

## طراحی و بهینه‌سازی موتور سنکرون مغناطیس دائم جهت استفاده در زیردریایی بدون سرنشین

محمد جواد سلیمانی کشایه<sup>۱</sup>، علی گودرزی املشی<sup>۲</sup>، رضا مرادپور<sup>۳</sup> محمد علیزاده<sup>۴</sup>

mjpower87@gmail.com

- ۱- مربی، کارشناسی ارشد برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر  
 ۲- مربی، کارشناسی ارشد برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر  
 ۳- مربی، کارشناسی ارشد برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر  
 ۴- مربی، کارشناسی ارشد برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر

### چکیده

با توجه به راهبردی بودن نیروی دریایی در کشور و نیاز امروز به همگام بودن با پیشرفت های فن آوری در سیستم های زیردریایی، موتورهای الکتریکی سنکرون مغناطیس دائم جهت استفاده در سیستم‌های رانش زیردریایی های بدون سرنشین، در سال‌های اخیر کاربرد زیادی پیدا کرده‌اند و اکثر شرکت‌های الکتریکی معتبر به انجام تحقیقاتی در این زمینه پرداخته اند، به عنوان مثال جایگزین نمودن محرک‌های الکترومکانیکی بجای محرک‌های هیدرولیک و پنوماتیک با هدف کاهش وزن، چگالی توان بالا، هزینه تعمیر و نگهداری و راندمان بالا در زیردریایی بدون سرنشین مورد توجه بوده است. در این مقاله به تحلیل و طراحی بهینه یک نوع موتور سنکرون سه فاز مغناطیس دائم جهت کاربرد در سیستم رانش زیردریایی بدون سرنشین پرداخته می‌شود. برای این منظور، در ابتدا روابط و معادلات حاکم بر موتور سنکرون سه فاز مغناطیس دائم توضیح داده می‌شود و در ادامه موتور موردنظر توسط یک نوع الگوریتم بهینه سازی بهینه می‌گردد تا کمترین حجم و همچنین بیشترین بازده و چگالی توان را داشته باشد.

واژگان کلیدی: الگوریتم زنبور، بازده، چگالی توان و موتور سنکرون مغناطیس دائم

تاریخ دریافت مقاله : ۹۵/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۵/۰۸/۲۱

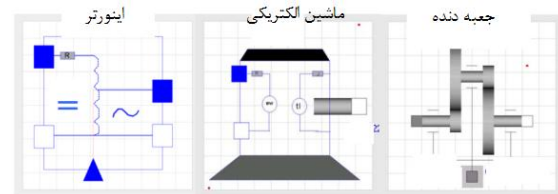
## ۱- مقدمه

ماشین‌های الکتریکی بعنوان سیستم محرکه اصلی صنایع از تجهیزات مورد استفاده در لوازم خانگی گرفته تا صنایع پیشرفته نظیر سیستم‌های رانش دریایی، خودروهایی الکتریکی، سامانه‌های فضایی، همواره در حال تغییر و تحول هستند. امروزه موتور سنکرون مغناطیس دائم بخاطر داشتن مزایایی از قبیل: ساختار ساده، هزینه تولید پایین، فشردگی و چگالی شار بالا، تلفات و نویز کم در بسیاری از کاربردهای صنعتی، نیرو محرکه زیردریایی، رباتیک و هواپیماهای بدون سرنشین استفاده می‌شوند. اولین و مهم‌ترین جنبه در طراحی ماشین‌های الکتریکی جهت کاربرد در سیستم‌های رانش زیردریایی کاهش حجم و وزن و از سوی دیگر افزایش توان و بازدهی این تجهیزات می‌باشد. به عبارتی با بهینه کردن ابعاد ماشین (از جمله قطر استاتور، طول آهنربا، قطر روتور، طول شکاف هوایی و ...) و در نظر گرفتن محدودیت‌های سیم پیچی، نسبت به افزایش راندمان و کاهش وزن اقدام می‌شود [۱،۲].

امروزه محرک‌های هیدرولیک متداول در مقایسه با محرک الکتریکی زیردریایی بسیار سنگین‌تر، نیاز به تعمیر و نگهداری زیاد و همچنین در معرض درجه حرارت و فشار بالا به دلیل مایعات، قابل اشتعال می‌باشند. هدف این مقاله بهینه‌سازی موتور الکتریکی از نظر چگالی توان و راندمان برای نشان دادن برتری‌های محرک الکترومکانیکی نسبت به سیستم‌های متداول هیدرولیک می‌باشد.

## ۲- محرک الکترومکانیکی

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود محرک الکترومکانیکی را می‌توان به سه بخش اصلی، اینورتر، ماشین الکتریکی و جعبه دنده ماشین الکتریکی و جعبه دنده تقسیم نمود.



شکل (۱) اجزاء مختلف تشکیل دهنده محرک الکتریکی زیردریایی بدون سرنشین

## ۲-۱ انتخاب موتور مناسب جهت کاربرد در محرکه

## زیردریایی بدون سرنشین

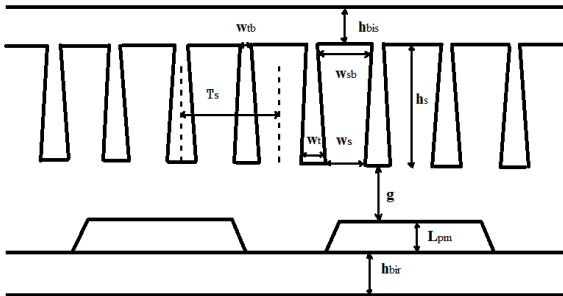
سامانه‌های زیردریایی که با عنوان خودروهایی زیرآبی اطلاق می‌گردند، به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: باسرنشین و بدون سرنشین که مورد دوم خودروهایی رباتیک زیر آبی نیز نامیده می‌شود. در عمل محرکه‌های زیردریایی بدون سرنشین گزینه مناسبی برای کار در شرایط خطرناک و نامناسب نظیر اقیانوس، مخزن نیروگاه های آبی و نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشند. شکل (۲) نمونه‌ای از به کارگیری این نوع موتورها را در زیردریایی بدون سرنشین نشان داده است [۱،۲].



شکل (۲) محرک الکتریکی زیردریایی بدون سرنشین

بسته به عمق و زمان عملیات، جرم مفید موتور باید به اندازه ۰/۱۵ تا ۰/۳ جرم زیردریایی باشد [۲]. فضای اصلی این زیردریایی‌ها توسط باتری‌های آنها اشغال می‌شود. زمان عملکرد کاملاً وابسته به ظرفیت باتری می‌باشد. در این موارد، بازده موتور بسیار حائز اهمیت است. دو شرایط کاری برای این تجهیزات وجود دارد: عملکرد پیوسته که با ظرفیت باتری محدود و مشخص می‌گردد (در حد چند ساعت) و عملکرد کوتاه مدت (در حد ۲ تا ۳ دقیقه). توان خروجی موتورهای الکتریکی جهت رانش زیردریایی‌های باسرنشین تا حد ۷۵ کیلو وات (به طور متوسط ۲۰ کیلو وات) و برای زیردریایی‌های بدون سرنشین از ۲۰۰ وات تا

در شکل (۴) ساختار موتور سنکرون آهنربای دائم سطحی شیاردار که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است.



شکل (۴) ساختار موتور سنکرون آهنربای دائم سطحی

### ۳- طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم

#### ۳-۱- تعریف مشخصات موتور

همانطور که مشخصات مورد نیاز یک نمونه موتور جهت عملکرد در زیردریایی بدون سرنشین در جدول (۱) دیده می‌شود، در این مقاله موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی با توان ۱ کیلووات و چگالی توان ۲/۲ کیلو وات بر کیلو گرم، طراحی شده است. این ماشین الکتریکی ۳ فاز و ۴ قطب و ۱۸ شیار است. ضریب قدرت برای یک ماشین الکتریکی (با آهنربا سطحی نصب شده) می‌تواند بین ۰/۹ تا ۱ باشد.

جدول (۱): مشخصات مورد نیاز موتور

متغیر	مقدار	واحد
توان الکتریکی	۱	کیلو وات
ولتاژ ترمینال	۱۱۵	ولت
سرعت مکانیکی	۲۲۵۰	دور بر دقیقه
بازده	> ۹۰	درصد
وزن	< ۲	کیلو گرم
طول موتور	< ۱۰۰	میلی متر
قطر موتور	< ۴۰	میلی متر

#### ۳-۲ تعیین ابعاد و پارامترهای موتور

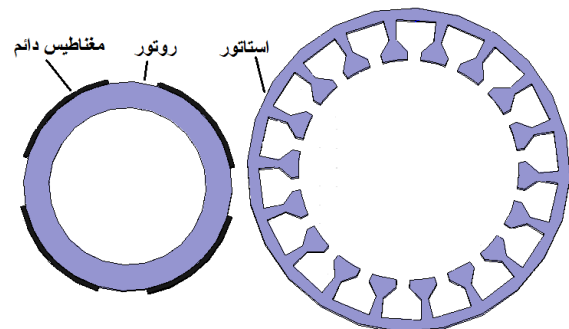
طراحی ماشین با تعیین ابعاد اصلی آن شروع می‌شود. طول محوری موتور،  $L$  و قطر داخلی استاتور (قطر فاصله هوایی)،  $D$  ابعاد اصلی ماشین می‌باشند که سایر ابعاد و پارامترها به شدت به آنها وابسته هستند [۶].

۱/۵ کیلو وات می‌باشد. محدوده ولتاژ این موتورها از ۳۰ تا ۱۲۰ ولت است [۲].

#### ۲-۱- انتخاب موتور الکتریکی مناسب

امروزه به دلیل توجه به راهبردی بودن نیروی دریایی، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم جهت کاربرد در زیردریایی‌های بدون سرنشین، به دلیل مزایایی از قبیل راندمان بالا، قابلیت اطمینان بالاتر، ابعاد فیزیکی کوچکتر (تولید گشتاور بیشتر در ابعادی کوچکتر)، تعمیر و نگهداری کمتر، امکان غوطه ور کردن این نوع موتور در سیالات (کاربرد فضائی و دریایی)، امکان کار در سرعت‌های کم (کمتر از ۱۰۰ rpm) و سرعت‌های خیلی زیاد (بیشتر ۸۰۰۰ rpm) جهت کاربرد در سامانه‌های دریایی مورد توجه بسیاری از محققان بوده است [۳].

موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی یک نوع از موتورهای AC می‌باشد که آهنربا دائم بر روی سطح روتور قرار گرفته است. در این نوع موتورها چگالی توان بالا و راندمان بالا بخاطر استفاده از آهنربا دائم می‌باشد. حذف تلفات سیم‌پیچی روتور این موتورها راندمان را در مقایسه با موتور القایی ۱۰ درصد بهبود می‌بخشد. موتور سنکرون مغناطیس دائم معمولاً بر اساس اندازه کوچک، چگالی توان بالا، گشتاور بالا، وزن کم و سرعت بالا طراحی می‌شود [۴]. این موتور عملکرد رضایت بخشی برای کاربرد در زیردریایی‌ها را از خود نشان داده است و با هدف افزایش کارایی، این موتور با توجه به قطر استاتور و هندسه آهنربای دائم بهینه‌سازی می‌شود. آرایش سیم‌پیچ متمرکز در ترکیب با شکل دندان‌های استاتور چگالی گشتاور بالایی را می‌دهد [۵]. سطح مقطع موتور سنکرون آهنربای دائم سطحی مورد مطالعه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) سطح مقطع موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی

## ۳-۲-۱ محاسبه ابعاد اصلی موتور

ضریب خروجی به شرح زیر محاسبه می گردد [۴]:

$$C_0 = 1.11\pi^2 B_{av} ac K_W \times 10^{-3} \quad (1)$$

توان ظاهری ورودی از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$Q = \frac{P_{out}}{\eta PF} kVA \quad (2)$$

صورت دیگر این معادله که بر اساس ابعاد اصلی می باشد به صورت زیر است:

$$Q = C_0 D^2 L n_s KVA \quad (3)$$

از این معادله می توان مقدار  $D^2L$  را تعیین کرد که کمیتی مهم است.

$$D^2L = \frac{Q}{C_0 n_s} m^3 \quad (4)$$

که در این رابطه  $Q$  بر حسب کیلو ولت آمپر و  $n_s$  بر حسب رادیان بر ثانیه می باشد. با اعمال معادله (۳) در معادله (۴) می توان ابعاد اصلی موتور یعنی  $L$  و  $D$  را تعیین کرد.

## ۳-۲-۲ محاسبه فاصله هوایی و مغناطیس دائم

انتخاب طول فاصله هوایی تحت تاثیر عوامل زیادی است. افزایش این مقدار دارای مزایای زیر می باشد:

کاهش تغییر شکل میدان

کم کردن تلفات ضریبان (ناشی از شیارهای آرمیچر)

عملکرد نرم تر و تهویه بهتر

افزایش آمپردورهای سیم پیچ میدان

در کل فاصله هوایی موتورهای سنکرون باید از شرط زیر پیروی کند.

$$g \geq \frac{1}{2} \alpha_{SM} \mu_0 \tau_p \frac{ac}{B_\delta} = \gamma \tau_p \frac{ac}{B_\delta} \quad (5)$$

ضخامت آهنرباء دائم به صورت زیر محاسبه می شود.

$$L_{PM} = (\mu_r B_g / (B_r - ((K_f / K_d) B_g))) K_c g \quad (6)$$

$$k_f = B_{gpk} / B_g \quad (7)$$

که در آن  $k_{fg}$  ضریب نشتی شار است. همچنین  $k_c$  ضریب کارتر می باشد. با استفاده از معادله (۷) می توان فاصله هوایی فیزیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم را تعیین کرد. که مقدار آن برای موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با ابعاد کوچک بین ۰/۳ تا ۱ میلی متر می باشد.

$$g_{PM} = L_{PM} / \mu_{rPM} + k_c g \quad (8)$$

## ۳-۳ محاسبه تلفات

تلفات در موتور PMSM عبارتند از:

۱- تلفات مسی آرمیچر

۲- تلفات آهنی یا هسته در دندانه ها و بدنه هسته آرمیچر

۳- تلفات مکانیکی ناشی از اصطکاک (یاتاقان ها) و بادخوری

۴- تلفات جریان گردابی یا هرزگرد در هادی های آرمیچر و ..... را برای موتورهای جبران سازی نشده و جبران سازی شده طبق استاندارد IEC می بایست به ترتیب برابر با ۱ درصد و ۰/۵ درصد توان ورودی نامی در نظر گرفته شوند.

## ۳-۳-۱- مقاومت فاز استاتور

$$R_s = \frac{\rho T_s \cdot l_{mts}}{a_s \cdot 10^{-6}} \Omega \quad (9)$$

که  $\rho = 1.8 \times 10^{-8}$  و  $a_s = \frac{I_s}{J_s}$ ،  $J_s$  بر طبق  $I_s$  انتخاب می شود.

## ۳-۳-۲ تلفات مسی کل

بر اساس استانداردهای بین المللی، تلفات مسی باید برای همه نوع سیم بندی ها در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد برای

چگالی توان از تقسیم توان خروجی به حجم موتور محاسبه می‌گردد:

$$P_{den} = \frac{P_{out}}{Vol} \quad (W / m^3) \quad (17)$$

که Vol حجم موتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Vol = \frac{\pi}{4} D_o^2 L \quad (18)$$

#### ۴- طراحی بهینه چند هدفه

بطور کلی، بهینه سازی موتور سنکرون مغناطیس دائم به دلیل پیچیدگی فرمولاسیون محاسبه ابعاد داخلی و خارجی موتور یک مسئله بهینه سازی چند هدفه با متغیرهای مختلف و دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. [۱] مسائل بهینه سازی دارای سه مرحله تعریف می‌شود.

مرحله اول: تعریف متغیرهای بهینه‌سازی

مرحله دوم: فرمول‌بندی تابع هدف و محدودیت‌های موتور  
مرحله سوم: بکارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای یافتن ابعاد بهینه موتور

مهم‌ترین بخش‌های بهینه‌سازی، فرمول‌بندی تابع هدف، که معمولاً ترکیبی از تلفات توان، بازده و حجم و چگالی توان و هزینه می‌باشد. تکنیک بهینه‌سازی می‌تواند از نوع برنامه نویسی غیر خطی مانند برنامه نویسی درجه دو متوالی و یا روش جستجوی تصادفی نظیر الگوریتم زنبور باشد [۸].

#### ۴-۱ تعیین متغیرهای طراحی

در میان متغیرهای طراحی هندسه موتور که در شکل (۴) نشان داده شد برخی محدود در درون محدوده‌های ثابت می‌باشند که در جدول (۲) داده شده است.

جدول (۲): محدوده متغیرهای طراحی

واحد	محدوده تغییرات	پارامتر
[میلی متر]	[۵۰ - ۱۵۰]	طول محوری موتور
[میلی متر]	[۵۰ - ۱۵۰]	قطر داخلی استاتور
[میلی متر]	[۱۰۰ - ۲۰۰]	قطر خارجی استاتور
[تسلا]	[۰,۸ - ۰,۴۵]	بارگذاری مغناطیسی ویژه
[آمپر / متر]	[۸۰۰۰ - ۳۰۰۰۰]	بارگذاری الکتریکی ویژه

کلاس‌های B و E و A و دردمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد برای کلاس‌های H و F برای تمام بارها محاسبه شود [۷].

$$P_{cu} = 3R_s (I_s)^2 \quad (10)$$

#### الف) تلفات اصطکاکی و بادخوری

تلفات بادخوری به سرعت مماسی روتور، به ابعاد روتور و به ساختار ماشین وابسته است. تلفات بادخوری و اصطکاک یاتاقان عموماً از هم تفکیک نمی‌شوند و از آزمایش‌هایی که روی ماشین‌های مشابه صورت می‌گیرد، بدست می‌آید.

$$P_{f,w} = 0.5 - 3\% P_{out} \quad (11)$$

#### ب) تلفات هسته:

$$P_c = 15\% P_{cu} \quad (12)$$

همچنین تلفات هسته می‌تواند به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_c = k_h f B_m^2 + k_e f^2 B_m^2 \quad (13)$$

#### تلفات هرزگرد:

$$P_{stray} = 0.5 - 1\% P_{out} \quad (14)$$

بنابراین می‌توان رابطه تلفات کل را به صورت زیر بیان نمود:

$$P_{tot} = P_{cu} + P_c + P_{f,w} + P_{stray} \quad (15)$$

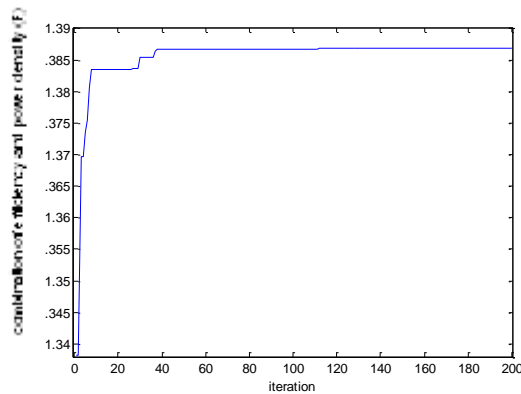
#### ۳-۴ محاسبه راندمان و چگالی توان

راندمان موتور درگشتاور نامی و سرعت نامی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{tot}} \quad (16)$$

## ۴-۴ نتایج بهینه سازی

شکل (۵) ترکیبی از بازده و چگالی توان (F) را برحسب تعداد تکرارها نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است، تابع هدف به مقدار بهینه اش یعنی ۱/۳۸ می‌رسد که این مقدار برای بازده و چگالی توان به ترتیب برابر با ۹۵/۴٪ و ۲/۳۱ وات بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.



شکل (۵): ترکیب چگالی توان و بازده (F) بر حسب تعداد تکرارها

ابعاد بهینه موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با واحد میلی‌متر در جدول (۳) آمده‌اند.

جدول (۳) ابعاد بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم

عنوان	ابعاد موتور بهینه
D (mm)	۶۰/۳۵
L (mm)	۳۰/۱
g(mm)	۰/۵
L <sub>pm</sub> (mm)	۱/۲
τ <sub>p</sub> (mm)	۲۴
Φ (wb)	۰/۰۰۱۶
τ <sub>s</sub> (mm)	۱۰/۵۸
ω <sub>t</sub> (mm)	۳/۵۲
ω <sub>s</sub> (mm)	۷,۰۵
ω <sub>tb</sub> (mm)	۰,۹۱
ω <sub>sb</sub> (mm)	۱۰,۹۸
h <sub>s</sub> (mm)	۴/۲۸
h <sub>bis</sub> , h <sub>bir</sub> (mm)	۹/۷
راندمان (%)	۹۵/۴
چگالی توان	۲/۳۱

	[۱ - ۳]	نسبت طول محوری به گام قطب
--	---------	------------------------------

## ۴-۲ مسائل بهینه سازی

محدودیت‌های طراحی منجر به پیچیده تر شدن مشکلات طراحی برای یک نوع موتور خاص می‌گردد. در این طراحی، بهینه‌سازی مجموع دو تابع راندمان (توان خروجی به توان ورودی) و چگالی توان (توان خروجی به حجم موتور) ماشین برای پارامترهای هندسی موتور انجام شد.

$$f(D, \dots) = \sum (k_1 P d_{tot} + k_2 \eta_{tot}) \quad (19)$$

## ۴-۳ الگوریتم زنبور

الگوریتم‌های گروهی در حل مسایل بهینه‌سازی چند متغیره بسیار کارآمد هستند. الگوریتم زنبور، ارایه شده توسط فام و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [۸]، الگوریتم گروهی نوظهوری است که از رفتار جستجوی غذای زنبور عسل تقلید می‌کند. در این طرح الگوریتم زنبور برای بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای موتور سنکرون مغناطیس دائم به کار گرفته می‌شود. این امر مستلزم بهینه‌سازی توابع چند متغیره است.

گام‌های اصلی الگوریتم به شرح زیر هستند:

- ۱- جمعیتی اولیه به طور تصادفی تشکیل شود.
- ۲- برازش جمعیت محاسبه شود.
- ۳- تعداد مشخصی از بهترین زنبورها معین و مکان آنها برای جستجوی همسایگی انتخاب شود.
- ۴- تعداد مشخصی زنبور به مکان‌های انتخاب شده فرستاده شوند و برازش آنها محاسبه شود.
- ۵- بهترین زنبور هر مکان برای تشکیل جمعیت جدید انتخاب شود.
- ۶- زنبورهای باقی مانده برای جستجوی تصادفی اختصاص داده شوند و برازش آنها محاسبه شود.
- ۷- اگر شرط توقف برقرار شد، پایان. در غیر این صورت، به گام ۳ برگردد.

[3] M. Torabzadeh-Tari "Analysis of Electro-Mechanical Actator Systems in More electric Aircraft", Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005, ISBN 91-7178-099-8

[4] M.J. Soleimani Keshayeh, S. Asghar Gholamian., "Optimum Design of a Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for industrial applications", International Journal of Applied Operational Research, Vol. 2, No. 4, pp. 67-86, Winter 2013.

[۵] محمدجواد سلیمانی کشایه، رضا ایلکا، سید اصغر غلامیان، طراحی بهینه موتور DC مغناطیس دائم بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، بیست و ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، 11-F-ELM-1213، ۱۳۹۰.

[۶] محمدجواد سلیمانی کشایه، سید اصغر غلامیان، ارائه روشی موثر برای طراحی بهینه موتور DC بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل اجزاء محدود، مجله ریاضیات کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، ۱۳۹۱.

[۷] رضا ایلکا، سید اصغر غلامیان و محمد جواد سلیمانی کشایه، ارائه روش نوین طراحی بهینه موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک بر اساس بهینه سازی اجتماع ذرات (PSO) و تحلیل اجزای محدود (FEA)، کنفرانس مهندسی برق مجلسی، ۱۳۹۱.

[8] D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, "The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimization Problems", Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, Cardiff CF24AA, UK.

## ۵- مقایسه طراحی معمولی و طراحی بهینه

با انجام بهینه سازی با استفاده از الگوریتم زنبور در مقایسه با موتور طراحی شده به روش معمولی که به صورت دستی انجام پذیرفت، همان طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، راندمان بیش از ۵ درصد افزایش و چگالی توان بیش از ۸ درصد افزایش یافت.

جدول (۴) مقایسه طراحی معمولی و طراحی بهینه

	طراحی معمولی	طراحی بهینه	درصد افزایش / کاهش
راندمان	۹۰,۳	۹۵,۴	۵,۳٪ افزایش بازدهی
چگالی توان	۲,۱۱	۲,۳۱	۸,۶٪ افزایش چگالی توان

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی روند طراحی و بهینه سازی یک نمونه موتور سنکرون مغناطیس دائم جهت کاربرد در زیردریایی بدون سرنشین پرداخته شده است. در ابتدا به بررسی روابط و معادلات حاکم بر موتور سنکرون سه فاز مغناطیس دائم انجام گردید و از آنجا که جنبه های حرارتی این موتورها برای سامانه های دریایی حائز اهمیت می باشد توابع هدف ترکیبی از راندمان و چگالی توان انتخاب شد. همچنین از الگوریتم زنبور به منظور جستجوی ابعاد بهینه موتور استفاده شده است. موتور بر اساس پارامترهای اولیه از قبیل ولتاژ، توان و سرعت مجاز، و توابع هدف که ترکیبی از حداکثر سازی راندمان و چگالی توان بود طراحی بهینه شد. با انجام بهینه سازی در مقایسه با موتور طراحی شده به روش معمولی، راندمان بیش از ۵ درصد افزایش و چگالی توان بیش از ۸ درصد افزایش یافت.

## ۷- منابع

- [1] Grauers A., "Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines", Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1996.
- [2] Carlson O., Grauers A, Spooner E., "Design and test of a 40 kw directly driven permanent-magnet generator with a frequency converter", European Wind Energy Conference and Exhibition, EWEC'99, Nice, France, 1999.