ نامی ۲۲۰ ولت است. تعداد قطب‌های مغناطیسی موتور مورد نظر ۱۲ و تعداد شیارهای استاتور آن برای قرارگرفتن سیم‌پیچ‌ها ۳۶ عدد است. به این ترتیب  $N_{spp}$  یعنی تعداد شیارهای استاتور به ازای هر فاز به ازای هر قطب برابر یک خواهد بود. بنابراین، با استفاده از رابطه (۱۴)،  $k_p = 1$  به دست خواهد آمد. ضریب  $k_d = \alpha_{sd}$  با توجه به رابطه (۸) کمابیش حدود ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است. با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶)، مقادیر  $\theta_{se} = 0.83$  و  $k_s = 0.87$  به دست می‌آید. ماده مغناطیس دایم مورد استفاده در رتور، از آلایزهای نئودیم آهن برن (NdFeB) در نظر گرفته شده و نوع فولاد تشکیل‌دهنده استاتور و رتور M19-24G است. چگالی شار استاتور و رتور حدود ۲

جستجوگر، با اعمال قانون نسبی زیر انتخاب می‌شود:

$$d_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{if } r_j \leq p_j^{(0)} \\ +1, & \text{if } p_j^{(0)} \langle r_j \langle p_j^{(0)} + p_j^{(+1)} \\ -1, & \text{if } p_j^{(0)} + p_j^{(+1)} \langle r_j \langle I \end{cases} \quad (28)$$

که  $r_j$  یک عدد تصادفی یکنواخت در بازه [۰ و ۱] و  $p_j^{(m)}$  (درصدی از عدد  $m$  از مجموعه  $\{d_{ij,ego}, d_{ij,alt1}, d_{ij,alt2}, d_{ij,pro}\}$  روی هر بعد  $j$  برای هر چهار مسیر تجربی است (مثلاً  $(p_j^{(m)}) = (\text{the number of } m) / 4$ ).

#### ۴-۲-۳- طول گام

در الگوریتم SOA، سیستم فازی برای شبیه‌سازی رفتار جستجوی انسان انتخاب می‌شود. در این الگوریتم مقادیر هدف تمام جستجوگرها به صورت کاهشی مرتب شده و به ترتیب ۱ تا S به عنوان ورودی منطق فازی در نظر گرفته می‌شوند.

برای به دست آوردن طول گام در ابتدا تابع عضویت به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_i = \mu_{max} - \frac{s - I_i}{s - 1} (\mu_{max} - \mu_{min}) \quad (29)$$

که  $I_i$  تعداد توالی  $\bar{x}_i(t)$  بعد از دسته‌بندی مقادیر هدف و  $\mu_{max}$  مقدار درجه عضویت ماکزیمم (مساوی یا کمی کوچکتر از یک) هستند. در این مطالعه تابع عضویت زنگوله‌ای  $\mu(x) = e^{-x^2 / 2\delta^2}$  در قسمت کنش منطق فازی استفاده می‌شود.

شاخص  $\delta$  در تابع عضویت بل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\delta} = \omega \cdot \text{abs}(\bar{x}_{best} - \bar{x}_{rand}) \quad (30)$$

شاخص  $\omega$  به منظور کاهش طول گام با افزایش گام زمانی استفاده می‌شود تا دقت جستجو افزایش یابد.  $\bar{x}_{best}$  و  $\bar{x}_{rand}$  بهترین جستجوگر و یک جستجوگر تصادفی انتخاب شده از زیر جمعیت‌های مشابه هستند.  $\bar{x}_{rand}$

SOA مورد استفاده، در جدول (۱) ارائه شده است.

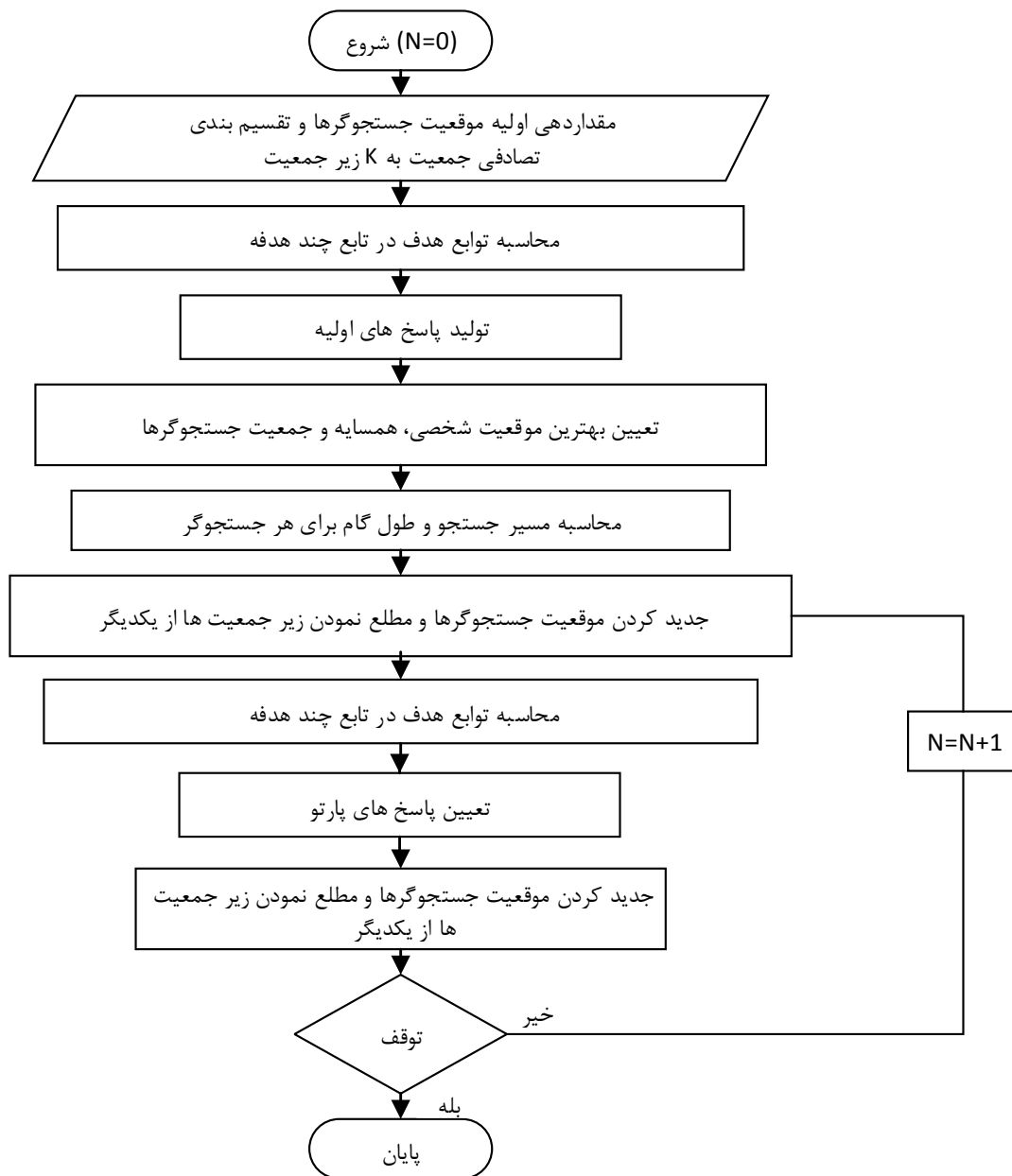
جدول (۱): شاخص‌های به کار رفته در الگوریتم SOA

شاخص	مقدار
$\omega_S$	0.9
$\mu_{min}$	0.0111
$\mu_{max}$	0.97
$K$	3

تسلا و چگالی شار پسماند ماده مغناطیس داریم  $1/3$  است.

### ۱-۵- تنظیم شاخص‌های الگوریتم بهینه‌سازی

در این مطالعه، حدود شاخص‌های موتور برای تعیین شرایط اولیه، بر اساس حجم تقریبی موتور در دست طراحی تعیین می‌شود. در واقع مقدار اولیه شاخص‌ها به صورت تصادفی در محدوده ۱۰ درصد بالاتر و پایین‌تر از مقادیر مذکور در نظر گرفته شده است. شاخص‌های الگوریتم



شکل (۵): فلوچارت روش پارتوی مبتنی بر SOA به منظور بهینه‌سازی موتور BLDC



## ۲-۵- بررسی نتایج بهینه‌سازی

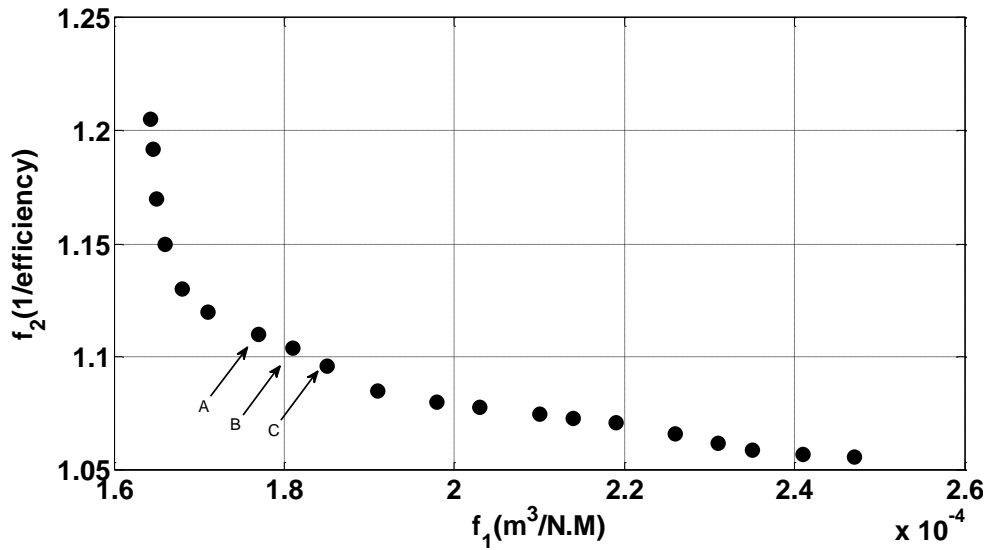
با اعمال روش بهینه‌سازی پیشنهادی، بر تابع دوهدفه تعریف شده در رابطه (۱۸)، منحنی پارتوی به دست آمده به صورت شکل (۶) در می‌آید. همان‌گونه که در بخش چهارم به آن اشاره شد، روش پارتو دسته‌ای از جواب‌ها را در اختیار قرار می‌دهد. در شکل (۶) دسته پاسخ‌های به دست آمده پس از اعمال الگوریتم، نشان داده شده است. دو هدف مورد نظر در این منحنی کاهش همزمان دو تابع  $f_1$  (افزایش نسبت گشتاور به حجم موتور) و  $f_2$  (افزایش بازده موتور) است. با بررسی دسته پاسخ‌های شکل (۶) می‌توان چنین گفت که پاسخ‌ها هرچه به سمت راست پیش می‌روند از نقطه نظر افزایش بازده موتور مناسب‌تر و هرچه به سمت چپ پیش می‌روند از لحاظ افزایش نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور برتر می‌باشند. انتخاب بهترین جواب از میان دسته پاسخ‌های پارتو به درجه اهمیت اهداف موجود در تابع هدف از نظر کاربر بستگی دارد. معمولاً پاسخ‌های روی قوس منحنی پارتو به عنوان بهترین پاسخ‌ها در نظر گرفته می‌شود. با این توضیح می‌توان پاسخ B را در شکل (۶) به عنوان بهترین پاسخ در نظر گرفت. البته به علت نزدیک بودن شرایط نقاط A و C به نقطه B می‌توان این دو نقطه را بسته به درجه اهمیت هر کدام از توابع  $f_1$  و  $f_2$  به عنوان پاسخ نهایی طراحی، جایگزین نقطه B کرد. جدول (۲) شاخص‌های پیشنهادی موتور توسط الگوریتم را در صورت انتخاب نقطه B به عنوان بهترین پاسخ نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن شاخص‌های این جدول، بازده موتور تقریباً ۹۲ درصد و نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور تقریباً  $N.M / m^3$  ۵۱۸۰ خواهد بود. به منظور بررسی نتایج به دست آمده از

الگوریتم پیشنهادی، موتور طراحی شده توسط قابلیت RMxprt نرم‌افزار Maxwell شبیه‌سازی شده است. شکل (۷) مش‌بندی یک قطب موتور مورد نظر را نشان می‌دهد. شکل‌های (۸) و (۹) نیز، به ترتیب منحنی‌های گشتاور-سرعت و توان خروجی-سرعت موتور را نمایش می‌دهند. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌گردد، توان تولیدی موتور در سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه، برابر ۳ کیلووات و گشتاور ایجاد شده معادل ۱۴۵ نیوتن-متر است. همچنین، حداکثر توان تولیدی موتور برابر ۴/۲ کیلووات بوده که در سرعتی معادل ۴۸۰ دور در دقیقه و گشتاور حاصله ۸۴ نیوتن-متر است.

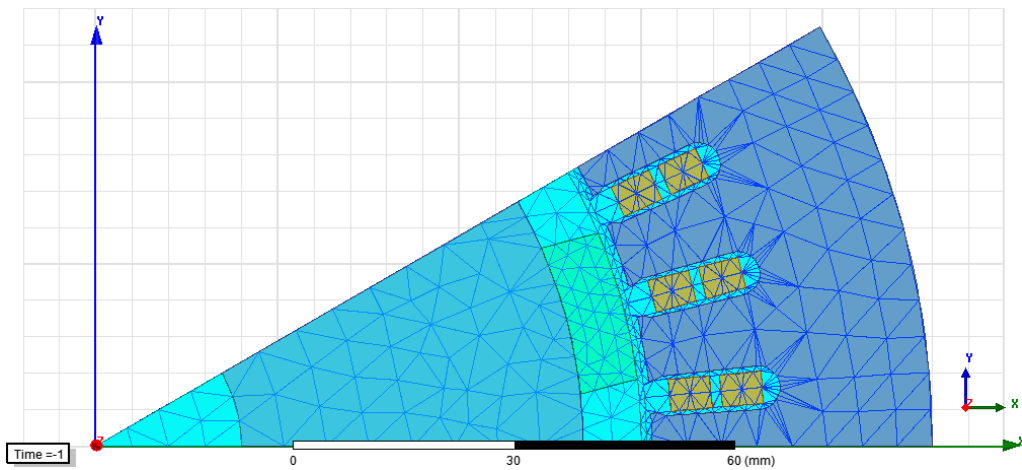
جدول (۲): شاخص‌های موتور بهینه شده (نتایج پاسخ B در

منحنی پارتو شکل ۶)

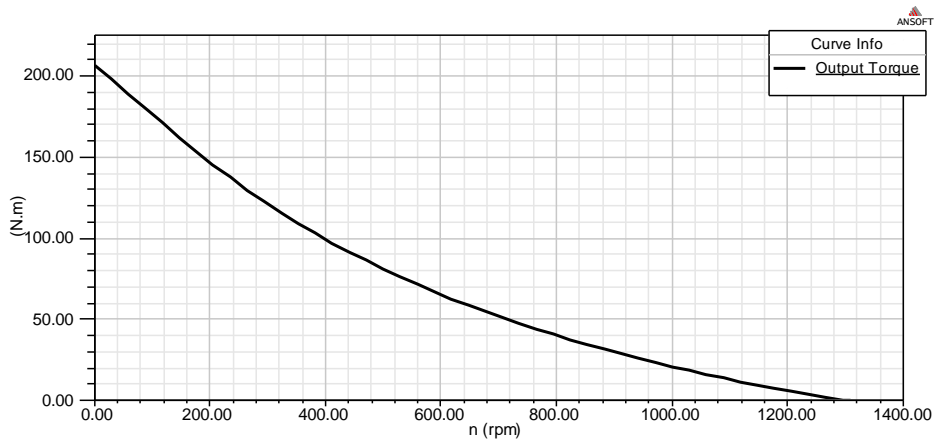
مقدار	شاخص	
۱۲cm	طول محور موتور	$L$
۲۱ mm	شعاع داخلی رتور	$R_{ri}$
۷۵ mm	شعاع خارجی رتور	$R_{ro}$
۷۶ mm	شعاع داخلی استاتور	$R_{si}$
۱۱۴ mm	شعاع خارجی استاتور	$R_{so}$
۲ mm	طول فاصله هوایی	$g$
۰/۷۵ mm	شاخص شیار	$d_1$
۱/۲۵ mm	شاخص شیار	$d_2$
۱۳/۲ mm	شاخص شیار	$d_3$
۶۱ mm	پهنای کفشک	$\omega_t$
۴/۵ mm	دهانه شیار	$\omega_s$
۰/۷۳	$\tau_m / \tau_p$	$\alpha_m$
۵/۳ mm	ضخامت مغناطیس دائم	$l_m$



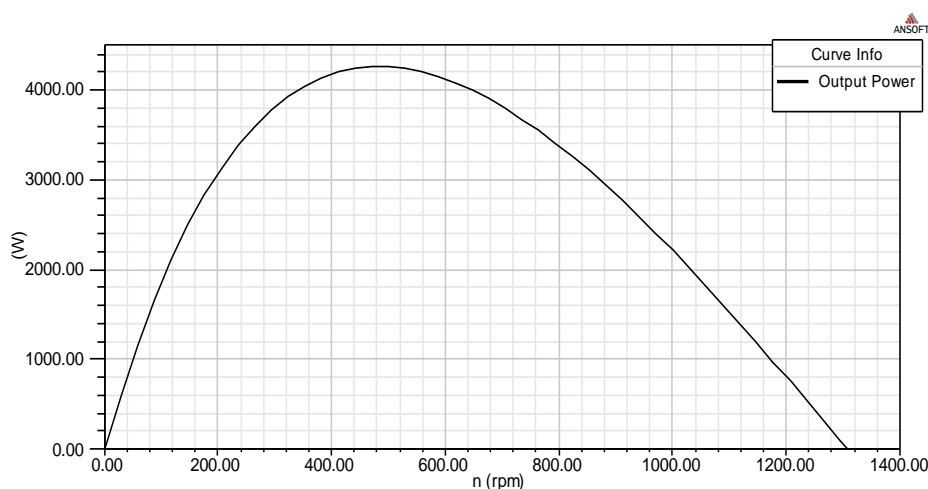
شکل (۶): دسته پاسخ‌های پارتوی حاصل از بهینه‌سازی موتور BLDC



شکل (۷): مش‌بندی یک قطب موتور BLDC طراحی شده



شکل (۸): منحنی گشتاور-سرعت موتور BLDC طراحی شده



شکل (۹): منحنی توان-سرعت موتور BLDC طراحی شده

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، به طراحی بهینه موتور BLDC پرداخته شده است. هدف از بهینه‌سازی افزایش هم‌زمان بازده و نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور طراحی شده است. یکی از مشکلات مسایل بهینه‌سازی چندهدفه تعیین ضرایب اهداف در تابع هدف است. به این منظور در این مقاله روش پارتوی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی SOA استفاده شده است. بر اساس این روش دسته‌ای از پاسخ‌ها به عنوان خروجی در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. به این ترتیب کاربر می‌تواند بسته به درجه اهمیت هر کدام از اهداف، یکی از پاسخ‌ها را انتخاب کند. در بخش شبیه‌سازی، پس از تعیین بهترین پاسخ از روی منحنی پارتو، موتور طراحی شده، توسط نرم افزار Maxwell شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده کارایی روش یاد شده را در بهینه‌سازی نشان می‌دهد.

## مراجع

- and brushless DC motor drive, CRC Publishing, 2009.
- [5] Nekoubin, A., "Design a single-phase BLDC motor and finite element analysis of stator slots structure effects on the efficiency", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 5, No. 5, pp. 741-748, 2011.
  - [6] Jang, S., Cho, H., Choi, S., "Design and analysis of a high speed brushless DC motor for centrifugal compressor", IEEE Trans. on Magnetic, Vol. 43, No. 6, pp. 2573-2575, 2007.
  - [7] Vivier, S., Gillon, F., Brochet, P., "Optimization derived from experimental design method and their application to the design of a brushless direct current motor", IEEE Trans. on Magnetic, Vol. 37, No. 5, pp. 3622-3626, 2007.
  - [8] Chin, Y.K., Arshad, W.M., Backstorm, T., Sadarangani, C., "Design of a compact BLDC motor for transient applications," European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 3-10, Aug. 2001.
  - [9] Upadhyay, P.R., Rajagopal, K.R., "Genetic algorithm based design optimization of a permanent magnet brushless DC motor," Journal of Applied Physics, Vol. 97, No. 10, pp. 516-519, 2005.
  - [10] Hwang, C.C., "Design and analysis of a brushless DC motor for applications in robotics," Electric Power Applications, Vol. 6, pp. 385-389, 2012.
  - [11] Miettinen, K.M., Nonlinear multi-objective optimization, Boston: Kluwer Academic Publisher; 1999.
  - [12] Ketabi, A., Nosratabadi, S.M., Sheibani, M.R., "Optimal PMU placement with uncertainty using Pareto method," Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2012, Article ID. 501893, Jun. 2012.
  - [13] Zhang, W.H., Gao, T., "A min-max method with adaptive weightings for uniformly spaced Pareto optimum points," Journal of Computers and Structures, Vol. 84, No. 28, pp. 1760-1769, 2006.
  - [14] Gholipour, E., Nosratabadi, S.M., "A new
  - [1] Hanselman, C., Brushless Permanent magnet motor design, Mc Graw-Hil Publishing, 1994.
  - [2] Jang, G.H., Yoon, J.W., "The characterization of magnetic force and torque in a BLDC motor", Asia-Pacific Vibration Conference 97, November, 1997.
  - [3] Jang, G.H., Chang, J.H., "Finite element analysis of an electromechanical field of a BLDC motor consideration speed control and mechanical flexibility", IEEE transaction on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 945-948, 2002.
  - [4] Krishnan, R., Permanent magnet synchronous

- coordination strategy of SSSC and PSS controllers in power system using SOA algorithm based on Pareto method,” *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 67, pp. 462-471, 2015.
- [15] Dai, C., Chen, W., Song, Y., Zhu, Y., “Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch,” *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 24, No. 3, pp. 1218-1231, 2009.
- [16] Dai, C., Chen, W., Song, Y., Zhu, Y., “Seeker optimization algorithm: a novel stochastic search algorithm for global numerical optimization,” *Journal of System Engineering and Electronics*, Vol. 21, No. 2, pp. 300-311, 2010.
- [17] Dai, C., Chen, W., Cheng, Z., Li, Q., Jiang, Z., Jia, J., “Seeker optimization algorithm for global optimization: A case study on optimal modeling of proton exchange memberane fuel cell (PEMFC),” *Int. Journal of Electrical Power and Energy System*, Vol. 33, No. 3, pp. 369-376, 2011.
- [18] Ketabi, A., Sheibani, M.R., Nosratabadi, S.M., “Power quality meters placement using seeker optimization algorithm for harmonic state estimation,” *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, pp. 141-149, 2012.

#### زیر نویس ها

1. Brush Less DC Motor
2. Permanent Magnet
3. Pareto
4. Seeker Optimization Algorithm
5. Empirical Gradients