



## بهینه سازی پارامترهای هندسی موتور الکتریکی بدون جاروبک

ناصر نعمتی<sup>۱</sup>، عبدالله خالصی دوست<sup>۲\*</sup>، محمد طلوع عسکری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\*Email: [a.khalesi@semnaniau.ac.ir](mailto:a.khalesi@semnaniau.ac.ir)

### چکیده

موتورهای دی سی بدون جاروبک یکی از موتورهای محبوب و پرکاربرد در سال های اخیر بوده اند. استفاده از این موتور در کاربردهای حساس و ظریف به خاطر وجود امتیازاتی نظیر کم بودن نویز، عملکرد دقیق، کنترل دقیق سرعت، گشتاور و قابلیت انعطاف در ساختمان و شکل آن است. با توجه به کاربردهای حساس این موتور، طراحی موتور به طوری که دارای کمترین حجم و بیشترین بازدهی باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، روشی جدید برای کاهش هم زمان حجم، تلفات و هزینه ساخت موتور دی سی بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری پیشنهاد شده است. در گام اول، تمام روابط الکتریکی موتور بر پایه پارامترهای هندسی آن استخراج و بیان شده است. در گام دوم، تابع شایستگی که همان کاهش هم زمان حجم، تلفات و هزینه ساخت موتور دی سی بدون جاروبک می باشد، بر پایه روابط بدست آمده در مرحله قبلی تعریف می شود. در گام سوم، از الگوریتم رقابت استعماری برای انتخاب بهترین مقادیر پارامترهای هندسی موتور طوری که تابع هدف حداقل شود، استفاده شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان داد که الگوریتم رقابت استعماری دارای عملکرد خوبی است و می تواند با انتخاب مناسب پارامترهای هندسی، مقدار حجم، تلفات و هزینه را به طور چشمگیری کاهش دهد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۷ تیر ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۳ شهریور ۱۳۹۶

ارائه در سایت: ۱۵ آذر ۱۳۹۶

### کلیدواژگان:

الگوریتم رقابت استعماری، تابع هدف، موتور DC بدون جاروبک، بهینه سازی

## Optimization of geometric parameters of brushless electric motor

Naser Nemati<sup>1</sup>, Abdollah Khalesi doost<sup>2\*</sup>, Mohammad Tolou Askari<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

3- Department of Power Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

\* Semnan, Iran, [ab.khalesi@yahoo.com](mailto:ab.khalesi@yahoo.com)

### Article Information

Original Research Paper

Received 8 July 2017

Accepted 4 September 2017

Available online 6 December 2017

### Keywords

Colonial competition algorithm,

The objective function,

DC motor without brush,

Optimization

### ABSTRACT

In this research, a new method is proposed to reduce the coincidence of the volume, losses and cost of making a DC motor without brushes using colonial competition optimization algorithms. In the first step, all electric motor relations are extracted and expressed based on its geometric parameters. In the second step, the function of competence, which is the same reduction in the volume, losses and cost of construction of a DC motor without brush, is defined on the basis of the relationships obtained in the previous stage. In the third step, the colonial competition algorithm is used to select the best values of the geometric parameters of the engine so that the objective function is minimized. The results of simulations show that the colonial competition algorithm has a good performance and can dramatically reduce the size, loss, and cost by appropriate selection of geometric parameters.

Please cite this article using: Brushless Electric Motor

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

N. Nemati, A.Khalesi doost, M.T.Askari Optimization of geometric parameters of brushless electric motor, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 8, No. 3, pp. 36-43, 2017 (In Persian)

## ۱- مقدمه

موتورهای دی سی آهنربای دائم بدون جاروبک بصورت گسترده در تجهیزات کامپیوتری، فضایی، زیردریایی، ربات ها و وسایل الکتریکی استفاده می شوند. برای کاربردهایی با سرعت پائین، استفاده از موتورهای آهنربای دائم نیاز به گیربکس را که در ماشین های القائی استاندارد وجود دارد، حذف می کند [۱،۲]. گیربکس ها در مرور زمان دچار فرسایش و شکستگی شده و تعمیر آنها هزینه بردار می باشد. همچنین در حین کار، به جز ایجاد سر و صدای اضافی، مقداری از توان مکانیکی موتور را نیز مصرف می کنند. [۳] در مورد موتورهای جریان مستقیم با جاروبک که عمل کموتاسیون در آنها توسط جاروبک که یک بخش مکانیکی بوده

انجام می گیرد باید گفت که اولاً هر بخش مکانیکی نیاز به تعمیر و نگهداری دارد که این مورد نیز مستثنی نیست، ثانیاً به دلیل اصطکاک موجود بین اجزاء این بخش از راندمان موتور کاسته می شود و ثالثاً جرقه های به وجود آمده در هنگام تعویض قطبها نیز احتمال آتش گرفتن موتور را افزایش می دهد [۴،۵]. به منظور فرار از این مشکلات با کمک گرفتن از خاصیت میدان مغناطیسی، کنترل موتورهای DC به صورت الکتریکی صورت موقعیت روتور صورت می پذیرد، موتور قدرت کنترل سرعت و گشتاور را نیز خواهد داشت که احتیاج به انکودر را نیز حذف می کند. به این گونه از موتورها اصطلاحاً موتورهای آهنربای دائم جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) گفته می شود [۶،۷]. محققین بسیاری بر روی موضوع طراحی بهینه موتور BLDC کار کرده اند. در [۸] محققان روشی بر پایه بهینه سازی سراسری و شاخه جبری برای بهینه سازی محرک های الکترومکانیکی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک پیشنهاد داده اند. در مرجع [۹] یک مطالعه مقایسه ای بین روش های بهینه سازی، شامل روش های مبتنی بر گرادیان، روش جستجوی مستقیم و الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه موتور BLDC ارائه شده است. در مرجع شماره [۱۰] یک روش هوشمند بر پایه الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک پیشنهاد شده است. در روش ارائه شده، موتور از لحاظ مشخصه های مغناطیسی، راندمان و حرارتی بررسی شده است. در [۱۱]، محققان از روش تحلیل میدان الکترومغناطیسی بر پایه متد اجزا محدود برای طراحی توان

چگالی بالا و راندمان بالا در موتور BLDC استفاده کرده اند. در مطالعه انجام شده از موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در وسایل الکتریکی کوچک استفاده شده است. در [۱۲]، طراحی بهینه موتور جریان مستقیم بدون جاروبک بر پایه الگوریتم ژنتیک پیشنهاد داده شده است. در روش پیشنهادی، بالا بردن راندمان موتور و کاهش وزن خالص آن مورد توجه بوده است. در [۱۳]، روشی بر پایه متد تحلیلی ساده شده برای طراحی بهینه BLDC دو قطبی پیشنهاد شده است. در [۱۴]، یک روش بهینه سازی چند هدفه برای طراحی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک ارائه شده است. روش ارائه شده از مدل مدار مغناطیسی و متد اجزا محدود برای طراحی موتور و ارزیابی روش پیشنهادی کرده است. هم چنین در [۱۵]، محققان از متد تحلیلی برای طراحی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک و ارزیابی نتایج با استفاده از متد اجزا محدود استفاده کرده اند. از متد طراحی تجربی برای طراحی بهینه موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در [۱۶] استفاده شده است که هدف از آن افزایش نیروی محرکه می باشد.

در [۱۷]، محققان یک روش مقایسه ای بین شش الگوریتم تصادفی در طراحی بهینه روتور و استاتور موتور جریان مستقیم بدون جاروبک پیشنهاد داده اند. در اکثر روش های ذکر شده، تاثیر سرعت مورد نیاز در طی پروسه بهینه سازی، لحاظ نشده است.

در این مطالعه یک روش جدید جهت طراحی بهینه موتور BLDC با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) پیشنهاد شده است. در بخش بعد، الگوریتم بهینه ساز بطور مختصر توضیح داده شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی معرفی شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه سازی ها ارائه شده و بالاخره در بخش پنجم، نتیجه گیری کلی مقاله آمده است.

## ۲- الگوریتم رقابت استعماری

همانند دیگر الگوریتم های تکاملی، این الگوریتم، نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک "کشور" نامیده می شوند؛ شروع می شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان امپریالیست انتخاب می شوند. باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص، به سمت خود می کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل

<sup>1</sup> Brushless permanent magnet DC

در تابع هدف پیشنهادی، پارامترهای هندسی لیست شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ پارامترهای هندسی موتور BLDC

<b>number of pole pairs</b>	<b>(p)</b>
cross sectional area of the winding	<b>(A<sub>c</sub>)</b>
pole-arc per pole-pitch ratio	<b>(β)</b>
magnet thickness	<b>(l<sub>m</sub>)</b>
stator/rotor core thickness	<b>(l<sub>y</sub>)</b>
winding thickness	<b>(l<sub>w</sub>)</b>
mechanical air gap	<b>(l<sub>g</sub>)</b>
rotor radius	<b>(r<sub>r</sub>)</b>
current density	<b>(J<sub>cu</sub>)</b>
wire gauge and stator/rotor axial length	<b>(l<sub>s</sub>)</b>

اگر کنداكتور و میدان مغناطیسی بر یکدیگر عمود باشند، گشتاور کل بصورت زیر خواهد بود:

$$T = NI l B r \quad (۱)$$

$$I = \pi l_w (2r_r + 2l_g + l_w) J_{cu} k_f k_c \quad (۲)$$

$$A_w = \pi l_w (2r_r + 2l_g + l_w) \quad (۳)$$

اطلاعات بیشتر در مورد پارامترها و ثابت های موتور را می توان در مرجع [۱۹] یافت. با صرف نظر از عکس العمل آرمیچر و رلوکتانس هسته استاتور/رتور، چگالی شار مغناطیسی بصورت زیر خواهد بود:

$$B_g = \frac{F_m}{A_g \mathfrak{R}} = \frac{B_r l_m}{(r_r + l_g) \ln \left( \frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m} \right)} \quad (۴)$$

$$A_g = l_s \frac{\beta \pi}{p} (r_r + l_g) \quad (۵)$$

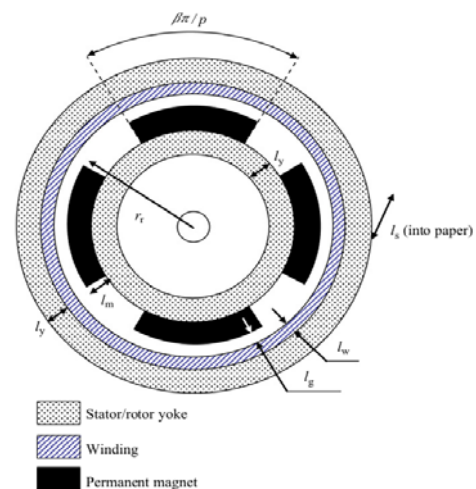
هم چنین نشی میدان مغناطیسی ( $k_1$ ) و contributed span of active winding wires and magnets ( $k_\beta$ ) بصورت زیر خواهد بود:

دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه در صدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل می شود [۱۸].

با شکل گیری امپراطوری های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن ها شروع می شود. هر امپراطوری ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. در جریان رقابت های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری های ضعیف تر، حذف خواهند شد. با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به امپراطوری ها نزدیک تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا داشته باشیم، با مستمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور امپریالیست، خیلی نزدیک هستند.

### ۳- روش پیشنهادی

در این مطالعه یک روش جدید برای بهینه سازی موتور BLDC<sup>۱</sup> با استفاده از الگوریتم ICA<sup>۲</sup> پیشنهاد شده است. تابع هدف طوری تعریف شده است که حجم، تلفات و هزینه ساخت موتور را هم زمان پوشش دهد. در شکل (۱) ساختار موتور BLDC همرا با پارامترهای هندسی آن نشان داده شده است.



شکل ۱ ساختار موتور BLDC [۱۹]

<sup>1</sup> Brushless Direct Current

<sup>2</sup> Imperialist Competitive Algorithm

هم چنین توان ورودی و اندوکتانس سیم پیچ بصورت زیر خواهد بود:

$$P = VI \quad (۱۳)$$

$$L = \frac{\pi \mu_0 k_f^2 A_w^2 l_s}{54 A_c^2 p^2 \ln \left( \frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m} \right)} \quad (۱۴)$$

که در آن  $H/m \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  نفوذپذیری فضای آزاد می باشد. ثابت زمانی هم بصورت زیر است:

$$\tau = L / R \quad (۱۵)$$

برای بدست آوردن حداکثر گشتاور الکترومغناطیسی موتور BLDC، رابطه زیر باید بین سرعت و ثابت زمانی باید برقرار باشد:

$$\omega_r \leq \frac{\pi}{4p\tau} \quad (۱۶)$$

اگر این رابطه برقرار نشود، حداکثر گشتاور الکترومغناطیسی موتور BLDC کاهش می یابد. تلفات موتور BLDC می تواند به سه گروه تقسیم شود: تلفات مغناطیسی، تلفات الکتریکی و تلفات مکانیکی. تلفات الکتریکی در مقاومت سیم پیچی به عنوان مهم ترین بخش تلفات موتور است که بصورت زیر خواهد بود:

$$P_{Cu} = \rho k_f k_c k_{et} A_w l_s J_{cu}^2 \quad (۱۷)$$

تلفات هیستریزس و فوکو مهم ترین تلفات مغناطیسی موتور BLDC می باشد. با فرض اینکه شار مغناطیسی شکاف هوایی برابر شار مغناطیسی هسته باشد، حداکثر چگالی مغناطیسی استاتور را می توانیم بصورت زیر بنویسیم:

$$B_{sy} = \frac{\pi k_1 \beta B_r l_m}{2 p l_y \ln \left( \frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m} \right)} \quad (۱۸)$$

بنابراین معادلات زیر برای تلفات هیستریزس و فوکو بدست

$$k_1 = 1 - \frac{1}{0.9[r_r / (\beta p(l_g + l_w))]^2 + 1} \quad (۶)$$

$$k_\beta = \frac{\min(\beta, k_c)[k_s + (1 - k_s) \tanh(\delta | \beta - k_c |)]}{k_c} \quad (۷)$$

که  $k_s < 1$  و  $\delta$  با تجربه و آزمایش بدست می آید. گشتاور الکترومغناطیسی می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$T_{em} = \frac{\pi k_f k_c k_1 k_\beta B_r l_m l_s l_w (2r_r + 2l_g + l_w) J_{cu}}{\ln \left( \frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m} \right)} \quad (۸)$$

رابطه ولتاژ ترمینال و جریان موتور BLDC می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$V = RI + E \quad (۹)$$

$$I = A_c J_{cu} \quad (۱۰)$$

که R مقدار مقاومت و E ولتاژ القایی در موتور BLDC است. ولتاژ القایی (E) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$E = \frac{(r_r + l_g) k_\beta k_1 B_g \omega_r l_s k_f k_c A_w}{A_c} \quad (۱۱)$$

V=

$$\frac{l_s k_f k_c A_w}{A_c} \times \left[ \frac{k_\beta k_1 B_r l_m \omega_r}{\ln \left( \frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m} \right)} + \left[ 1 + \pi (r_r + l_g + l_w) / (p l_s) \right] \rho J_{cu} \right]$$

$$(۱۲)$$

می آید:

$$T_{em} = \frac{\pi k_f k_c k_1 k_\beta B_r l_m l_s l_w (2r_r + 2l_g + l_w) J_{cu}}{\ln \left( \frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m} \right)} \quad (26)$$

$$P_h = k'_h \rho_y V_{sy} B_{sy}^n f \quad (19)$$

$$P_e = k'_e \rho_y V_{sy} B_{sy}^2 f^2 \quad (20)$$

$$f = p \omega_r / 2\pi \quad (21)$$

$$T_{out} = T_{em} - (P_w + P_b) / \omega_r \quad (27)$$

که در آن  $\rho_y$  چگالی ماده تشکیل دهنده موتور،  $f$  فرکانس و  $V_{sy}$  حجم استاتور است. تلفات مکانیکی به دو گروه تلفات باد خوری و یاتاقان تقسیم می شود. تلفات یاتاقان را می توان بصورت زیر نوشت:

که  $T_{out}$  گشتاور خروجی موتور BLDC است. هم چنین

جمع کل تلفات موتور BLDC را می توان بصورت زیر نوشت:

$$P_{total} = P_{cu} + P_h + P_e + P_b + P_w \quad (28)$$

$$P_b = \frac{N_b}{2} \mu_f F_b d_i \omega_r \quad (22)$$

هم چنین توزیع میدان مغناطیسی در سطح سیم پیچی

موتور BLDC با آهنربای دائم بصورت زیر خواهد بود. [۱۹]

$$B_g(\theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2B_r \beta}{\mu_{r1}} \times \frac{\sin \frac{n\pi\beta}{2}}{\frac{n\pi\beta}{2}} \times \frac{n\pi}{(n\pi)^2 - 1} \left[ \left( \frac{r_g}{r_s} \right)^{n\pi-1} \left( \frac{r_r}{r_s} \right)^{n\pi+1} + \left( \frac{r_r}{r_g} \right)^{n\pi+1} \right]$$

که در آن  $F_b$  شعاع بار یاتاقان،  $d_i$  شعاع داخلی یاتاقان،  $\mu_f$  ضریب اصطکاک یاتاقان و  $N_b$  تعداد یاتاقان ها است. تلفات بادخوری هم بصورت زیر خواهد بود:

$$P_w = \pi k_r C_f \rho_{air} \omega_r^3 r_r^4 l_s \quad (23)$$

که در آن  $k_r$  ضریب زبری رتور،  $\rho_{air}$  چگالی هوا و  $C_f$  ضریب اصطکاک است که با رابطه زیر بدست می آید:

$$\times \left\{ \frac{(n\pi-1)+2 \left( \frac{r_y}{r_r} \right)^{n\pi+1} - (n\pi+1) \left( \frac{r_y}{r_r} \right)^{2n\pi}}{\left[ \frac{\mu_{r1+1}}{\mu_{r1}} \left[ 1 - \left( \frac{r_y}{r_s} \right)^{2n\pi} \right] - \frac{\mu_{r1}-1}{\mu_{r1}} \left[ \left( \frac{r_r}{r_s} \right)^{2n\pi} - \left( \frac{r_y}{r_r} \right)^{2n\pi} \right]} \right\} \cos n\pi\theta$$

$n\pi \neq 1$

(29)

که در آن  $\mu_{r1}$  نفوذپذیری نسبی مغناطیس است. هم چنین:

$$C_f = \begin{cases} \frac{0.5150 \left( \frac{l_g}{r_r} \right)^{0.3}}{Re^{0.5}} & \text{for } 500 < Re < 10^4 \\ \frac{0.0325 \left( \frac{l_g}{r_r} \right)^{0.3}}{Re^{0.2}} & \text{for } 10^4 < Re \end{cases} \quad (24)$$

$$r_s = r_r + l_g + l_w \quad (30)$$

$$r_y = r_r - l_m \quad (31)$$

$$r_g = r_r + l_g \quad (32)$$

$$Re = \rho_{air} \omega_r r_r l_g / \mu_{air} \quad (25)$$

مهم ترین بخش در هر مسئله بهینه سازی، تعریف مناسب تابع هدف است که قیود مسئله را به خوبی پوشش دهد.

که در آن  $Re$  عدد Couette-Reynolds و  $\mu_{air}$  چسبندگی دینامیکی هوا است. اکنون با توجه به تلفات مغناطیسی و مکانیکی، فرمول اصلاح شده گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور خروجی بصورت زیر خواهد بود:

7	50	10	15	0.5	0.8	2.64	$\pm 0.13$
8	50	8	15	0.05	0.4	2.59	$\pm 0.03$
9	50	10	10	0.1	0.8	2.70	$\pm 0.1$
10	50	8	10	0.05	0.6	2.80	$\pm 0.08$

پارامترهایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته اند بصورت بردار زیر است:

$$x = [p \ \beta \ l_m \ l_y \ l_w \ l_g \ r_r \ \lambda \ A_c \ J_{cu}]^T \quad (33)$$

همان طور که از جدول (۲) پیداست، مجموعه ۸ توانسته بهترین جواب را نتیجه دهد. به همین خاطر از این مجموعه برای طراحی موتور استفاده شده است.

جدول ۳ مقادیر حداکثر، حداقل و بهینه پارامترهای موتور

No	Parameters	Min	Max	ICA-BLDC
1	$P$	1	6	5
2	$\beta$	0.5	1	0.6912
3	$l_m$	0.001	0.015	0.0120
4	$l_y$	0.002	0.01	0.0081
5	$l_w$	0.001	0.0055	0.0033
6	$l_g$	0.001	0.004	0.0010
7	$r_r$	0.005	0.1	0.0592
8	$l_s$	0.006	0.6933	0.0730
9	$A_c$	0.1	2	1.9951
10	$J_{cu}$	$3 \times 10^6$	$6 \times 10^6$	5.8198 e+ 06

فرم تابع هدف بستگی به کاربرد و خواست ما از مسئله دارد. در این مطالعه هدف ما کاهش کاهش حجم، کاهش تلفات و کاهش هزینه ساخت موتور BLDC است. به همین خاطر تابع هدف بصورت معادله (۳۴) خواهد بود. در این معادله نشان

دهنده تابع تلفات موتور می باشند. هم چنین ضرایب  $W_p$ ،  $W_c$  و  $W_v$  به ترتیب نشان دهنده وزن مرتبط تابع تلفات، تابع حجم و تابع هزینه موتور می باشند. این ضرایب به علت تاثیر اهمیت هر کدام از توابع آورده شده است. در روش پیشنهادی، الگوریتم رقابت استعماری طوری پارامترهای ذکر شده در معادله (۳۳) را باید پیدا کند که تابع هدف (معادله (۳۴)) حداقل شود.

$$f_0(x) = w_v V_t(x) + w_p P_{total}(x) + w_c C(x) \quad (34)$$

#### ۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی روش پیشنهادی ارائه شده است. در الگوریتم رقابت استعماری، مقادیر پارامترهای کنترلی تاثیر بالایی بر عملکرد آن دارند. به این منظور ۱۰ مجموعه از این ضرایب در نظر گرفته شده اند و هر مجموعه ۵۰ بار بطور مستقل اجرا و پیاده سازی شده است. یک الگوریتم بهینه ساز خوب باید بتواند در هر بار اجرا به نزدیکی نقطه بهینه برسد و همسایگی آن را پیدا کند. به همین منظور تمامی مقادیری که در جداول به عنوان نتیجه شبیه سازی آمده است، مقدار میانگین ۵۰ بار اجرای مستقل الگوریتم است. مقدار میانگین و انحراف معیار تابع هزینه هر مجموعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ بررسی تاثیر تغییرات پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری بر عملکرد آن

ردیف	$N_{po}$	$N_{imp}$	$\beta$	$\xi$	$\gamma$	تابع هدف	انحراف معیار
1	50	12	25	0.5	0.6	2.8	$\pm 0.13$
2	50	10	25	0.1	0.4	2.83	$\pm 0.15$
3	50	8	25	0.05	0.2	2.78	$\pm 0.16$
4	50	12	20	0.1	0.4	2.72	$\pm 0.14$
5	50	10	20	0.5	0.8	2.71	$\pm 0.11$
6	50	8	20	0.05	0.6	2.68	$\pm 0.15$

جدول ۴ مشخصات موتور BLDC پس از بهینه سازی

1	$V_t$	0.0011
2	$P_{total}$	51.2446
3	$P_{cu}$	42.1851
4	$P_h$	4.4115
5	$P_e$	2.4500
6	$P_b$	2.1195
7	$P_w$	0.0783
8	$W_v V_t$	0.7891
9	$W_c C$	0.8205
10	$W_p P_l$	1.0248
11	$W_v V_t + W_c C + W_p P_l$	2.6345
12	$f_o$	2.59
13	Efficiency	0.9661

مشاهده می شود الگوریتم رقابت استعماری دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم ها است.

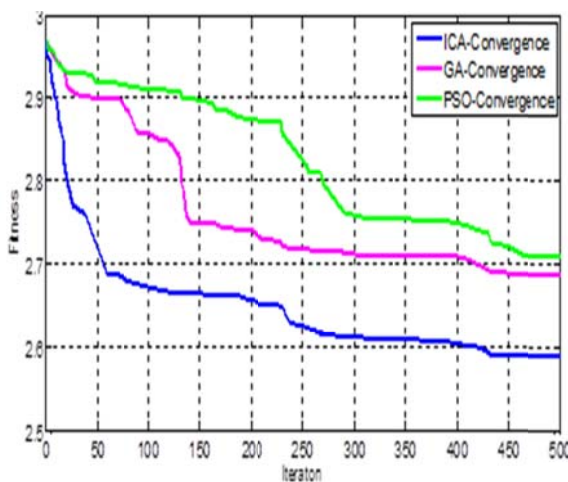
14	Standard	$\pm 0.04$
15	V (Volt)	1.3034e+02
16	I (Ampere)	11.6115
17	$P_{in}$	1513
18	$P_{out}$	1462

در جدول (۳) حدود حداکثر و حداقل پارامترهای موتور و مقادیر بهینه آنها پس از بهینه سازی آورده شده است. هم چنین در جدول (۴) سایر مشخصات موتور BLDC پس از بهینه سازی ذکر شده است.

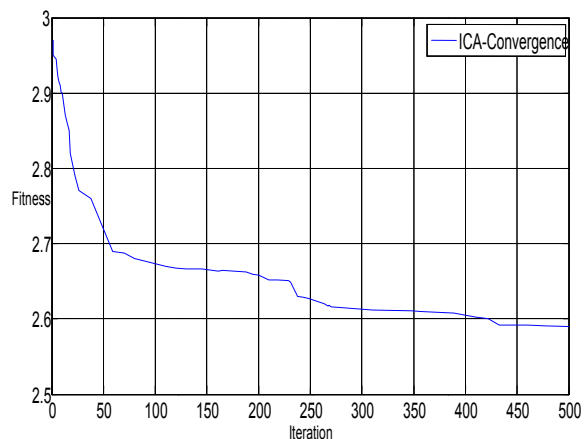
در شکل (۲) میانگین نمودار همگرایی الگوریتم رقابت استعماری در ۵ بار اجرای مختلف آمده است. همان طور که از این شکل پیداست، روش پیشنهادی موتور BLDC بهینه شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری یا ICA- BLDC توانسته است همسایگی نقطه بهینه را پیدا کند و به جواب مسئله دست پیدا کند. هم چنین از این شکل پیداست که الگوریتم رقابت استعماری توانسته است در کمتر از ۲۵۰ تکرار به جواب بهینه برسد و جواب مسئله را پیدا کند. بنابراین روش پیشنهادی دارای سرعت همگرایی خوبی است.

جدول ۵ مقایسه سه الگوریتم رقابت استعماری، ژنتیک و پرنده

انحراف معیار	برازندگی	پرنده
$\pm 0.03$	2.59	رقابت استعماری
$\pm 0.07$	2.69	ژنتیک
$\pm 0.06$	2.71	پرنده



شکل ۲ مقایسه سه الگوریتم رقابت استعماری، ژنتیک و پرنده



شکل ۲ میانگین نمودار همگرایی الگوریتم رقابت استعماری

در ۵۰ بار اجرای مختلف

به منظور ارزیابی بیشتر عملکرد روش پیشنهادی، عملکرد الگوریتم رقابت استعماری، با سایر الگوریتم های مشابه مانند الگوریتم ژنتیک و پرنده از نظر دقت، سرعت و انحراف معیار مقایسه شده اند. در جدول (۵) این سه روش از نظر دقت و انحراف معیار مقایسه و در شکل (۳) از نظر سرعت و دقت همگرایی مقایسه شده اند. این اعداد و نمودارها میانگین ۵۰ بار اجرای مستقل هر یک از این الگوریتم ها هستند. همان طور که

### ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه طراحی بهینه یک موتور BLDC با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی مبتنی بر هوش دسته جمعی بررسی شد. در روش پیشنهادی حجم، تلفات و هزینه ساخت موتور BLDC به عنوان تابع هدف انتخاب شدند تا همزمان مینیمم شوند. در واقع ما با یک مسئله بهینه سازی چند هدفه روبرو هستیم. در روش های مرسوم اغلب از روش های مبتنی بر گرادیان استفاده می شد که این روش ها مشکلات خاص خود مانند گیر کردن در دام مینیمم های محلی را دارند. در این مطالعه برای حل مسئله بهینه سازی از الگوریتم های بهینه

- [12] P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, Genetic algorithm based design optimization of a permanent magnet brushless DC motor, *Journal of Applied Physics* 97 (10) (2005) Article No. Q516
- [13] M. Markovic, Y. Perriard, Simplified design methodology for a slotless brushless DC motor, *IEEE Transactions on Magnetics* 42 (12) (2006) 3842-3846.
- [14] Y.P. Yang, T.C. Chiao, Multiobjective optimal design of a high speed brushless DC motor, in: *Proceedings of the Electric Machines and Power Systems conference* 28 (2000) pp. 13-30.
- [15] S.M. Jang, H.W. Cho, S.K. Choi, Design and analysis of a high-speed brushless DC motor for centrifugal compressor, *IEEE Transactions on Magnetics* 43 (6) (2007) 2573-2575.
- [16] S. Vivier, F. Gillon, P. Brochet, Optimization techniques derived from experimental design method and their application to the design of a brushless direct current motor, *IEEE Transactions on Magnetics* 37 (5) (2001) 3622-3626.
- [17] T. Tusar, P. Korosec, G. Papa, B. Filipic, J. Silc, A comparative study of stochastic optimization methods in electric motor design, *Applied Intelligence* 27 (2) (2007) 101-111.
- [18] Zaniar Ardalan, Sajad Karimi, Omid Poursabzi, B. Naderi. A novel imperialist competitive algorithm for generalized traveling salesman problems. *Applied Soft Computing*, Volume 26, January 2015, Pages 546-555 (In Persian)
- [19] A. Rahideh, T.Korakianitis, P.Ruiz, T.Keeble, M.T.Rothman. Optimal brushless DC motor design using genetic algorithms. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (2010) 3680-3687
- سازی مبتنی بر هوش دسته جمعی استفاده شده است. این الگوریتم برای قدرت جستجوی بالایی هستند. نتایج شبیه سازی نشان داد که الگوریتم رقابت استعماری توانسته است در بین سه الگوریتم رقابت استعماری، ژنتیک و پرنده پارامترهای هندسی موتور BLDC را بخوبی پیدا کند و بهترین عملکرد را داشته باشد.
- ۶- مراجع
- [1] K.Premkumar a,n, B.V.Manikandan. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor. *Neurocomputing*138(2014)260-270
- [2] Mohamed S. Zaky. A self-tuning PI controller for the speed control of electrical motordrives. *Electric Power Systems Research* 119 (2015) 293-303(In Persian)
- [3] Ramin Salehi Arashloo, Mehdi Salehifar, Luis Romeral, Vicent Sala . A robust predictive current controller for healthy and open-circuit faulty conditions of five-phase BLDC drives applicable for wind generators and electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, Volume 92, 1 March 2015, Pages 437-447(In Persian)
- [4] Jose Luis Romeral Martinez, Ramin Salehi Arashloo, Mehdi Salehifar, Juan Manuel Moreno. [Predictive current control of outer-rotor five-phase BLDC generators applicable for off-shore wind power plants](#). *Electric Power Systems Research*, Volume 121, April 2015, Pages 260-269
- [5] Jian Sun, Yi Chai, Chunxiao Su, Zhiqin Zhu, Xianke Luo. BLDC motor speed control system fault diagnosis based on LRGF neural network and adaptive lifting scheme. *Applied Soft Computing*, Volume 14, Part C, January 2014, Pages 609-622
- [6] H.E.A. Ibrahim. Optimal PID control of a brushless DC motor using PSO and BF techniques. *Ain Shams Engineering Journal* (2014) 5, 391-398.
- [7] Agus Purwadi, Jimmy Dozeno, Nana Heryana. [Testing Performance of 10 kW BLDC Motor and LiFePO4 Battery on ITB-1 Electric Car Prototype](#). *Procedia Technology*, Volume 11, 2013, Pages 1074-1082
- [8] F. Messine, B. Nogarede, J.L. Lagouanelle, Optimal design of electromechanical actuators: a new method based on global optimization, *IEEE Transactions on Magnetics* 34 (1) (1998) 299-308
- [9] M. Markovic, P. Ragot, Y. Perriard, Design optimization of a BLDC motor: a comparative analysis, in: *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Turkey, 2007, pp. 1520-1523
- [10] N. Bianchi, S. Bolognani, Brushless DC motor design: an optimisation procedure based on genetic algorithms, in: *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Drives*, UK, 1997, pp. 16-20.
- [11] C.C. Hwang, J.J. Chang, Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 209 (2000) 234-236.