

## طراحی بهینه موتور مغناطیس دائم برای کاهش گشتاور دندانه‌ای با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی و آنالیز اجزای محدود

سید اصغر غلامیان<sup>۱</sup> و سید صابر رشیدایی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران

gholamian@nit.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران

rashidaei@stu.nit.ac.ir

چکیده: از موانع اصلی توسعه و کاربرد موتورهای آهنربای دائم بدون جاروبک علی‌رغم داشتن نسبت گشتاور به وزن بالا، قابلیت اطمینان و بازده بالا، عوامل مزاحمی مانند گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور است. در این مقاله از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی برای کاهش گشتاور دندانه‌ای بهره‌گیری شده است. برای اعتبار سنجی و مؤثر بودن روش پیشنهادی، مطالعه موردی روی دو نوع متفاوت از موتورهای آهنربای دائم انجام گردید. نمونه اول یک موتور بدون جاروبک با آهنربای دائم سطحی با ۴ قطب و ۶ شیار و نمونه دوم یک موتور بدون جاروبک با آهنربای دائم داخلی با ۸ قطب و ۴۸ شیار است. از بررسی نتایج می‌توان دریافت که مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای برای هر دو نمونه به میزان قابل قبولی کاهش یافته است. **واژه‌های کلیدی:** موتور مغناطیس دائم، گشتاور دندانه‌ای، روش اجزای محدود و روش طراحی آزمایش‌ها.

### ۱- مقدمه

روتور برای هم خط شدن بیشتر است. در صورت بی‌توجهی به میزان دامنه این گشتاور مزاحم در هنگام طراحی، ممکن است راه‌اندازی موتور به دشواری انجام شود و در صورت راه‌اندازی، حرکت موتور با ارتعاش و نویز همراه باشد [۱]. از جمع مؤلفه‌های گشتاور دندانه‌ای، ریپل گشتاور الکترومغناطیس و ریپل گشتاور رلوکتانس، گشتاور ضربانی<sup>۲</sup> به وجود می‌آید. با توجه به تولید این عوامل مزاحم، شکل روتور و استاتور نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به گشتاور خروجی مورد نظر در موتورهای الکتریکی آهنربای دائم بدون جاروبک دارد. از طرف دیگر، تعداد زیاد متغیرهای طراحی مورد نیاز برای طراحی شکل موتور و نیز زمان طولانی مورد نیاز برای محاسبات، اغلب الگوریتم‌های بهینه‌سازی را محدود و یا غیر عملی می‌کند [۲-۴].

گشتاور دندانه‌ای<sup>۱</sup> از تداخل بین شار مغناطیسی تولیدی روتور توسط آهنربا و تغییر زاویه‌ای مقاومت مغناطیسی استاتور در موتورهای آهنربای دائم به وجود می‌آید. در این نوع موتورها به علت وجود قطب‌های مغناطیس دائم روتور و استاتور آهنی، به طور طبیعی بین رتور و استاتور جاذبه وجود دارد که این جاذبه به دلیل وجود شیارهای استاتور، در زوایای مختلف متفاوت است. در قسمت‌هایی که حجم بیشتری از آهن وجود دارد، مقدار این جاذبه بیشتر و تمایل

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۷/۲۴

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۶/۲۶

نام نویسنده مسؤول : سید اصغر غلامیان

نشانی نویسنده مسؤول : ایران - بابل - خیابان دکتر شریعی -

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

روتور [۳۲]، تقسیم‌بندی روتور به چند قسمت و تعیین زاویه و شعاع انحناء بهینه [۳۳]، افزایش طول فاصله هوایی [۲] و [۳] و انتخاب نسبت تعداد شیار به تعداد قطب [۵-۲] اشاره نمود.

## ۲- روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی

روش طراحی آزمایش‌ها یک روش آماری است که توسط آقای فیشر در انگلستان به سال ۱۹۲۰ معرفی شد. هدف اولیه فیشر تعیین ترکیب بهینه‌ای از آب، باران، نور آفتاب، کود و خاک برای تولید بهترین محصول بود. فیشر در ابتدا کلیه ترکیبات ممکن بین فاکتورهای مختلف را با استفاده از یک ماتریس طرح‌ریزی نمود. آزمایش‌های مختلف صورت گرفت و روش‌هایی برای تحلیل نتایج به دست آمده ارایه شد. با افزایش تعداد ترکیبات ممکن بین فاکتورها، فیشر روش‌هایی را برای کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز تبیین کرد. در این آزمایش‌ها کلیه فاکتورها به طور متناسب وارد شدند. بنابراین، فیشر برای اولین بار توانست اثر چند فاکتور مختلف را به طور همزمان بررسی و تحلیل کند [۳۷].

از مزایای این روش می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها، هزینه‌ها و زمان رسیدن به نقطه بهینه، امکان بررسی فاکتورهای گسسته (مانند نوع ماده به کار رفته و ...)، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه، امکان به دست آوردن همزمان شرایط بهینه برای چندین پاسخ و امکان بررسی فاکتورها با سطوح مختلف اشاره کرد.

روش طراحی آزمایش تاگوچی شامل چهار مرحله است که اجرای کلیه مراحل در پروژه‌های صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مراحل به ترتیب برنامه‌ریزی، طراحی آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل نتایج و تأیید نتایج هستند.

کوشش‌های بسیاری در زمینه بهینه‌سازی شکل روتور، آهنرباهای دائم و شکل استاتور با اهداف مختلف، نظیر کاهش گشتاور دندانه‌ای موتور توسط پژوهشگران انجام شده است. امروزه نیز با استفاده از رایانه‌های پر سرعت، فنون بهینه‌سازی شکل به صورت بسیار توانمند و کارآمدتری توسعه یافته‌اند و در اغلب صنایع به طور گسترده استفاده می‌شوند [۱-۵]. بهینه‌سازی‌های انجام شده بیشتر بر روی ساختار استاتور، روتور و آهنربا انجام شده است.

خاطر نشان می‌کند مقالات زیادی در خصوص استفاده از روش تاگوچی در طراحی ماشین‌های الکتریکی تا کنون ارائه شده است. از بین روش‌های پیشنهاد شده به مقاله‌هایی که تمرکز آنها صرفاً بر روی گشتاور دندانه‌ای است، در این قسمت اشاره خواهد شد.

از روش‌های متداول بهینه‌سازی طراحی استاتور می‌توان به انتخاب سر دندانه‌های ضخیم [۲]، مورب کردن ورقه‌های استاتور [۱۸] و [۹-۷] و [۳-۱]، استفاده از شیارهای مجازی روی دندانه‌های استاتور [۱۳-۱۰] و [۶-۴]، زوج کردن دندانه‌ها [۱۴-۱۷]، نسبت بهینه پهنای دهانه شیار به گام شیار [۱۸] و [۲]، تقسیم‌بندی دندانه استاتور به چند قسمت و جابه‌جایی شیار و دهانه شیار استاتور [۴] اشاره کرد.

برخی از پرکاربردترین روش‌های بهینه‌سازی مرتبط با ساختمان آهنرباهای دائم در موتورهای الکتریکی به اختصار مورب کردن قطب‌های مغناطیس دائم، زوج کردن قطب‌های مغناطیس دائم [۴]، نسبت بهینه پهنای آهنربا به گام آهنربا [۲۴-۱۹] و [۴-۱]، تغییر شکل قطب [۲۵]، تغییر در چیدمان آهنرباهای دائم [۲۶]، طرح قطب خارج از مرکز [۲۷]، تقسیم قطب‌های مغناطیسی به چند تکه [۳۵]، تغییر نوع مواد مغناطیسی به کار رفته در قطب‌های مغناطیسی [۲۹] است.

همچنین، از متداولترین روش‌های بهینه‌سازی مرتبط به طراحی روتور می‌توان به ایجاد شیار به عنوان مانع شار (داکت) در روتور [۳۰] و [۳۱]، قرار دادن شکاف روی سطح

مرحله دوم: اختصاص فاکتورها به ستون‌های آرایه انتخاب شده.  
مرحله سوم: مشخص نمودن ترکیب سطوح فاکتورها در هر آزمایش.

### ۳-۲ تجزیه و تحلیل آزمایش

در این مرحله تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده بررسی می‌گردد. که هدف از آن تعیین شرایط بهینه و محاسبه میزان تأثیر فاکتورها روی تابع هدف است. در گام اول باید مقدار کلی میانگین محاسبه شود. نتایج تحلیل شامل تأثیرات متوسط فاکتورهای مختلف، ترکیب بهینه فاکتورها و مقدار پیش‌بینی شده در ترکیب بهینه است.

### ۲-۳-۱- میانگین کلی نتایج ( $Y_{avg}$ )

میانگین کلی نتایج از فرمول (۱) به دست می‌آید:

$$Y_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (1)$$

که  $Y_i$  نتایج آزمایشها ۱ تا ۸ است.

جدول (۱): آرایه‌های متعامد رابیع در رهیافت تاگوچی [۳۴]

دو سطحی	سه سطحی	چهار سطحی	پنج سطحی
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^5)$	$L_{25}(5^6)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{32}(4^9)$	
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(3^{40})$	$L_{64}(4^{21})$	
$L_{16}(2^{15})$			
$L_{32}(2^{31})$			
$L_{64}(2^{63})$			
$L_{128}(2^{127})$			

جدول (۲): آرایه متعامد  $L_8(2^7)$

فاکتورها		A	B	C	D	E	F	G
آزمایش‌ها	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲
	۳	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
	۴	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۱
	۵	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲
	۶	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
	۷	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱
	۸	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲

### ۲-۱ برنامه‌ریزی

برنامه‌ریزی مهمترین بخش یک طرح است که شامل مراحل زیر است:

- تعریف و شرح کامل مسأله
- شرح هدف یا اهداف آزمایش (مشخص کردن پاسخ‌هایی که اندازه‌گیری آنها مد نظر است)
- انتخاب متغیرهای سیستم (فاکتورها)
- انتخاب سطوح فاکتورها

### ۲-۲ طراحی آزمایش‌ها

پس از تهیه اطلاعات اولیه در مرحله برنامه‌ریزی، مرحله طراحی آزمایش‌ها اجرا می‌شود. در این مرحله با توجه به تعداد فاکتورها و مقادیر سطوح هر فاکتور، تعداد آزمایش‌های لازم و چگونگی ترکیب سطوح فاکتورها در هر آزمایش مشخص می‌شود. به این منظور، تعدادی آرایه متعامد توسط تاگوچی ارائه شده‌اند. یک آرایه متعامد، ماتریسی است که سطوح آن، سطوح فاکتورها در هر آزمایش و ستون‌های آن، تعداد فاکتورها را نشان می‌دهند. جدول (۱) تعدادی از این آرایه‌ها را به همراه موارد استفاده آنها نشان می‌دهد. آرایه‌های متعامد را به صورت  $L_n(X^y)$  نشان می‌دهند.

$n$  نشان‌دهنده تعداد سطرها یا تعداد آزمایش‌ها بوده، هر سطر بیانگر چگونگی ترکیب سطوح فاکتورهای مختلف در هر آزمایش است.

در انتهای مشخصه هر آرایه، یک عدد به شکل نمایی وجود دارد که نشان‌دهنده کلیه ترکیبات ممکن بین فاکتورها است.  $X$  نشان‌دهنده تعداد سطوح فاکتور و  $Y$  بیانگر حداکثر تعداد فاکتورهایی است که می‌توان توسط آرایه مورد نظر بررسی کرد. برای مثال، در جدول (۲) آرایه متعامد  $L_8(2^7)$  دارای ۸ آزمایش است و با این آرایه حداکثر می‌توان ۷ فاکتور دو سطحی را بررسی کرد. تعداد کل ترکیبات ممکن بین فاکتورها نیز برابر با  $2^7=128$  است. در نهایت، طراحی آزمایش‌ها به سه مرحله تقسیم‌بندی می‌شود:

مرحله اول: انتخاب آرایه متعامد بر مبنای تعداد فاکتورها و مقادیر آنها که در مرحله برنامه‌ریزی تعیین می‌شوند.

$$SSFA = X \sum_{i=1}^n (\bar{A}_i - Y_{avg})^2 \quad (۳)$$

که  $\bar{A}_i$  اثر متوسط فاکتور A است. مجموع مربعات بقیه فاکتورها نیز به همین طریق به دست می‌آید.

### ۲-۳-۴ محاسبه پاسخ ( $Y_{exp}$ ) در نقطه بهینه

پس از تعیین شرایط بهینه، باید پاسخ در این شرایط محاسبه شود. اگر شرایط بهینه جزو آزمایش‌ها نباشد، باید آزمایشی در شرایط بهینه پیش بینی شده انجام و نتایج آن با  $Y_{exp}$  مقایسه شود.

$$Y_{exp} = Y_{avg} + (\bar{A}_i - Y_{avg}) + (\bar{B}_i - Y_{avg}) + (\bar{C}_i - Y_{avg}) + (\bar{D}_i - Y_{avg}) + (\bar{E}_i - Y_{avg}) + (\bar{F}_i - Y_{avg}) \quad (۴)$$

### ۳- مطالعه موردی برای اعتبار سنجی

در این بخش به ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در بهینه‌سازی شکل طراحی موتور پرداخته می‌شود. ابتدا به بررسی عملکرد روش فوق روی یک موتور مغناطیس دائم با آهنربای دائم سطحی می‌پردازیم. پارامترهای طراحی این موتور مربوط به قطب‌های آهنربای دائم و شیارهای استاتور و طول فاصله هوایی است. نتایج شبیه‌سازی شامل گشتاور دندانه‌ای، میانگین گشتاور خروجی موتور و ریپل گشتاور خروجی موتور ارائه شده است. در قسمت دوم نیز به بررسی یک موتور مغناطیس دائم با آهنربای دائم داخلی می‌پردازیم. بر خلاف نمونه اول، ابعاد آهنربای نمونه دوم ثابت مانده و تغییرات تنها روی محل قرارگیری آهنرباهای دائم و ابعاد شیارهای مانع شار (داکت) صورت می‌گیرد. از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی برای تعیین چگونگی ترکیب پارامترها و ترتیب شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها نیز در نرم افزار Maxwell 2D انجام شده است. به منظور تایید صحت نتایج، شبیه‌سازی پس از تعیین مقادیر بهینه پارامترها و اعمال تغییرات روی طراحی موتور، انجام و نتایج شبیه‌سازی با نتایج محاسبه شده از روش تاگوچی و حالت اولیه موتور مقایسه می‌شود.

### ۲-۳-۲ تأثیرات متوسط فاکتورهای مختلف

برای نمونه، تأثیرات متوسط فاکتورهای A و B و C مربوط به آرایه متعامد  $L_8(2^7)$  با توجه به جدول (۱) به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شوند. که  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_8$  نتایج آزمایش‌های ۱ تا ۸ هستند. پس از به دست آوردن تأثیرات متوسط همه فاکتورها، می‌توان ترکیب بهینه فاکتورها را با در نظر گرفتن مشخصه کیفیت (Quality Characteristic-Q.C.) تعیین کرد. به طور کلی، سه نوع مشخصه کیفیت با توجه به نوع پاسخ با عناوین بزرگتر بهتر است، کوچکتر بهتر است و مقداری اسمی بهترین است، معرفی شده‌اند. برای نمونه، در صورتی که مشخصه کیفیت، بزرگتر بهتر است باشد،  $A_i$  انتخابی بزرگترین مقدار بین  $A_1$  و  $A_2$  است و  $B_i$  انتخابی بزرگترین مقدار بین  $B_1$  و  $B_2$  است.

$$\begin{aligned} \bar{A}_1 &= \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \\ \bar{B}_1 &= \frac{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_6}{4} \\ \bar{C}_1 &= \frac{Y_1 + Y_2 + Y_7 + Y_8}{4} \\ \bar{A}_2 &= \frac{Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{4} \\ \bar{B}_2 &= \frac{Y_3 + Y_4 + Y_7 + Y_8}{4} \\ \bar{C}_2 &= \frac{Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6}{4} \end{aligned} \quad (۲)$$

### ۲-۳-۳ تحلیل واریانس

در صورتی که یک پاسخ مد نظر باشد، به راحتی ترکیب بهینه با توجه به تأثیرات متوسط فاکتورها و نوع مشخصه کیفیت، تعیین می‌شود. اگر هدف بهینه کردن دو یا چند پاسخ به طور همزمان باشد، باید از تحلیل واریانس هم برای انتخاب سطوح بهینه استفاده شود.

هدف از تحلیل واریانس تعیین سهم تغییرات هر فاکتور در پراکندگی کل پاسخ‌ها است. اولین مرحله در تحلیل واریانس، به دست آوردن مجموع مربعات هر کدام از فاکتورهاست. مقادیر به دست آمده نمایانگر انحراف نتایج شبیه‌سازی از مقدار میانگین است. برای محاسبه مجموع مربعات فاکتور A از فرمول (۳) استفاده می‌شود.

## ۳-۱-۲- فاکتورهای طراحی

در جدول (۴)، پارامترهای طراحی که به عنوان فاکتورهای شبیه سازی در طراحی آزمایش استفاده شده اند، نشان داده شده است. محدوده تغییرات هرکدام از فاکتورها نیز در این جدول نشان داده شده است.

جدول (۴): فاکتورهای طراحی و سطوح تغییرات آنها

فاکتورها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
A	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۹
B	۰	۰/۱۵	۰/۳	۰/۴۵
C	۰/۸	۰/۹	۱	۱/۱
D	۱/۷	۱/۸	۱/۹	۲
E	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶

## فاکتورها و مقادیر مربوط به آنها عبارتند از:

- A- نسبت طول کمان قطب مغناطیسی به گام قطب این پارامتر در طراحی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با عبارت *pole embrace* شناخته می‌شود. این پارامتر در پژوهش‌های [۲۸-۳۴] و [۱۱ و ۶ و ۲-۴] نیز بررسی شده است. مقدار این پارامتر در حالت اولیه، ۰/۸۲ است.
- B- اختلاف بین مراکز کمان خارجی و داخلی قطب‌های مغناطیس دائم این پارامتر در طراحی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با عبارت *offset* شناخته می‌شود و در طراحی اولیه مقدارش صفر است. با افزایش مقدار آن، شکل قطب تغییر کرده و ضخامت لبه‌های آن کمتر می‌شود.
- C- ارتفاع دهانه شیار با اندازه اولیه ۱ میلی‌متر
- D- پهنای دهانه شیار با اندازه اولیه ۱/۹ میلی‌متر
- E- طول فاصله هوایی با اندازه اولیه ۰/۵ میلی‌متر

## ۳-۱-۳- چیدمان آزمایش‌ها

در جدول (۵) با توجه به تعداد فاکتورها و سطوح هر کدام از فاکتورها و با استفاده از جداول آرایه‌های متعامد تاگوچی، تعداد آزمایش‌های لازم و چگونگی ترکیب سطوح فاکتورها در هر آزمایش مشخص شده است.

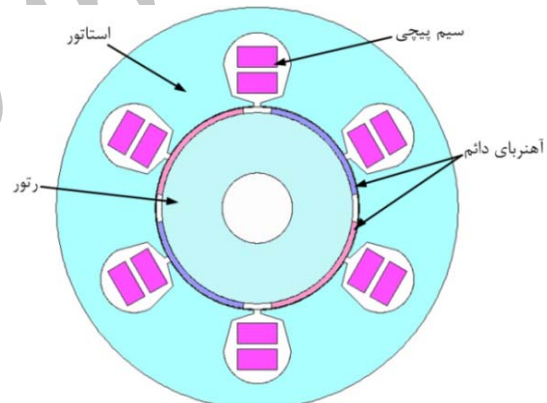
## ۳-۱-۱- موتور مغناطیس دائم با آهنربای دائم

## سطحی

در این نوع موتور گشتاور ضربانی موتور شامل دو مؤلفه گشتاور دندان‌های و ریپل گشتاور الکترومغناطیس است. همچنین، این نوع موتور مغناطیس دائم، امروزه کاربرد وسیعی در کمپرسورهای تهویه هوا به دلیل کاهش مس مصرفی و ساخت آسان دارد [۲۷].

## ۳-۱-۱-۱- مدل موتور

شماتیک موتور SPM مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. در این نوع موتور به دلیل وجود ۶ شیار، نیروی محرکه مغناطیسی تولیدی نامتقارن بوده که موجب تولید هارمونیک‌های زیادی در فاصله هوایی می‌گردد. مشخصات موتور مورد نظر نیز در جدول (۳) آمده است.

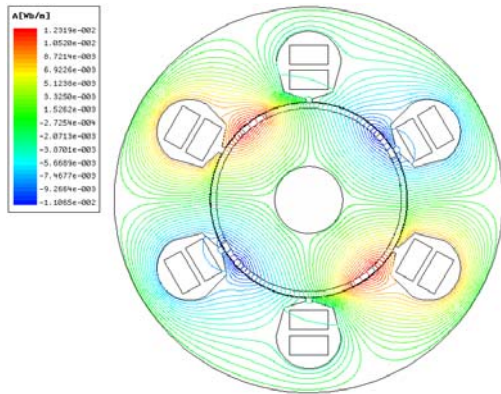


شکل (۱): شماتیک موتور SPM با ۴ قطب و ۶ شیار

جدول (۳): مشخصات موتور SPM [۲۷]

توان نامی	۲۰ KW
قطر خارجی استاتور	۱۲۰ mm
قطر داخلی استاتور	۶۱ mm
طول محوری استاتور	۷۰ mm
تعداد قطب‌ها	۴
تعداد شیارها	۶
ضخامت قطب آهنربا	۱/۷ mm
طول فاصله هوایی	۰/۵ mm
نوع مغناطیس های دائم	NdfeB30

روش تاگوچی (جدول ۶) و پس از تحلیل‌های انجام شده روی نتایج آزمایش‌ها، ترکیب بهینه سطوح فاکتورها و مقادیر گشتاور میانگین و دندانه‌ای در نقطه بهینه محاسبه می‌شود. با توجه به نقطه بهینه به دست آمده، اصلاحات مورد نیاز برای رسیدن به نقطه بهینه، اعمال و نتایج پس از شبیه‌سازی، با مقادیر به دست آمده از روش تاگوچی مقایسه می‌شود.



شکل (۲): توزیع شار مغناطیسی موتور SPM

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی‌ها

آزمایش	$T_c$ (N.m)	$T_{avg}$ (N.m)
۱	۰/۷۹۶۲	۴/۰۷۴۷
۲	۰/۷۳۱۹	۳/۹۸۳۰
۳	۰/۶۷۴۷	۳/۸۸۲۷
۴	۰/۶۲۲۴	۳/۷۷۷۸
۵	۰/۶۵۷۵	۳/۷۳۳۱
۶	۰/۷۲۲۵	۳/۷۹۷۶
۷	۰/۶۵۸۳	۳/۸۷۲۳
۸	۰/۷۲۵۹	۳/۹۴۵۴
۹	۰/۸۳۵۲	۳/۹۴۸۶
۱۰	۰/۸۳۳۶	۴/۰۲۴۲
۱۱	۰/۵۳۵۰	۳/۷۲۹۷
۱۲	۰/۵۲۰۳	۳/۷۹۸۵
۱۳	۰/۶۶۹۸	۴/۰۲۲۰
۱۴	۰/۵۲۲۵	۳/۹۱۳۳
۱۵	۰/۸۰۶۳	۴/۱۴۴۸
۱۶	۰/۶۴۴۳	۴/۰۳۰۴

جدول (۵): جدول آرایه‌های متعامد

آزمایش	A	B	C	D	E
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳	۳
۴	۱	۴	۴	۴	۴
۵	۲	۱	۲	۳	۴
۶	۲	۲	۱	۴	۳
۷	۲	۳	۴	۱	۲
۸	۲	۴	۳	۲	۱
۹	۳	۱	۳	۴	۲
۱۰	۳	۲	۴	۳	۱
۱۱	۳	۳	۱	۲	۴
۱۲	۳	۴	۲	۱	۳
۱۳	۴	۱	۴	۲	۳
۱۴	۴	۲	۳	۱	۴
۱۵	۴	۳	۲	۴	۱
۱۶	۴	۴	۱	۳	۲

همان‌طور که مشاهده می‌کنید، روش تاگوچی باعث کاهش قابل توجه تعداد آزمایش‌های مورد نیاز از تعداد کل  $4^5 = 1024$  به تعداد ۱۶ آزمایش شده است. با توجه به طولانی بودن زمان شبیه‌سازی‌ها در روش اجزای محدود، این کاهش تعداد آزمایش‌ها موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان تا رسیدن به نقطه بهینه است. روش تاگوچی با توجه به نتایج حاصل از این تعداد محدود آزمایش‌ها و با استفاده از محاسبات آماری، بهینه‌ترین نقطه را تعیین می‌کند.

### ۳-۱-۴ تحلیل عملکرد موتور با روش اجزای

محدود

به منظور تحلیل عملکرد موتور میانگین گشتاور خروجی موتور، گشتاور دندانه‌ای موتور و ریپل گشتاور خروجی، از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود Maxwell 2D استفاده می‌شود. در شکل (۲) نیز توزیع شار مغناطیسی در موتور طراحی شده نشان داده شده است.

### ۳-۱-۵ تحلیل نتایج شبیه‌سازی

با استفاده از نتایج آزمایش‌های طراحی شده توسط

$$+T_{avg}(11) + T_{avg}(12))$$

میانگین کلی نتایج محاسبه شده، در جدول (۷) آمده است.

جدول(۸): مقدار میانگین اثر سطوح فاکتورها

i	A <sub>i</sub>	B <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>	D <sub>i</sub>	E <sub>i</sub>
۱	۳/۹۲۹۶	۳/۹۴۴۶	۳/۹۰۸۱	۳/۹۱۴۷	۴/۰۴۷۳
۲	۳/۸۳۷۱	۳/۹۲۹۶	۳/۹۱۴۸	۳/۹۲۰۰	۳/۹۵۸۶
۳	۳/۸۷۵۳	۳/۹۰۷۴	۳/۹۲۲۵	۳/۹۱۷۶	۳/۸۷۵۲
۴	۴/۰۲۷۶	۳/۸۸۸۰	۳/۹۲۴۱	۳/۹۱۷۲	۳/۷۸۸۵

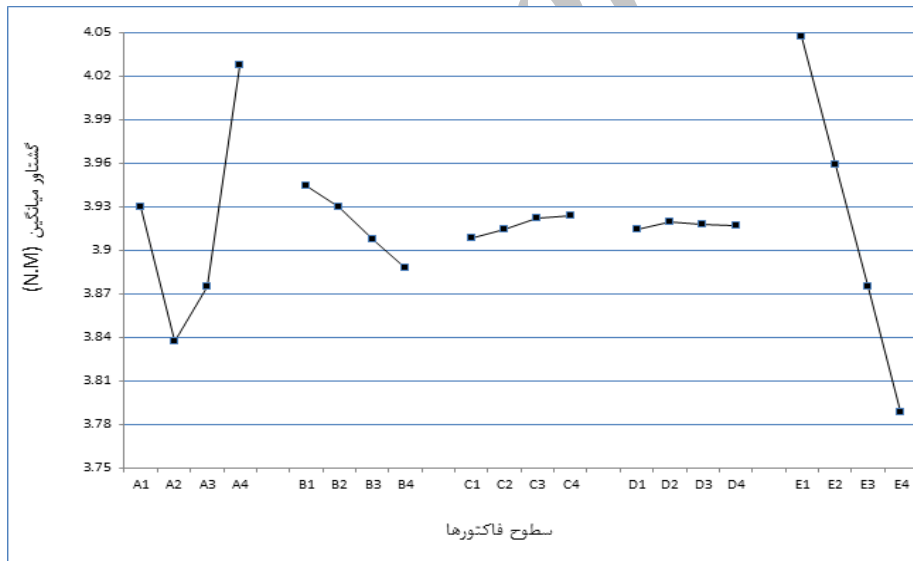
شکل (۳) نیز تاثیر سطوح فاکتورهای شبیه‌سازی روی مقدار گشتاور میانگین را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، ترکیب (A4,B1,C4,D2,E1) به بیشترین گشتاور میانگین منجر می‌شود.

جدول(۷): میانگین کلی نتایج

	T <sub>c</sub> (N.m)	T <sub>avg</sub> (N.m)
m	۰/۶۸۵۰	۳/۹۱۷۴

برای محاسبه مقدار میانگین اثر سطح ۳ فاکتور A روی مقدار T<sub>avg</sub> از رابطه (۵) بهره می‌گیریم. با توجه به جدول (۵) مشخص است که میانگین اثر سطح ۳ فاکتور A، از بین چهار آزمایش ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ که فاکتور A روی سطح ۳ تنظیم شده بود، به‌دست آمده است. مقدار میانگین اثر سطوح بقیه فاکتورها روی مقدار گشتاور میانگین نیز به همین ترتیب به‌دست می‌آیند که در جدول (۸) نشان داده شده‌اند.

$$Y_{A3} = \frac{1}{4} (T_{avg}(9) + T_{avg}(10)) \quad (5)$$



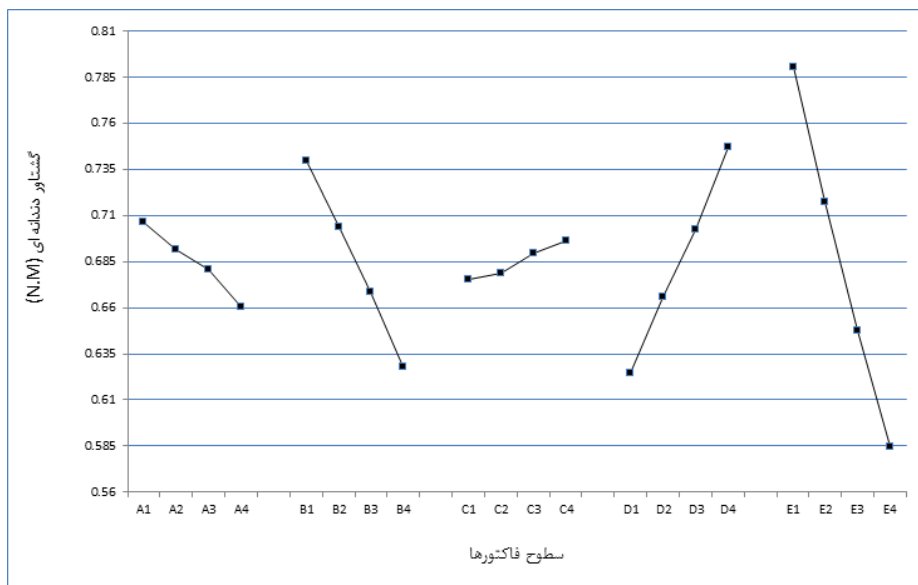
شکل (۳): تاثیر سطوح فاکتور ها روی مقدار گشتاور میانگین

مقدار گشتاور دندان‌های منجر می‌شود.

جدول(۹): مقدار میانگین اثر سطوح فاکتورها

i	A <sub>i</sub>	B <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>	D <sub>i</sub>	E <sub>i</sub>
۱	۰/۷۰۶۳	۰/۷۳۹۶	۰/۶۷۵۳	۰/۶۲۴۳	۰/۷۹۰۵
۲	۰/۶۹۱۹	۰/۷۰۳۴	۰/۶۷۹	۰/۶۶۵۶	۰/۷۱۷۴
۳	۰/۶۸۱۰	۰/۶۶۸۵	۰/۶۸۹۵	۰/۷۰۲۵	۰/۶۴۷۶
۴	۰/۶۶۰۷	۰/۶۲۸۲	۰/۶۹۶۰	۰/۷۴۷۴	۰/۵۸۴۳

با روش مشابه، به محاسبه مقدار میانگین اثر سطوح فاکتورها روی مقدار پیک تا پیک گشتاور دندان‌های می‌پردازیم. نتایج حاصل در جدول (۹) نشان داده شده است. شکل (۴) نیز تاثیر فاکتورهای اصلی روی مقدار پیک تا پیک گشتاور دندان‌های را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ترکیب (A4,B4,C1,D1,E4) به کمترین



شکل (۴): تاثیر فاکتورهای اصلی روی مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای

اثر فاکتور C روی  $T_{avg}$  برابر با ۰/۲۷٪ و روی  $T_c$  برابر با ۰/۶۷٪ است. در نتیجه، بین دو سطح ۴ فاکتور C، سطح ۱ را انتخاب می‌کنیم. اثر فاکتورهای D و E روی  $T_{avg}$  به ترتیب برابر با ۰/۰۲٪ و ۰/۶۲/۴۸٪ و روی  $T_c$  به ترتیب برابر با ۰/۲۰/۵۶٪ و ۰/۵۹/۱۹٪ است. در نتیجه، فاکتورهای D و E انتخاب می‌شوند و در نهایت، به ترکیب (A4, B4, C1, E1, D1) می‌رسیم.

پس از تعیین ترکیب بهینه، باید پاسخ روش تاگوچی در این شرایط جدید محاسبه و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شود. در جدول (۱۱) نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی قبل و بعد از بهینه‌سازی و نتایج حاصل از روش تاگوچی برای مقایسه آورده شده‌اند. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی شاهد کاهش ۰/۱۳/۱۶٪ برای گشتاور دندانه‌ای و افزایش ۰/۸/۳۲٪ گشتاور میانگین خروجی هستیم.

جدول (۱۱): مقایسه نتایج

	Tavg (N.m)	Tc (N.m)
اولیه	۳/۸۲۷۶	۰/۷۳۱۱
پاسخ روش تاگوچی	۴/۱۱۱۸	۰/۶۳۹۱
نتایج بهینه‌سازی	۴/۱۴۶۰	۰/۶۳۴۹

در شکل (۵)، گشتاور دندانه‌ای موتور قبل و بعد از اعمال اصلاحات نشان داده شده است. کاهش مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای قابل مشاهده است.

محاسبه مجموع مربعات فاکتورها در جدول (۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۱۰): مجموع مربعات و اثر فاکتورها

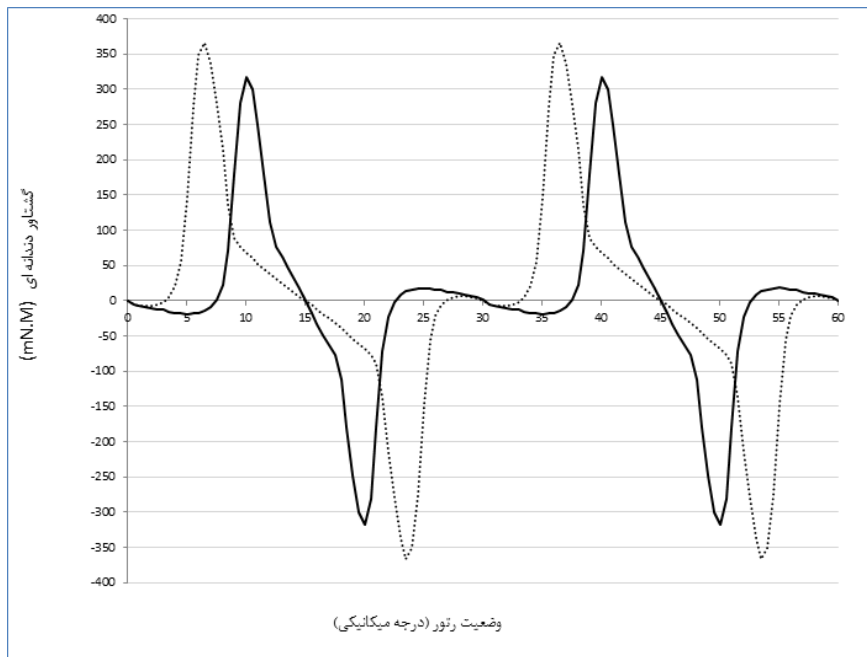
	Tavg (N.m)		Tc (N.m)	
	SSF	اثر فاکتور %	SSF	اثر فاکتور
A	۰/۰۸۲۰	۳۴/۱۵	۰/۰۰۴۴۳	۲/۷۶
B	۰/۰۰۷۴۰	۳/۰۸	۰/۰۲۷۰۰	۱۶/۸۲
C	۰/۰۰۰۶۵	۰/۲۷	۰/۰۰۱۰۸	۰/۶۷
D	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳۳۰۰	۲۰/۵۶
E	۰/۱۵	۶۲/۴۸	۰/۰۹۵۰۰	۵۹/۱۹
مجموع	۰/۲۴۰۱	۱۰۰	۰/۱۶۰۵۱	۱۰۰

### ۳-۱-۶ بهینه‌سازی طراحی

با توجه به جدول (۸) و شکل (۳)، ترکیب (A4, B1, C4, D2, E1) به بیشترین گشتاور میانگین منجر می‌شود. از طرفی با توجه به جدول (۹) و شکل (۴)، مشخص است که ترکیب (A4, B4, C1, D1, E4) به کمترین مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای منجر می‌شود. در نگاه اول تنها می‌توان سطح چهارم فاکتور A را انتخاب کرد. برای پیدا کردن سطوح دیگر از جدول (۱۰) کمک می‌گیریم. برای به دست آوردن اثر فاکتورها، مقدارSSF هر کدام از فاکتورها را باید بر مجموع کل تقسیم کرد.

با توجه به اثر فاکتورها، اثر فاکتور B روی  $T_{avg}$  برابر با ۰/۳/۰۸٪ و روی  $T_c$  برابر با ۰/۱۶/۸۲٪ است. بنابراین، بین دو سطح ۴ فاکتور B، سطح ۴ را انتخاب می‌کنیم. همچنین



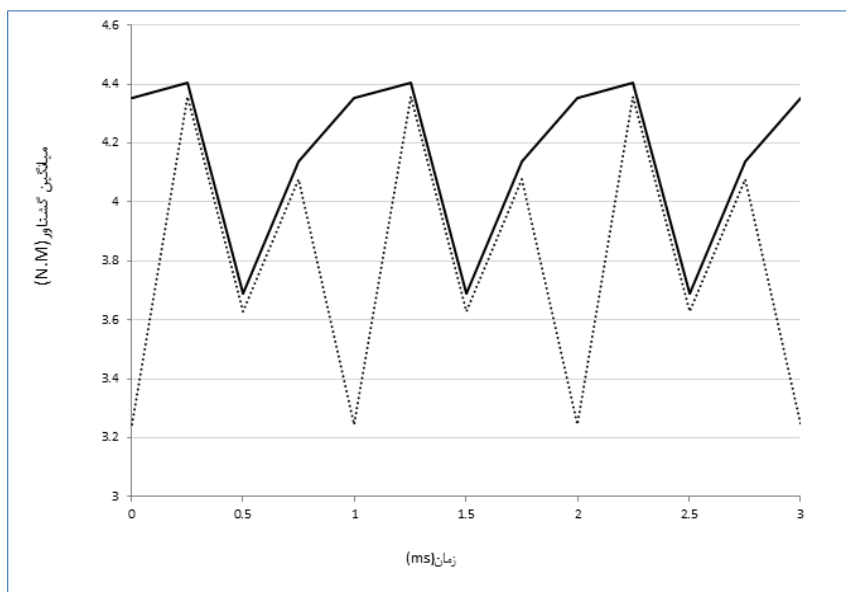


شکل (۵): گشتاور دندانه‌ای موتور در حالت اولیه (خط تیره) و بعد از بهینه‌سازی (خط کامل)

خروجی موتور از تقسیم مقدار مؤثر مؤلفه AC گشتاور، بر میانگین گشتاور خروجی به دست می‌آید. مقادیر ریپل گشتاور خروجی نیز در جدول (۱۲) مقایسه شده است. با مقایسه ریپل گشتاور خروجی قبل و پس از بهینه‌سازی شاهد کاهش قابل توجه ۳۸/۶۸٪ آن هستیم.

در شکل (۶)، گشتاور خروجی موتور قبل و بعد از اعمال اصلاحات نشان داده شده که کاهش اعوجاج و افزایش گشتاور خروجی موتور به وضوح قابل مشاهده است.

برای مقایسه بهتر نتایج، ریپل گشتاور خروجی موتور قبل و پس از بهینه‌سازی نیز محاسبه می‌گردد. ریپل گشتاور



شکل (۶): میانگین گشتاور خروجی موتور در حالت اولیه (خط تیره) و پس از بهینه‌سازی (خط کامل)

جدول (۱۳): پارامترهای اصلی ماشین

قطر خارجی استاتور	۲۷۰mm
قطر داخلی استاتور	۱۶۲mm
قطر خارجی رتور	۱۶۱/۵mm
قطر خارجی شافت	۱۱۰/۵mm
طول فاصله هوایی	۰/۵mm
تعداد شیار	۴۸
تعداد قطب	۸
هسته رتور و استاتور	DW360-50
نوع مغناطیس‌های دائم	NdfeB 30SH

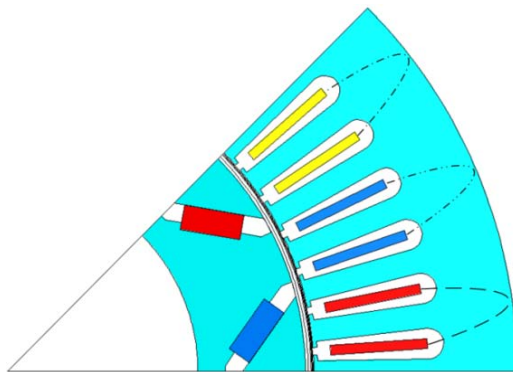
جدول (۱۲): مقایسه ریپل قبل و پس از بهینه‌سازی

ریپل گشتاور خروجی موتور(%)	مقدار مؤثر مؤلفه AC گشتاور (N.m)	
۱۱/۰۹۳۱	۰/۴۲۴۶	اولیه
۶/۸۰۱۷	۰/۲۸۲۰	پس از بهینه‌سازی

### ۲-۳ موتور مغناطیس دائم با آهنربای داخلی

در این بخش با هدف کاهش گشتاور دندانه‌ای و ریپل گشتاور خروجی، به اصلاح طراحی یک موتور با آهنربای دائم داخلی نوع V شکل پرداخته‌ایم. موتورهای آهنربای دائم داخلی<sup>۲</sup> به علت تولید توام گشتاور مغناطیسی و رلوکتانسی، دارای توان تولیدی بیشتری نسبت به حجم موتور، در مقایسه با سایر انواع موتورهای آهنربای دائم هستند [۳۶]. نحوه چیدمان قطب‌های آهنربای دائم در داخل رتور و شکل شیارها در این موتورها از عوامل اصلی تولید این گشتاورهای مزاحم محسوب می‌شوند. به علت تقارن و با هدف کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها، تنها یک هشتم موتور طراحی و تحلیل می‌شود. شماتیک کلی موتور آهنربای دائم با قطب‌های داخلی و چیدمان قطب‌های V شکل، با ۸ قطب و ۴۸ شیار، در شکل (۷) نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای اصلی این موتور نیز در جدول (۱۳) آمده‌اند.

نحوه سیم پیچی استاتور نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.

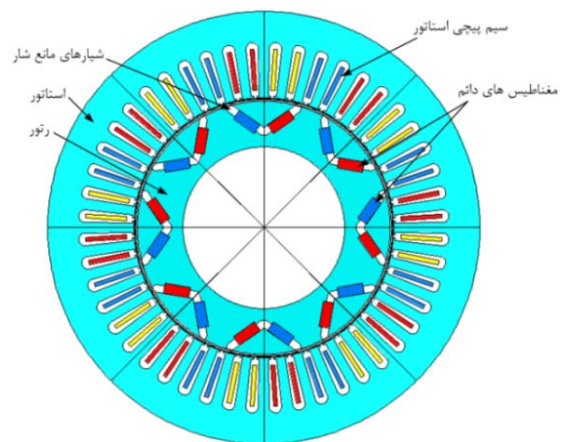


شکل (۸): سیم پیچی موتور IPM

### ۱-۲-۳ فاکتورهای طراحی

در شکل (۹) پارامترهای مورد استفاده برای بهینه‌سازی طراحی موتور نشان داده شده‌اند که در ادامه به معرفی مختصر این فاکتورها و مقادیر آنها در حالت اولیه می‌پردازیم:

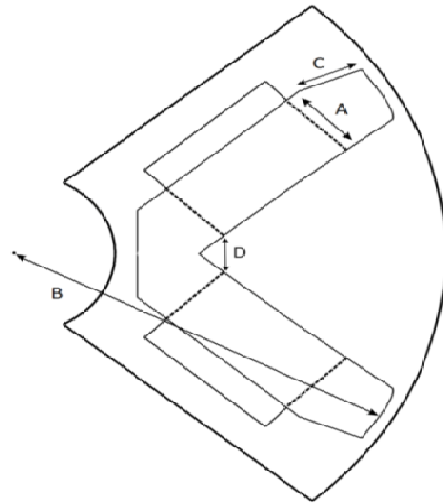
- A- ضخامت شیارهای مانع شار (duct) با مقدار اولیه ۴/۷؛
- B- فاصله ابتدای duct تا مرکز شافت با مقدار اولیه ۷۸/۷۲ میلی‌متر؛
- C- ارتفاع دندانه duct با مقدار اولیه ۳ میلی‌متر؛
- D- کمترین فاصله بین دو آهنربا با مقدار اولیه ۴/۵ میلی‌متر.



شکل (۷): شماتیک موتور ۸ قطب و ۴۸ شیار مغناطیس دائم با آهنربای داخلی

جدول (۱۵): جدول آرایه‌های متعامد

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

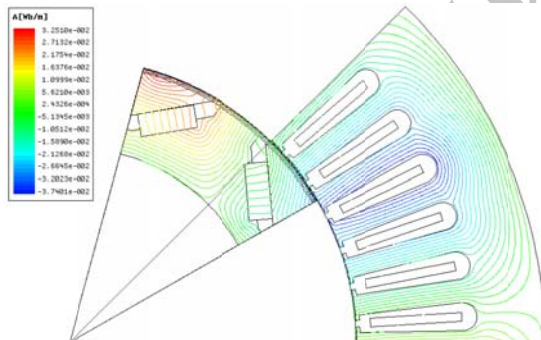


شکل (۹): پارامترهای بهینه سازی طراحی موتور IPM

## ۳-۲-۳ تحلیل عملکرد موتور با روش اجزای

## محدود

در این مرحله همانند روند بهینه‌سازی موتور SPM، به منظور به‌دست آوردن میانگین گشتاور خروجی موتور، گشتاور دندانه‌ای موتور و ریپل گشتاور خروج، از نرم افزار تحلیل اجزای محدود Maxwell 2D استفاده می‌شود. در شکل (۱۰) نیز توزیع شار مغناطیسی در موتور طراحی شده نشان داده شده است.



شکل (۱۰): توزیع شار مغناطیسی در موتور IPM

## ۳-۲-۴ تحلیل نتایج شبیه سازی

با استفاده از نتایج آزمایش‌های طراحی شده توسط روش تاگوچی که در جدول (۱۶) آمده، در ادامه به تحلیل متوسط تأثیرات فاکتورها و تحلیل واریانس می‌پردازیم. مانند نمونه موتور قبل، پس از تحلیل‌های انجام شده روی نتایج آزمایش‌ها، ترکیب بهینه سطوح فاکتورها و مقادیر گشتاور میانگین و دندانه‌ای در نقطه بهینه محاسبه می‌شود. با توجه به نقطه بهینه به‌دست آمده، اصلاحات مورد نیاز

در جدول (۱۴)، فاکتورهای طراحی موتور نشان داده شده است. سطوح تغییرات هر کدام از فاکتورها نیز در این جدول نشان داده شده است.

جدول (۱۴): فاکتورهای طراحی و سطوح تغییرات آنها

فاکتورها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A	۴/۲	۴/۷	۵/۲
B	۷۸/۲۲	۷۸/۷۲	۷۹/۲۲
C	۲/۵	۳	۳/۵
D	۳/۵	۴/۵	۵/۵

## ۳-۲-۳ چیدمان آزمایش‌ها

در جدول (۱۵) با توجه به تعداد فاکتورها و سطوح هر کدام از فاکتورها و با استفاده از جداول آرایه‌های متعامد تاگوچی، تعداد آزمایش‌های لازم و چگونگی ترکیب سطوح فاکتورها در هر آزمایش مشخص شده است. به وضوح مشخص است که روش تاگوچی باعث کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز از تعداد کل  $3^4=81$  به تعداد ۹ آزمایش شده است. روش تاگوچی با توجه به نتایج حاصل از این تعداد آزمایش‌های محدود و با استفاده از محاسبات آماری، بهینه‌ترین نقطه را تعیین می‌کند.

با توجه به جدول (۱۴) مشخص است که میانگین اثر سطح ۳ فاکتور A، از بین چهار آزمایش ۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ که فاکتور A روی سطح ۳ تنظیم شده بود، به دست آمده است. مقدار میانگین اثر سطوح بقیه فاکتورها روی مقدار گشتاور میانگین نیز به همین ترتیب به دست می‌آیند که در جدول (۱۸) نشان داده شده اند. شکل (۱۱) نیز تاثیر سطوح فاکتورهای شبیه‌سازی روی مقدار گشتاور میانگین را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، ترکیب (A3,B3,C1,D1) به بیشترین گشتاور میانگین منجر می‌شود.

برای رسیدن به نقطه بهینه، اعمال و نتایج پس از شبیه‌سازی، با مقادیر به دست آمده از روش تاگوچی مقایسه می‌شود. میانگین کلی نتایج محاسبه شده، در جدول (۱۷) آمده است.

جدول (۱۶): نتایج شبیه‌سازی‌ها

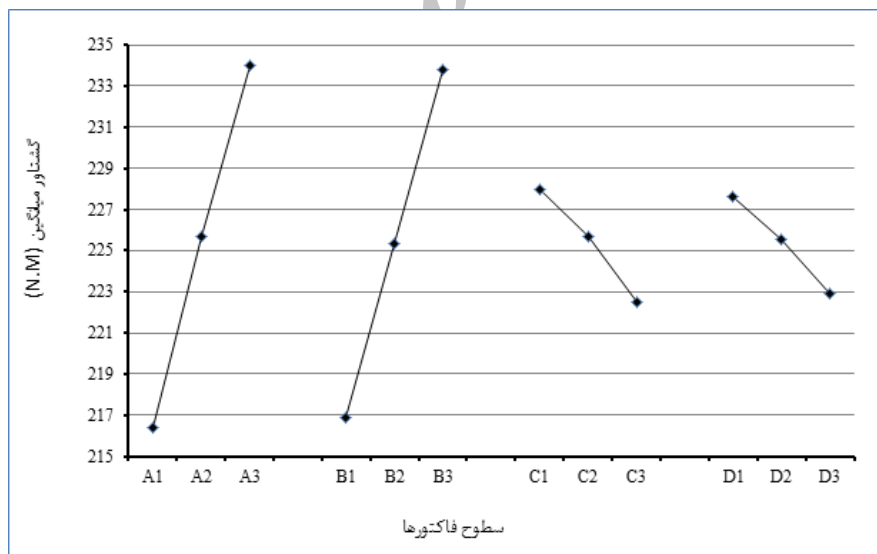
آزمایش	T <sub>c</sub> (N.m)	T <sub>avg</sub> (N.m)
۱	۲/۵۸۵۱	۲۱۲/۸۲۹۵
۲	۱/۳۷۲۷	۲۱۶/۸۲۱۰
۳	۲/۱۵۶۳	۲۱۹/۵۲۱۰
۴	۲/۹۸۵۰	۲۱۵/۰۹۷۰
۵	۲/۳۳۹۳	۲۲۵/۱۰۱۶
۶	۴/۹۶۹۰	۲۳۶/۹۴۳۷
۷	۳/۲۰۴۲	۲۲۲/۷۸۰۲
۸	۴/۹۳۵۵	۲۳۴/۱۳۳۸
۹	۵/۲۵۲۰	۲۴۵/۰۳۰۰

جدول (۱۸): مقدار میانگین اثر سطوح فاکتورها

i	A <sub>i</sub>	B <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>	D <sub>i</sub>
۱	۲۱۶/۳۹۰۵	۲۱۶/۹۰۲۲	۲۲۷/۹۶۹۰	۲۲۵/۶۵۳۷
۲	۲۲۵/۷۱۴۱	۲۲۵/۳۵۲۱	۲۲۵/۶۴۶۹	۲۲۵/۵۱۵۰
۳	۲۳۳/۹۸۱۳	۲۳۳/۸۳۱۶	۲۲۲/۴۶۷۶	۲۲۲/۹۱۷۳

جدول (۱۷): میانگین کلی نتایج

	T <sub>c</sub> (N.m)	T <sub>avg</sub> (N.m)
m	۳/۳۱۱۰	۲۲۵/۳۶۲



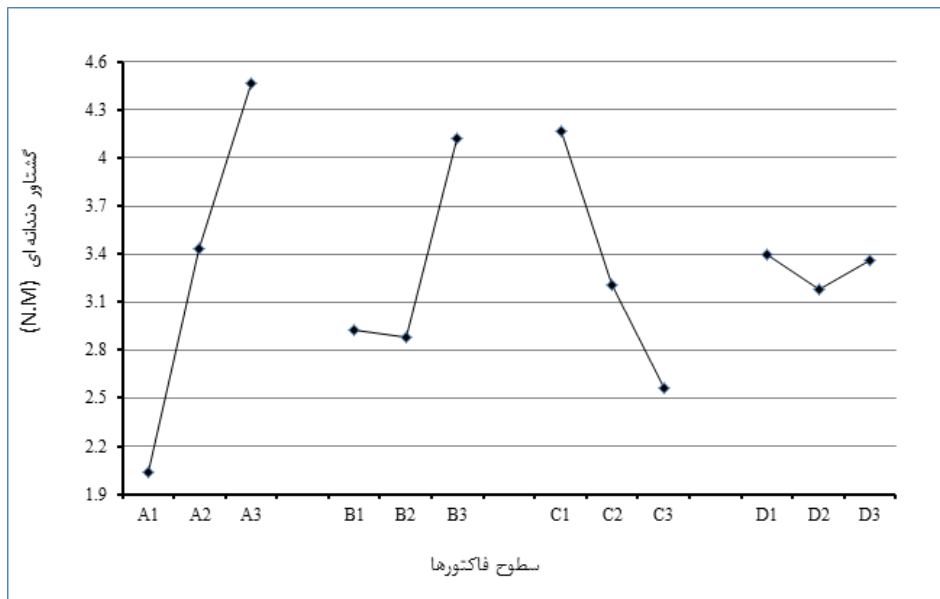
شکل (۱۱): تاثیر سطوح فاکتورها روی مقدار گشتاور میانگین

گشتاور دندانه‌ای منجر می‌شود.

جدول (۱۹): مقدار میانگین اثر سطوح فاکتورها

i	A <sub>i</sub>	B <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>	D <sub>i</sub>
1	۲/۰۳۸۰	۲/۹۲۴۷	۴/۱۶۳۲	۳/۳۹۲۱
2	۳/۴۳۱۰	۲/۸۸۲۵	۳/۲۰۳۲	۳/۱۸۲۰
3	۴/۴۶۴۰	۴/۱۲۵۸	۲/۵۶۶۶	۳/۳۵۹۰

با روش مشابه، به محاسبه مقدار میانگین اثر سطوح فاکتورها روی مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای می‌پردازیم. نتایج حاصل در جدول (۱۹) نشان داده شده است. شکل (۱۲) نیز تاثیر فاکتورهای اصلی روی مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، ترکیب (A1,B2,C3,D2) به کمترین مقدار



شکل (۱۲): تاثیر فاکتورهای اصلی روی مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای

با توجه به اثر فاکتورها، اثر فاکتور A روی  $T_{avg}$  برابر با  $۴۷/۷۱۳\%$  و روی  $T_c$  برابر با  $۵۶/۱۵۶\%$  است. بنابراین بین دو سطح ۱ و ۳ فاکتور A، سطح ۱ را انتخاب می‌کنیم. اثر فاکتور B روی  $T_{avg}$  برابر با  $۴۴/۱۳۲\%$  و روی  $T_c$  برابر با  $۱۸/۸۸۳\%$  است. بنابراین، بین دو سطح ۲ و ۳ فاکتور B، سطح ۳ را انتخاب می‌کنیم. اثر فاکتور C روی  $T_{avg}$  برابر با  $۴/۶۹۸۴\%$  و روی  $T_c$  برابر با  $۳/۴۶۵۱\%$  است. در نتیجه سطح ۳ برای فاکتور C انتخاب می‌شود. اثر فاکتور D روی  $T_{avg}$  برابر با  $۰/۴۸۳۶\%$  است و در نتیجه، برای فاکتور D، سطح ۱ انتخاب می‌شود که در نهایت به ترکیب (A1, B3, C3, D1) می‌رسیم.

در جدول (۲۱) نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی قبل و بعد از بهینه‌سازی و نتایج حاصل از روش تاگوچی برای مقایسه آورده شده‌اند. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی شاهد کاهش  $۳۹/۱۸\%$  برای گشتاور دندانه‌ای و کاهش تنها  $۱/۱۶\%$  گشتاور میانگین خروجی هستیم.

جدول (۲۱): مقایسه نتایج

	Tavg (N.m)	Tc (N.m)
اولیه	۲۲۵/۹۶۸۹	۳/۵۲۹۰
پاسخ روش تاگوچی	۲۲۴/۲۵۷۴	۲/۱۸۹۶
نتایج پس از بهینه‌سازی	۲۲۳/۳۳۰۱	۲/۱۴۶۳

همانند نمونه موتور SPM در این قسمت به تحلیل واریانس و تعیین سهم تغییرات هر فاکتور در پراکندگی کل پاسخ‌ها می‌پردازیم. مجموع مربعات فاکتورها در جدول (۲۰) نشان داده شده است.

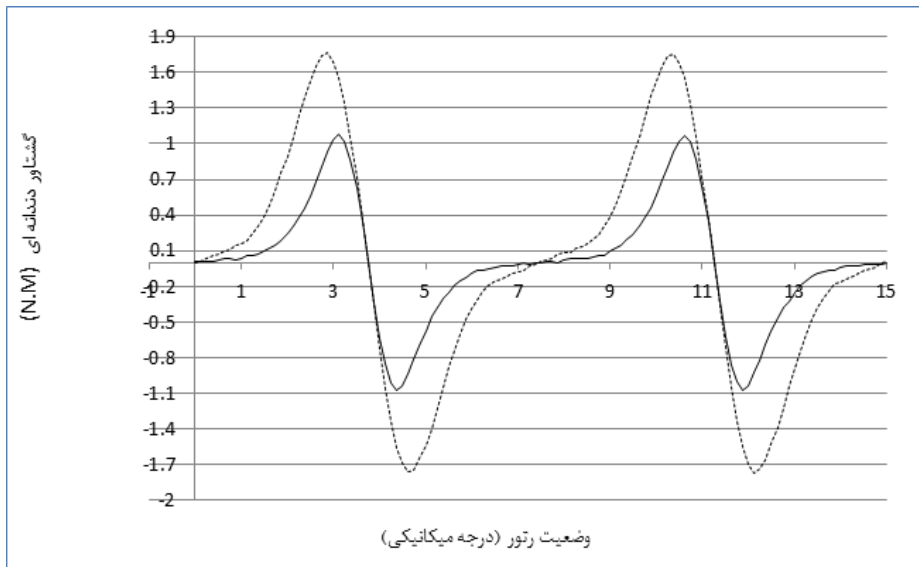
### ۳-۲-۵- بهینه سازی طراحی

با توجه به جدول (۱۷) و شکل (۱۱)، ترکیب (A3, B3, C1, D1) به بیشترین گشتاور میانگین منجر می‌شود. از طرفی، با توجه به جدول (۱۸) و شکل (۱۲)، مشخص است که ترکیب (A1, B2, C3, D2) به کمترین مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای منجر می‌شود. در نگاه اول سطوح ترکیب‌های به دست آمده کاملاً متفاوت بوده، برای تعیین ترکیب بهینه باید از نتایج تحلیل واریانس در جدول (۲۰) استفاده شود.

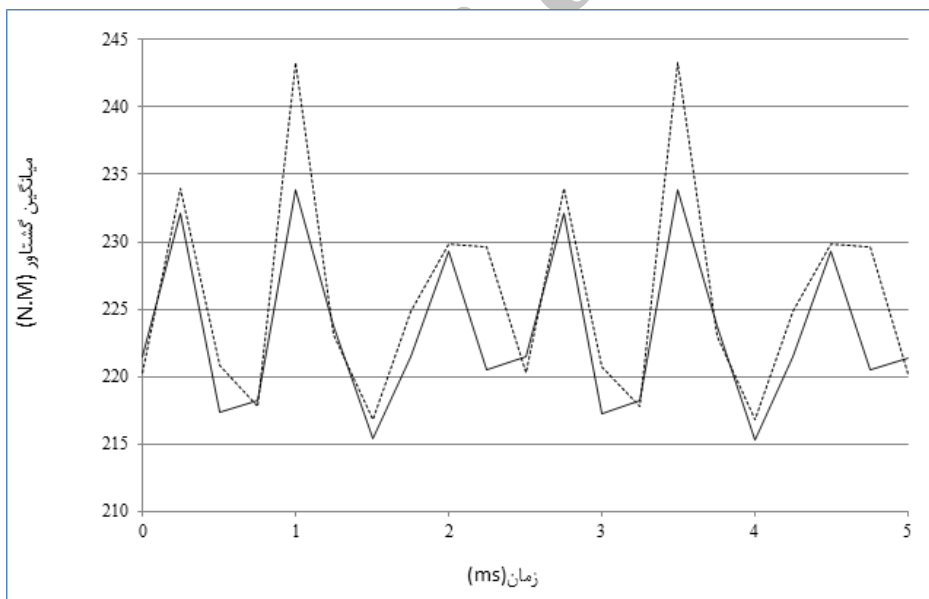
جدول (۲۰): مجموع مربعات و اثر فاکتورها

	$T_{avg}$ (N.m)		$T_c$ (N.m)	
	SSF	اثر فاکتور %	SSF	اثر فاکتور %
A	۴۶۴/۷۱۳	۴۷/۷۰۴۷	۸/۸۹۲	۵۶/۱۵۶۳
B	۴۲۹/۹۰۶	۴۴/۱۳۱۶	۲/۹۹۰	۱۸/۸۸۳۰
C	۴۵/۷۷۰	۴/۶۹۸۴	۳/۸۷۶	۲۴/۴۷۷
D	۳۳/۷۵۵۵	۳/۴۶۵۱	۰/۰۷۶	۰/۴۸۳۶
مجموع	۹۷۴/۱۴۴	۱۰۰	۱۵/۸۳۴	۱۰۰

در شکل (۱۳)، گشتاور دندانه‌ای موتور قبل و بعد از اعمال اصلاحات نشان داده شده است. کاهش مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای قابل مشاهده است. در شکل (۱۴)، گشتاور خروجی موتور قبل و بعد از اعمال اصلاحات نشان داده شده است. کاهش اعوجاج و افزایش گشتاور خروجی موتور به وضوح قابل مشاهده است.



شکل (۱۳): گشتاور دندانه‌ای موتور در حالت اولیه (خط تیره) و بعد از بهینه‌سازی (خط کامل)



شکل (۱۴): میانگین گشتاور خروجی موتور در حالت اولیه (خط تیره) و بعد از بهینه‌سازی (خط کامل)

جدول (۲۲): مقایسه ریپل قبل و پس از بهینه‌سازی

	مقدار مؤثر مؤلفه AC گشتاور (N.m)	ریپل گشتاور خروجی موتور (%)
اولیه	۷/۸۳۱۴	۳/۴۶۵۷
پس از بهینه‌سازی	۵/۹۸۰۱	۲/۶۷۷۷

برای مقایسه بهتر نتایج، همانند نمونه موتور SPM، ریپل گشتاور خروجی موتور قبل و بعد از بهینه‌سازی نیز محاسبه شده است. مقادیر ریپل گشتاور خروجی نیز در جدول (۲۲) مقایسه شده است. با مقایسه ریپل گشتاور خروجی قبل و پس از بهینه‌سازی شاهد کاهش قابل توجه ۲۲/۷۳٪ آن هستیم.

April 2009.

- [3] D.C. Hanselman, "Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF," in *Inst Elect. Eng. Proc. Elect. Power Appl.*, Vol. 44, No. 5 Sep. 1997, pp. 325-330.
- [4] Z.Q. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 15, No. 4, pp. 407-412, Dec. 2000.
- [5] Mini Dai, Ali Keyhani, and Tomy Sebastian, "Torque ripple analysis of a pm brushless dc motor using finite element method," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 19, No. 1, pp. 40-45 Mar. 2004.
- [6] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, "Design techniques for reducing the cogging torque in surface mounted PM motors," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 38, No. 5, pp. 1259-1265, Sep./ Oct. 2004
- [7] K. J. Binns, F. B. Chaaban, and A. A. K. Hameed, "Major design parameters of a solid canned motor with skewed magnets," in *IEEE Proc.*, Vol. 140, No. 3, May 1993, pp. 161-165.
- [8] M. Jug, B. Hribemik, A. Hamler, M. Trlep, and B. Kreca, "Investigation of reluctance torque of brushless DC motor," in *Proc. Int. Conf. Elec. Machines*, 1990, pp. 132-137.
- [9] T. Sebastian and V. Gangla, "Analysis of induced EMF and torque waveforms in a brushless permanent magnet machine," in *Rec. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meet.* 1994, pp. 240-246.
- [10] E.R. Braga Filho, A.M.N. Lima and T.S. Araujo, "Reducing cogging torque in interior permanent magnet machines without skewing," *IEEE Transaction on Magnetics* Vol. 34, No. 5, pp. 3652 - 3655 1998.
- [11] N. Matumoto, S. Nishimura, M. Sanada, S. Morioto and Y. Takeda, "Torque performances and arrangement of permanent magnet for IPMSM," *The Papers of Technical Meeting on Rotating Machinery*, EE Japan, RM-04-52, 2004.
- [12] T. Kobayshi, M. Sanada, S. Morimoto and Y. Takeda, "Performance improvement of IPMSM with concentrated windings using rare-earth magnets by making holes" (in Japanese), *The Paper of Technical Meeting on Semiconductor Power Converter*, EE Japan, SOC-03-4, 2003.
- [13] Y. Kawaguchi, T. Sato, I. Miki, and M. Nakamura, "A reduction method of cogging torque for IPMSM," *The Eighth International Conference on Electrical Machine and System*, 2005, (ICEMS 2005), pp. 248-250,

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی ارائه گردید. برای ارزیابی مؤثر بودن عملکرد این روش با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، بهینه‌سازی طراحی روی دو نمونه موتور مغناطیس دائم با هدف کاهش گشتاور دندانه‌ای و عدم کاهش قابل توجه گشتاور میانگین خروجی، انجام شده است.

در نمونه اول، بهینه‌سازی به طور همزمان روی طراحی شکل مغناطیس‌های دائم، شکل شیارهای استاتور و طول فاصله هوایی یک موتور SPM صورت گرفت. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۱۳/۱۶٪ مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای، افزایش ۸/۳۲٪ مقدار میانگین گشتاور خروجی و کاهش ۳۸/۶۸٪ ریپل گشتاور خروجی موتور است.

در نمونه دوم نیز بهینه‌سازی به طور همزمان روی ابعاد داکت‌ها و محل قرارگیری مغناطیس‌های دائم یک موتور IPM صورت گرفته است. نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل توجه ۳۹/۱۸٪ مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه‌ای و کاهش ۲۲/۳۳٪ ریپل گشتاور خروجی موتور است. مقدار میانگین گشتاور خروجی نیز تنها به میزان ۱/۱۶٪ کاهش یافته است. پیشنهادها زیر برای ادامه بهینه‌سازی طراحی شکل به روش تاگوچی، ارائه می‌شود:

❖ استفاده از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی انواع دیگر موتورهای آهنربای دائم

❖ استفاده از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی مشخصه‌های دیگر موتورها مانند راندمان، تلفات و ...

❖ بررسی عملکرد روش پیشنهادی بر رفتار موتور در مقایسه با سایر روشهای بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک و ...

#### مراجع

- [1] Thomas M. Jahns, Wen L. Soong, "Pulsing torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review," *IEEE Trans. Indus. Electronics*, Vol. 43, No. 2, pp. 321-330, 1996.
- [2] Li Zhu, S.Z. Jiang, Z. Q. Zhu and C. C. Chan, "Analytical method for minimizing cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 45, No. 4, pp. 2020-2031,

- 2005.
- [25] R. Islam, I. Husain, A. Fardoun, "Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction," *IEEE Trans. On Industry Application*, Vol. 45, No. 1, pp. 152-160 June 2009.
- [26] T. Jahns, "Motion control with permanent- magnet AC machines," in *IEEE Proc.*, Vol. 82, No. 8, pp. 1241-1252, Aug. 1994.
- [27] P. Zheng, J. Zhao, J. Han, "Optimization of the Magnetic Pole Shape of a Permanent-Magnet Synchronous Motor," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 43, No. 6, pp. 2531-2533 June 2007.
- [28] T. Ishikawa, and G. R. Slemon, "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 29, No. 2, pp. 2028-2031, 1993.
- [29] A. Hassanpour, S. Vaez-Zadeh, "Using Modular Poles for Shape Optimization of Flux Density Distribution in Permanent-Magnet Machines," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 44, No. 8, pp. 2009-2015 August 2008.
- [30] Gyu-Hong Kang and Jin Hur, "Analytical prediction and reduction of the cogging torque in interior permanent magnet motor" *IEEE Trans. magn.*, pp. 1420-1624, 2005.
- [31] Y. Kawaguchi, T. Sato, I. Miki, and M. Nakamura, "A reduction method of cogging torque for IPMSM", *IEEE*.
- [32] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Diego Bon, and Michele Dai Pré, "Torque Harmonic Compensation in a Synchronous Reluctance Motor", in *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 2, June 2008, pp. 466-473.
- [33] K. Hwang, S. Rhee, B. Yang, "Rotor Pole Design in Spoke-Type Brushless DC Motor by Response Surface Method," in *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1833-1836, April 2007.
- [34] Der-Ray Huang, Tai-Fa Ying, Shyh-Jier Wang, Chi-mou Zhou, Yin Kwang Lin, Kai-Wen Su, and Hsu, C.-I.-G., "Cogging torque reduction of a single-phase brushless DC motor" *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, pp. 2075-2977, 1998.
- [35] R. Lateb, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, "Effect of Magnet Segmentation on the Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors," in *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, No. 3, pp. 442-445 March 2006.
- 2005.
- [14] Sang- Moon Hwang, jae Boo Eom, ect, "various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, No. 4. pp. 2806-2909, 2001.
- [15] Sang- Moon Hwang, jae Boo Eom, ect, "Cogging toeque and acoustic noise reduction in permanent magnet motors by teeth pairing," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 36, No. 5, pp. 3144-3146, 2000.
- [16] Y. Lin, Y. Hu, T. Lin, " A method to reduce the cogging torque of spindle motors," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 209, No.1-3, pp. 180-182, 2000.
- [17] Liang-Yi Hsu and Mi-Ching Tsai, "Tooth shape optimization of brushless permanent magnet motors for reducing torque ripples," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 282, No.2, pp. 193-197., November 2004.
- [18] Mohammad S. Islam, Sayeedmir, and Tomy Sebastian, "Issues in reducing the cogging torque o mass produced permanent magnet brushless dc motor," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 43, No. 9, pp. 813-820 2007.
- [19] M. Aydin, Z. Q. Zhu, T. A. Lipo, "Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines Design Concepts," *IEEE Trans. Indus. Applications.*, Vol. 40, No. 3, pp. 813-820, 2004.
- [20] Yang, X. Wang, R. Zhang, T. Ding, and R. Tang, "The optimization of pole arc coefficient to reduce cogging torque in surface-mounted permanent magnet motors," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 42, No. 4, pp. 1135-1138, 2006.
- [21] A. Q. Zhu, and S. Ruangsinchaiqanich, N. Schofield and D. Howe, "reduction of cogging torque in interior magnet brushless machines," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 39, No. 5, pp. 3238-3240, 2003.
- [22] C. C. Hwang, S. B. John, and S. S. Wu, "Reduction of cogging torque in spindle motors," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 34, No. 2, pp. 468-470, 1998.
- [23] A. keyhani, C. Studer, T. Sebastian, and S. K. Murth, "Study of cogging torque in permanent magnet motors," *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 27, No. 7, pp. 665-678, July 1999.
- [24] A. Q. Zhu, and S. Ruangsinchaiqanich, D. Ishak and D. Howe, "Analysis of cogging torque in brushless machines having nonuniformly distributed stator slots and stepped rotor magnets," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 41, No. 10, pp. 3910-3912,



- [36] C. Jin, D. Jung, K. Kim, "A Study on Improvement Magnetic Torque Characteristics of IPMSM for Direct Drive Washing Machine", in IEEE Trans. Magn., Vol. 45, No. 6, pp. 2811-2814 June 2005.
- [37] Elham Zeinali; "Taguchi method of experimental design using software Qualitek", Research and Innovative Technology Company, summer 2008. [in persian]

---

<sup>1</sup> Cogging Torque

<sup>2</sup> Pulsating Torque

<sup>3</sup> Interior Permanent Magnet Motors –IPM

Archive of SID