

## تحلیل و شبیه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس شارمحور با استاتور تغییر ساختاریافته در حالت استاتیکی و دینامیکی

محمدجواد جلیلیان<sup>۱</sup>، حسین ترکمن<sup>۲\*</sup>، محسن حمزه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

mohammadjavadjalilian1994@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

h\_torkaman@sbu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m\_hamzeh@sbu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، ساختار جدیدی از موتورهای سوئیچ رلوکتانس شارمحور بهبود داده شده است. در این نوع موتورها، ترکیبات مختلف تعداد قطب‌های روتور و استاتور روی گشتاور موتور و عملکرد آن تأثیر خواهد گذاشت. در این راستا با تغییر در ساختار استاتور موتور سوئیچ رلوکتانس شارمحور، نتایج بهتری برای گشتاور و شار مغناطیسی به دست خواهد آمد. ساختار بهبود یافته دارای مزایای مسیر کوتاه شار و بخش‌بخش کردن روتور برای بهبود چگالی شار است. در ادامه، مشخصات اصلی هندسی، الکتریکی و فیزیکی موتور ارائه شده است. سپس ساختار پیشنهادی با استفاده از تعداد بیشتری از بخش‌های روتور توسط ماژول‌های استاتور تغییر یافته اصلاح می‌شود. ساختار بهبود یافته دارای پتانسیل بالایی برای وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) و وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی (HEVs) است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که موتور پیشنهاد شده و اصلاح شده در مقایسه با موتور مرجع و گشتاور مشابه کمتر از جرم مواد فعال استفاده می‌کند. مقایسه عملکرد موتورهای انتخاب شده با استفاده از تجزیه و تحلیل سه‌بعدی روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

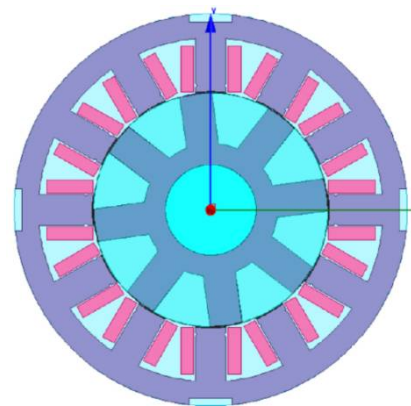
**واژه‌های کلیدی:** موتور شارمحور، موتورهای سوئیچ رلوکتانس، روش اجزای محدود، تحلیل استاتیک و تحلیل دینامیک.

\* نویسنده مسئول

## ۱. مقدمه

از آنجا که هر دوی روتور و استاتور قطب‌های برجسته دارند، موتور سوئیچ رلوکتانسی بسیار متفاوت از سایر ماشین‌های چند فاز است. این موتور را می‌توان فقط به همراه مبدل قدرت مخصوص و کنترل‌شده استفاده کرد، در نتیجه تنها مشخصات کلی آن‌ها مناسب است. موتور SR از طریق کشش آهن‌ربایی گشتاوری ایجاد می‌کند که بین آهن‌رباهای مغناطیسی استاتور و مجموعه قطب‌های برجسته اتفاق می‌افتد و روی یک روتور ساده شکل می‌گیرد که از جنس مواد فرومغناطیسی ساخته می‌شود [۴-۱].

اصول ساده تولید گشتاور به صورت شهودی به شکل بسیار ساده‌ای با موتور رلوکتانسی مشاهده می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): موتور شار شعاعی سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۱۲/۸

اگر جریان وارد سیم‌پیچ شود، روتور تا نقطه‌ای که همسو با کویل‌ها شود خواهد چرخید؛ در این نقطه رلوکتانس فاصله هوایی مینیمم و در نتیجه اندوکتانس فاز ماکزیمم است. اگر ماشین به‌طور آهسته و به‌صورت مغناطیسی بارگذاری شود و سطح متوسط گشتاور تولید شود، فولادی که روتور و استاتور از آن ساخته شده است به‌طور مغناطیسی در مد تقریباً خطی رفتار خواهد کرد؛ یعنی برای تعداد مشخصی از دورهای سیم‌پیچ، شار مغناطیسی فاز تقریباً متناسب با جریان فاز تغییر می‌کند. جریان‌های فازی همیشه به‌صورت سنکرون با موقعیت مکانیکی روتور تغییر می‌کنند. در سرعت‌های کم، فازها در تمام منطقه اندوکتانس افزایشی برقرار می‌شوند و محدودسازی جریان اکتیو توسط کنترل‌کننده انجام می‌شود. گشتاور با تنظیم دامنه جریان فاز کنترل می‌شود.

از دیدگاه شار، موتورهای سوئیچ رلوکتانسی به انواع شعاعی و شارمحوری تقسیم می‌شوند. تفاوت نوع شارمحور به‌نوع شار شعاعی را می‌توان در نسبت گشتاور به حجم بالا، بهره بالا، فاصله هوایی قابل تنظیم، نیروی جاذبه متعادل بین استاتور و روتور و تبادل گرمایی بهتر بیان کرد [۵] و [۶]. موتورهای شارمحور می‌توانند یک‌طرفه یا دوطرفه، با هسته یا بدون هسته، دارای روتور داخلی یا خارجی و یا دارای آهن‌ربای سطحی یا

داخلی باشند [۷]. گشتاور ضربانی این موتورها از نوع مرسوم، بیشتر است اما کم‌کم چگالی گشتاور بالایی دارند. در این راستا مطالعات جامعی روی موتورهای شار شعاعی انجام شده است. مطالعات صورت‌گرفته منجر به تلاش‌هایی برای تغییر ساختار این نوع موتورها بوده که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

- انواع ترکیبات تعداد قطب‌های استاتور و روتور؛
- ایجاد کردن دو برجستگی در هر قطب استاتور یا روتور؛
- تغییر شکل و اندازه قطب استاتور یا روتور؛
- استاتور با قطب‌های نامتقارن؛
- تغییر فاصله هوایی از طریق قوس الکتریکی قطب؛
- معرفی موتور با استاتور دوجداره و موتورهای چندلایه.

استفاده از ساختار بخش روتور یکی از اصلاحات مهم در ساختار موتورهای سوئیچ رلوکتانس بوده است که این موتورها را قادر ساخته در هر نسبت حجمی، گشتاور قابل ملاحظه‌ای را تولید کنند [۸، ۹ و ۱۰]. در این راستا در [۹]، دو ساختار مختلف برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس بخش روتور شار شعاعی معرفی و آن‌ها را به‌صورت زیر نام‌گذاری کردند: الف. موتور سوئیچ رلوکتانسی تک‌دندانه‌ای با روتور تکه‌ای<sup>۱</sup> و موتور سوئیچ رلوکتانسی چنددندانه‌ای با روتور تکه‌ای<sup>۲</sup>. این دو موتور برای سهولت نام‌گذاری به‌صورت اختصاری به نام‌های STW و MTW نام‌گذاری شده‌اند. با توجه به اینکه این دو موتور از لحاظ ساختاری کاملاً متفاوت‌اند، عملکرد یکسانی دارند. با توجه به ساختار این دو نوع موتور می‌توان پی‌برد که موتور MTW به پایان سیم‌پیچی طولانی‌تری نسبت به موتور STW نیاز دارد. از آنجا که موتورهای شارمحوری نسبت به موتورهای شار شعاعی به پایان سیم‌پیچی بلندتری نیاز دارند، موتورهای MTW شارمحور طول پایان سیم‌پیچی بلندتری خواهند داشت.

بنابراین موتور STW به‌عنوان موتور مرجع برای در نظر گرفتن طراحی و مقایسه در این مقاله انتخاب شده است. این ساختارها کاملاً برای کاربردهای ترکشن و نیرو محرکه مانند هاب‌موتورها مورد تقاضاست؛ زیرا محدودیت‌های فضایی منجر به بزرگ شدن قطر موتور و کاهش طول پشته موتور یا همان Stack شود. برای کاربردهای ترکشن، موتورهای SRM دارای مزیت‌هایی از جمله از نظر هزینه‌ای به نسبت موتورهای آهن‌ربای دائم بدون جاروبک و موتورهای القایی دارد. علاوه بر این، موتورهای SRM دارای چگالی گشتاور زیادی نیز هستند [۱۱ و ۱۲].

به‌تازگی نشان داده شده که موتورهای سوئیچ رلوکتانسی که تعداد قطب‌های روتور بیشتر از تعداد قطب‌های استاتور آن است، راندمان و گشتاور بیشتری به نسبت جرم آن‌ها دارند [۱۳ و ۱۴]. ترکیبات مختلف

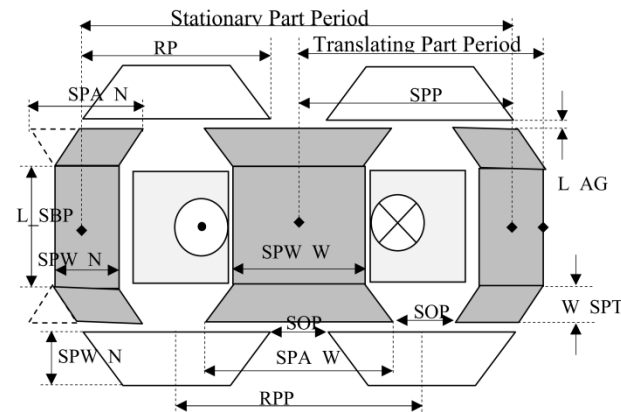
1. Single-Tooth Winding Segmental Rotor SRM  
2. Multi-Tooth Winding Segmental Rotor SRM

از مهم‌ترین معیارهای عملکرد موتور است، خراب نخواهد کرد یا به‌عبارت دیگر باعث بدتر شدن گشتاور نخواهد شد.

## ۲. موتور سوئیچ رلوکتانس شارمخوری

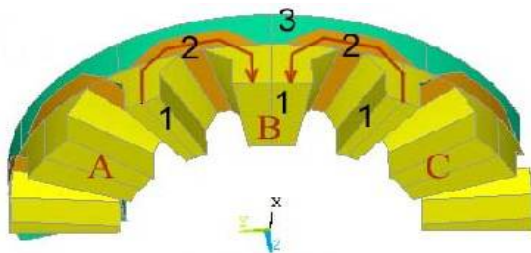
### ۱.۲. جزئیات هندسی

یک سیستم الکترومکانیکی با مسیر شار کوتاه و همچنین دارای ضریب استفاده بهتر از فضای موجود به‌صورت شکل (۲) آورده شده است.

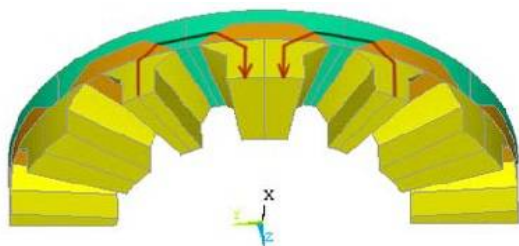


شکل (۲): پارامترهای هندسی موتور مورد نظر

قسمت‌های بالا و پایین که در شکل نشان داده شده‌اند، به‌عنوان قسمت‌های متحرک در نظر گرفته شده و همچنین فرض می‌شود که سیم‌پیچی و بازوهای عمودی هسته که در شکل مشخص است، به‌صورت ثابت خواهند بود. مدل سه‌بعدی موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمخوری با تکرار هریک از قسمت‌های متحرک و ثابت به تعداد مورد نظر به دست خواهد آمد. نمای دوار موتور در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده که در آن‌ها، ۱/۴ استاتور و روتور مشخص شده است.



شکل (۳): نمای سه‌بعدی از موتور زمانی که روتور در حالت هم‌راستا



شکل (۴): نمای سه‌بعدی موتور زمانی که روتور در حالت غیر هم‌راستا

تعداد روتور و استاتور بر روی گشتاور موتور و عملکرد آن تأثیر خواهد گذاشت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که موتور بهینه‌سازی‌شده با تعداد استاتور و روتور ۱۲ به ۱۴ دارای بیشترین نیوتن متر بر کیلوگرم در مقایسه با سایر موتورهای مشابه بوده است [۹].

جدول (۱): علامت اختصاری پارامترها	
پارامتر	علامت اختصاری
تعداد دور فازها	$N_{ph}$
تعداد کویل در هر فاز	$N_C$
یک عدد صحیح مثبت	$X$
تعداد بخش‌های استاتور	$N_{seg, str}$
تعداد بخش‌های روتور	$N_{seg, rtr}$
اندوکتانس خودی هر فاز در موقعیت هم‌راستا	$L_a$
اندوکتانس خودی هر فاز در موقعیت غیر هم‌راستا	$L_u$
زاویه حرکت	$\epsilon$
ناحیه همپوشانی بین بخش‌های روتور و استاتور	$A_{ovl}$
چگالی شار متوسط فاصله هوایی در موقعیت هم‌راستا	$B_g$
انرژی ذخیره‌شده در میدان	$W_f$
گشتاور متوسط	$T_{avg}$
جریان فاز	$I_{ph}$
گشتاور لحظه‌ای	$T_{inst}$
شار فاز در حالت هم‌راستا	$\phi_a$
شار فاز در حالت غیر هم‌راستا	$\phi_u$
طول فاصله هوایی	$L_g$
طول فعال هسته	$L_{act}$
قطر متوسط هسته	$D_{avg}$
اختلاف اندوکتانس	$\Delta L$
قطر بیرونی	$D_o$
قطر داخلی	$D_i$
ضریب کف شکاف	SOP
گام قطب روتور	RPP
قوس قطب روتور	RPA

در این مقاله، یک مدل ۳ فاز، به همراه جزئیات کامل بخش‌های روتور، استاتور مدولار موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمخوری ارائه شده است. برای آنالیز کردن موتور مورد نظر از روش المان محدود (FEM) بهره گرفته شده است. برای آنالیز استاتیک و تحلیل گذرا می‌توان از مدل سه‌بعدی استفاده کرد. برای گام بعدی، ساختار پیشنهادی با افزایش تعداد بخش‌های روتور به نسبت تعداد ماژول‌های استاتور اصلاح شده و همچنین شکل نوک باریک ماژول استاتور نیز اصلاح شده است. بهبود مسیر شار برای مکان‌های مختلف روتور به‌وسیله جلوگیری از رخ دادن اشباع‌های محلی در نوک باریک ماژول استاتور صورت گرفته است. علاوه بر این، این ساختار جدید منجر به کاهش قابل توجه وزن آهن هسته به‌ویژه در استاتور می‌شود؛ زیرا بخش عمده‌ای از تلفات آهنی در این قسمت آشکار خواهد شد. این کار گشتاور خروجی موتور را که یکی

برخی از ترکیباتی که قابلیت ساخته شدن دارند عبارت‌اند از: ۱۲/۱۰، ۱۲/۱۴، ۱۸/۱۵، ۱۸/۲۱ [۱۵]. در این مقاله، موتور ۱۲/۱۴ برای مقایسه با موتور مرجع STW انتخاب شده است. تصمیم‌گیری درباره ترکیبات مناسب برای موتور به عملکردی که برای ماشین تعریف شده، وابسته است.

## ۲.۲. معادلات گشتاور خروجی

روش استخراج گشتاور خروجی برای موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شارمحوری در [۱۶] و [۱۷] ارائه شده است. روش‌های مشابه را نیز می‌توان برای موتور مورد نظر استفاده قرار داد. گشتاور متوسط گسترش یافته به وسیله موتورهای غیراشباع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{avg} = \frac{1}{2} I_{ph}^2 \frac{\Delta L}{\epsilon} = \frac{1}{2} I_{ph}^2 \frac{(L_a - L_u)}{\epsilon} \quad (2)$$

معادله گشتاور عبارت است از:

$$\epsilon * T_{avg} = \frac{1}{2} I_{ph}^2 L_a k \quad (3)$$

که در رابطه بالا  $k$  به صورت  $(1-L_u)/L_a$  است. برای موتور مورد نظر نیز  $L_a$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_a = \frac{4B_g A_{ovl} N_{ph}}{I_{ph}} \quad (4)$$

گشتاور متوسط را می‌توان به صورت زیر معرفی کرد:

$$T_{avg} = \frac{1}{4} I_{ph} N_{ph} B_g K (D_o^2 - D_i^2) \quad (5)$$

در این رابطه،  $D_{avg} = (D_o + D_i)/2$  قطر متوسط و  $L_{act} = (D_o - D_i)$  طول فعال هسته‌اند. گشتاور متوسط موتور مورد نظر به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$T_{avg} = \frac{1}{2} I_{ph} N_{ph} B_g K D_{avg} L_{act} \quad (6)$$

در نتیجه، چگالی شار متوسط فاصله هوایی در حالت هم‌راستا به صورت زیر است [۱۸]:

$$B_g = \frac{N_{ph} I_{ph} \mu_0}{8l_g} \quad (7)$$

## ۳.۲. بهسازی و اصلاح ساختار موتور

همان طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، تعداد بخش‌های روتور از تعداد قطب‌های استاتور بیشتر است که می‌تواند ظرفیت گشتاور تولیدی موتور را بهبود بخشد. برای این بخش ترکیب ۱۴/۱۲ انتخاب شده است. برای موتور پیشنهادشده، پهنای استاتور و کمان قطب

قسمت‌های مختلف شماره‌گذاری شده در شکل (۳) به ترتیب نشانگر موارد زیر هستند.

• شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب مازول روتور؛ آهنربا، پوشش روتور. این موتور به عنوان یک موتور سوئیچ رلوکتانسی شارمحوری در نظر گرفته می‌شود. مسیر شار که در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است، هر دو حالت قرارگیری روتور به صورت هم‌راستا و غیر هم‌راستا را نشان می‌دهد. همان گونه که ذکر شد، مسیر شار تا جایی که ممکن بوده کوتاه شده است و استاتور شارهای موجود را تا جای ممکن از خود عبور می‌دهد؛ در نتیجه تلفات هسته پایین خواهد آمد. پارامترهای ژئومتریک موتور در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): تعریف پارامترهای هندسی موتور شکل (۲)

پارامتر	نشانه	مقدار
Stator Pole Pitch	SPP	۳۶۰/Ns
Rotor Pole Pitch	RPP	۳۶۰/Nr
Rotor Pole Arc	RPA	C*RPP
Stator Wide Pole Arc	SPA_W	C*RPP
Stator Narrow Pole Arc	SPA_N	2*(SPP-RPP)+SPA_W
Slot Opening	SOP	RPP*(1-C)
Stator Wide Pole Width	SPW_W	از طراحی
Stator Narrow Pole Width	SPW_N	از طراحی
Length of Air-gap	L_AG	از طراحی
Width of Stator Pole Tip	W_SPT	از طراحی
Length of Stator Pole Base Part	L_SBP	از طراحی

فرمول‌های ارائه شده را می‌توان به راحتی از روی شکل نیز استخراج کرد. پارامتر  $C$  به صورت ضریب کف شکاف تعریف می‌شود و نسبت قوس قطب روتور به گام قطب روتور را اندازه می‌گیرد. استاتور و روتور به بخش‌های مختلف تقسیم شده‌اند و برای بسته شدن مسیر شار به آهن نیازی ندارند. در واقع، مازول استاتور روی یک شفت کاربردی خاص نصب شده است. نواحی اتصال برای مازول استاتور، دو سطح از مازول شعاعی داخلی است که ورقه ورقه شده است. بخش‌های روتور به وسیله دیسک جامد با مواد غیرمغناطیسی پوشیده شده است. دو روتور به صورت یک محفظه بسته به دور استاتور به یکدیگر متصل‌اند. استاتور روی یک شفت ثابت توخالی محکم شده است که پایه‌های سیم‌پیچ‌های مورد نیاز را می‌توان از این طریق به دست آورد.

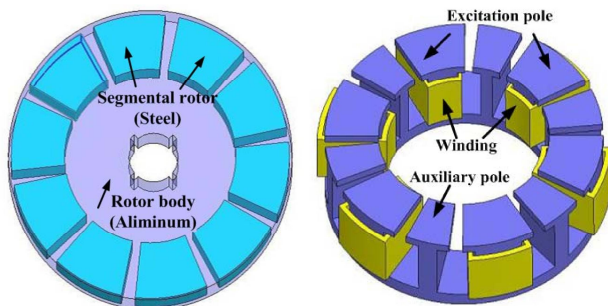
ترکیب معتبری از تعداد مازول استاتور و بخش‌های روتور به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} N_{seg.sttr} &= N_{ph} X N_c \\ N_{seg.rtr} &= (N_{ph} X \pm 1) N_c \end{aligned} \quad (1)$$

می‌توان مشاهده کرد که مازول‌های باریک استاتور دارای قوس پهن‌تری هستند که باعث ایجاد زاویه نوک قطب بسیار تیزی خواهد شد که در آن مسیر شار تنگ‌تر باعث افزایش رلوکتانس در حالت‌های مختلف روتور می‌شود. در نتیجه گشتاور کمتری برای MMF فازها به دست خواهد آمد. بنابراین نیاز است که برای فراهم کردن یک مسیر شار با پهنای مناسب، شکل تیز قطب‌های باریک اصلاح شود. با این کار از اشباع‌های عمیق محلی جلوگیری به عمل می‌آید. در این راستا، ارتفاع نوک قطب باید با پهنای قطب باریک استاتور اولین لایه از صفحه محاسبه شده که در شعاع داخلی موتور است، برابر باشد که با ضخامت بخش‌های روتور برابر است.

پهنای مازول استاتور و طول محوری موتور به روشی انتخاب می‌شود که فضا برای کویل‌ها در هر سه موتور بدون تغییر نگه داشته شود و چگالی شار قسمت‌های مختلف هسته مقدار معقولی باشد. سپس تعداد دور کویل هر فاز طراحی می‌شود، به طوری که مقاومت فاز برای هر سه موتور به صورت یکسانی به دست بیاید. در واقع مقایسه بر اساس تلفات مسی یکسان بین هر سه موتور صورت خواهد گرفت.

ساختار موتور STW همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، هسته‌های استاتور و روتور به شکل فولاد چندلایه دارد و دندان‌های استاتور به دو بخش تقسیم شده است که دو برابر عرض دندان‌های تحریک هستند و برای اتصال مسیر شار مدار استفاده می‌شوند. همچنین بخش روتور از یک سری قطعه‌ها ساخته شده که داخل بدنه آن‌ها آلومینیوم تعبیه شده است. شکل (۵) مدل سه‌بعدی موتور STW را نشان می‌دهد.



شکل (۵): ساختار مدل سه‌بعدی موتور STW

جدول (۳) جزئیات هندسی و الکتریکی هر سه موتور را نشان می‌دهد. مدل دوبعدی خطی شده اصلاح شده در نتایج شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. گفتنی است که موتور هدف و موتور اصلاح شده هدف به صورت یک ارزیابی اولیه در این مقاله قرار گرفته‌اند و در حالت بهینه قرار ندارند.

باریک مشابه مشخصات موتور STW انتخاب شده است [۱۹]. این کار باعث می‌شود که مقایسه عملکرد دو موتور فقط به توپولوژی آن‌ها وابسته شود؛ زیرا تأثیر این پارامترهای هندسی از بین رفته است. این پارامترها به ضریب C (ضریب کف شکاف) وابسته است. ضریب روی گشتاور خروجی، به عنوان عملکرد اصلی موتور بررسی شود. گشتاور لحظه‌ای هر یک از فازهای موتور سوئیچ رلوکتانسی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{inst} = N_{ph} I_{pk} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \quad (8)$$

تأثیر بخش دوم معادله به دلیل اینکه اشباع عمیق در موتور سوئیچ رلوکتانس نادیده گرفته شده، کوچک است. بنابراین گشتاور متوسط موتور در طول یک حرکت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{avg} = \frac{1}{\varepsilon} N_{ph} I_{pk} \varphi_a \left(1 - \frac{\varphi_u}{\varphi_a}\right) \quad (9)$$

$\varphi_a$  را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\varphi_a = B_g A_{ovl} \quad (10)$$

که  $A_{ovl}$  سطح همپوشانی بخش روتور و مازول استاتور در حالت هم‌راستایی است. این سطح همپوشانی می‌توان را به صورت زیر بیان کرد:

$$A_{ovl} = \left(\frac{D_o - D_i}{2}\right) \left(\frac{D_o + D_i}{4}\right) \left(\frac{RPA - SOP}{2}\right) \quad (11)$$

اگر ضریب  $C = RPA/SOP$  در معادله جایگزین شود، فرمول زیر حاصل خواهد شد.

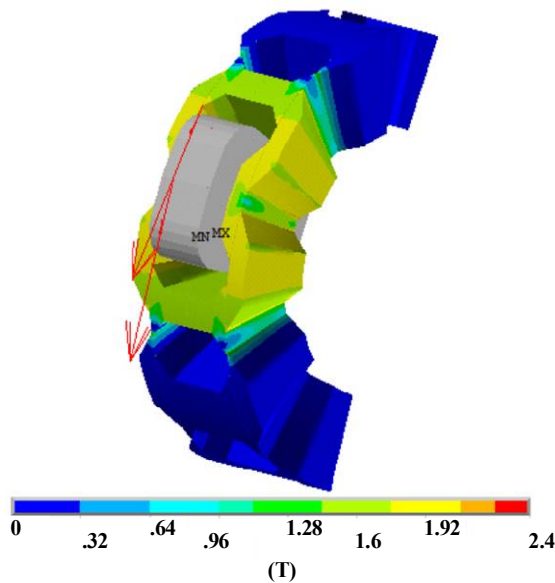
$$A_{ovl} = \left(\frac{D_o^2 - D_i^2}{16}\right) (2C - 1) RPP \quad (12)$$

با توجه به جایگذاری صورت گرفته در نهایت می‌توان معادله گشتاور متوسط را به صورت زیر بیان کرد.

$$T_{avg} = N_{ph} I_{pk} B_g \left(\frac{D_o^2 - D_i^2}{16}\right) (2C - 1) \left(1 - \frac{\varphi_u}{\varphi_a}\right) \quad (13)$$

این معادله نشان می‌دهد که گشتاور متوسط موتور با افزایش ضریب C بیشتر خواهد شد. شایان ذکر است که  $\varphi_u$  یک تابع غیرخطی از ضریب C است. بنابراین برای تعیین کردن تغییرات گشتاور که تابعی از ضریب C است، باید از روش FEA بهره گرفته شود. کاملاً منطقی است برای آنکه تأثیرات ضریب C روی مقایسه موتوره‌های مورد نظر از بین برود، ضریب یکسانی را برای آن‌ها در نظر بگیریم. ضریب C برای موتور STW که موتور مرجع است، برابر ۰/۸۴۷ در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) نیز برای موتور با ترکیب ۱۲/۱۴ مقدار ضریب C، ۰/۸۴۷ در نظر گرفته شده بود.





شکل (۶): نمای سه‌بعدی موتور مورد نظر با چگالی شار مغناطیسی آن

در جدول (۴) می‌توان مقادیر وزن و گشتاوری را مشاهده کرد که موتورها در حالتی که ۳۰۰ وات تلفات مسی دارند. سایر پارامترهای دیگر نیز برای این سه موتور با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول (۴): مقایسه وزن و گشتاور هر سه موتور

پارامترها	موتور STW	موتور پیشنهاد شده	موتور اصلاح شده
جرم آهن استاتور (kg)	۹/۲۳	۴/۳۷	۳/۴۳
جرم آهن روتور (kg)	۲/۴۶	۲/۲۶	۱/۷۹
کل جرم آهن (kg)	۱۱/۶۹	۶/۶۳	۵/۲۲
جرم مس (kg)	۲/۱۶	۲/۱۶	۲/۱۶
مجموع جرم فعال (kg)	۱۳/۸۵	۸/۷۹	۷/۳۸
میانگین گشتاور (Nm)	۲۶/۵	۲۶/۲۶	۲۶/۲
تلفات مس 300W			
گشتاور در واحد جرم فعال (Nm/kg)	۱/۹۱	۲/۹۹	۳/۵۵

### ۳. الگوریتم شبیه‌سازی

#### ۱.۳. پارامترهای هندسی اصلاح شده

با توجه به تغییری که در ساختار استاتور موتور انجام شده است، برخی پارامترهای آن نیز دچار تغییر و اصلاح شده‌اند. این موتور همانند موتور اصلی به صورت ۱۲/۱۴ است و به جای استفاده از یک کوئیل با تعداد ۵۴۸ دور سیم‌پیچ از دو کوئیل با تعداد ۲۷۴ دور سیم‌پیچ استفاده شده که یکی از این دو کوئیل در قسمت بالای یوغ استاتور و دیگری در قسمت پایین یوغ قرار گرفته است.

جدول (۳): مقایسه پارامترهای هندسی و مشخصات الکتریکی سه موتور

پارامترها	موتور STW	موتور پیشنهاد شده	موتور اصلاح شده
تعداد قطب استاتور/ماژول	۱۲	۱۲	۱۲
تعداد قطعات روتور	۱۰	۱۰	۱۴
تعداد فازها	۳	۳	۳
قطر بیرونی ورقه $D_o$ (mm)	۱۵۰	۲۱۶/۲	۲۱۶/۲
طول محوری ماده فعال L (mm)	۱۵۰	۶۳/۸	۵۳/۸
طول فاصله هوایی (mm)	۰/۳	۰/۳	۰/۳
قطر حفره/متوسط قطر هوا (mm)	۹۰/۸	۱۷۰/۶	۱۷۰/۶
گام قوس ماژول پهن استاتور (deg.)	۳۰/۵	۳۰/۵	۲۱/۸
گام قوس ماژول باریک استاتور (deg.)	۱۸/۵	۱۸/۵	۳۰/۴
گام قطعه رتور (deg)	۳۰/۵	۳۰/۵	۲۱/۸
تعداد چرخش در هر فاز	۲۷۰	۵۴۸	۵۴۸
مقاومت فاز $20^{\circ}C$ ( $\Omega$ )	۲/۵۶	۲/۵۷	۲/۵۷
ضریب کف شکاف (%)	۴۱	۴۱	۴۱
تخمین طول چرخش (mm)	۴۳۵	۲۱۴	۲۱۴
پایان سیم‌پیچی در هر دور چرخش (mm)	۱۳۵	۱۲۳	۱۲۳
قطر سیم مؤثر (mm)	۱	۱	۱
موتور $D_0^2 * L$ ( $mm^3$ )	۳۳۷۵۰۰۶	۲/۹۸۶۰۰۶	۲/۵۱۵۰۰۶
جنس هسته	M۳۵-۲۷۰	M۳۵-۲۷۰	M۳۵-۲۷۰

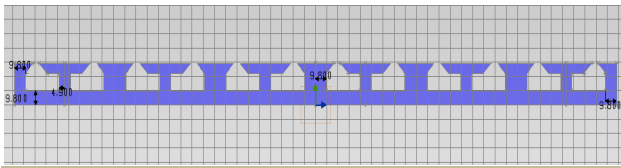
### ۴.۲. نتایج شبیه‌سازی

از نقطه نظر شبیه‌سازی سه‌بعدی، موتور سوئیچ رلکتانس را می‌توان ترکیبی از چند ماشین خطی در نظر گرفت. عملکرد کلی ماشین از مجموع عملکردهای ماشین‌های خطی منحصر به فرد حاصل می‌شود. بر اساس پروسه معرفی شده در مرجع [۲۰] مدل سه‌بعدی موتور پیشنهادی در پنج سطح محاسبات مدل شده و بر اساس همین روش که در مرجع نیز وجود دارد، شبیه‌سازی نیز شده است.

نمای سه‌بعدی طرح‌های سایه‌دار چگالی شار مغناطیسی در وسط روتور در شکل (۶) نمایش داده شده است. در شکل (۵) فقط مواد اکتیو بخش‌های موتور نشان داده شده است.

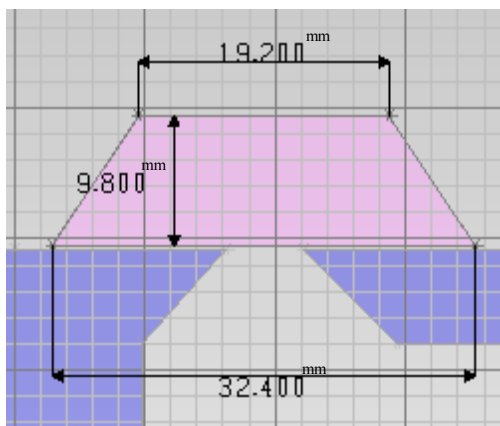
مدل سه‌بعدی موتور مورد نظر اصلاح شده بر اساس توضیحات بخش‌های قبل به دست می‌آید. می‌توان توزیع شار مغناطیسی برای لایه میانی با روش سه‌بعدی را برای دو حالت هم‌راستا و غیر هم‌راستا مورد بررسی قرار داد. در واقع می‌توان بیان کرد که اصلاح نوک قطب‌های باریک استاتور باعث شده که مسیر بدون تغییر پهنای برای شار مغناطیسی فراهم شود.

در نتیجه با استفاده از دستورات گفته شده می توان شکل نهایی نیمی از موتور را به صورت زیر به دست آورد.



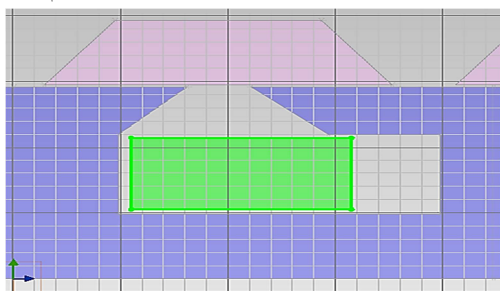
شکل (۹): ترسیم نیمی از موتور در نرم افزار

ترسیم استاتور در شکل (۹) نشان داده شده و پس از آن نیاز است که قسمت های دیگر نیز به ترتیب ترسیم شوند تا شبیه سازی دوبعدی موتور مورد نظر به دست بیاید. در مرحله دوم، ترسیم موتور پارامترهای مورد نیاز روتور از جدول (۵) استخراج شده و در نرم افزار ترسیم گردیده است. مشخصات مورد نیاز برای ترسیم روتور نیز در شکل نشان داده شده است.



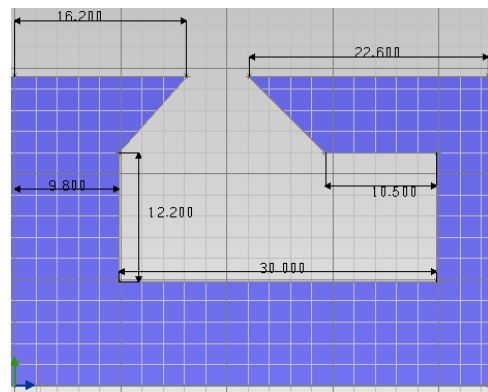
شکل (۱۰): ترسیم یکی از بخش های روتور و مشخصات آن

با توجه به آنکه تعداد قطعه های روتور در این موتور برابر با ۱۴ می باشد برای به دست آوردن همه آنها از دستور Linear Pattern استفاده شده است. پس از کامل شدن ترسیم روتورها، باید کوپل ها را در میان ماژول های باریک و پهن استاتور رسم کرد. پس از کامل شدن ترسیم روتورها، باید کوپل ها را در میان ماژول های باریک و پهن استاتور که از ترکیب شکل های (۸)، (۹) و (۱۰) به دست آمده است، رسم کرد.



شکل (۱۱): کوپل های موتور بین ماژول های باریک و پهن استاتور

در نهایت با ترسیم هر سه بخش استاتور، روتور و کوپل می توان شکل موتور را به دست آورد که در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۸): پارامترهای هندسی موتور اصلاح شده

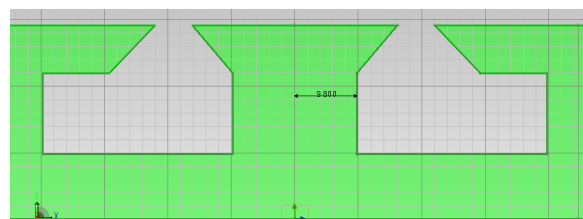
همان طور که در جدول (۵) نیز مشخص است، پهنای یوغی که برای استاتور استفاده شده، برابر با پهنای بخش پهن استاتور (۱۹/۶ میلی متر) است. باید توجه داشت که با توجه به تغییراتی که در موتور به وجود آمد و یوغ اضافه شد، در سایر پارامترها نیز تغییراتی صورت گرفته است.

جدول (۵): پارامترهای هندسی مورد نظر با اصلاحات صورت گرفته

پارامتر	نشانه	مقدار
Stator Pole Pitch	SPP	۴۴/۷ mm
Rotor Pole Pitch	RPP	۴۹/۶ mm
Rotor Pole Arc	RPA	۳۲/۴ mm
Stator Wide Pole Arc	SPA_W	۳۲/۴ mm
Stator Narrow Pole Arc	SPA_N	۴۵/۴ mm
Slot Opening	SOP	۵/۹ mm
Stator Wide Pole Width	SPW_W	۱۹/۲ mm
Stator Narrow Pole Width	SPW_N	۹/۸ mm
Length of Air-gap	L_AG	۰/۳ mm
Width of Stator Pole Tip	W_SPT	۷/۲ mm
Length of Stator Pole Base Part	L_SBP	۴۴ mm

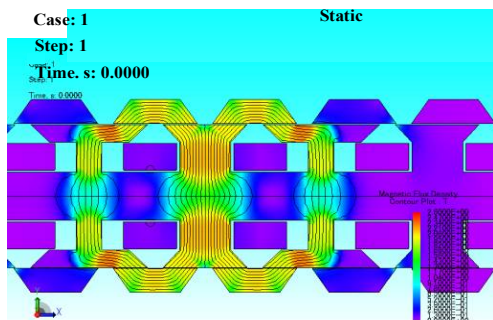
### ۱.۳. روند شبیه سازی و تحلیل نتایج

ابتدای امر برای انجام شبیه سازی در نرم افزار نیاز به ترسیم پارامترهای هندسی موتور می باشد؛ به همین دلیل موتور را در راستای افقی به دو قسمت تقسیم کرده تا ترسیم آن ساده تر شود. ابتدا یکی از بخش های موتور ترسیم شده و با استفاده از دستورات Mirror و Linear pattern کامل شده است.

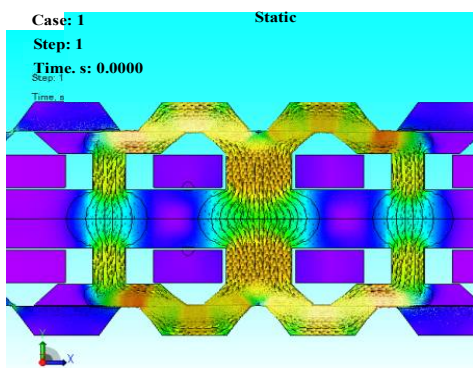


شکل (۸): ترسیم یکی از بخش های موتور و استفاده از Mirror برای کامل کردن آن

که در فاز A از طریق رنگ‌های زرد و سبز جریان دارند، نیز در زیر مشخص شده است. مقدار مینیمم و ماکزیمم در شکل (۱۵) با توجه به میزان حرارت مشخص شده در شکل تعیین شده است.

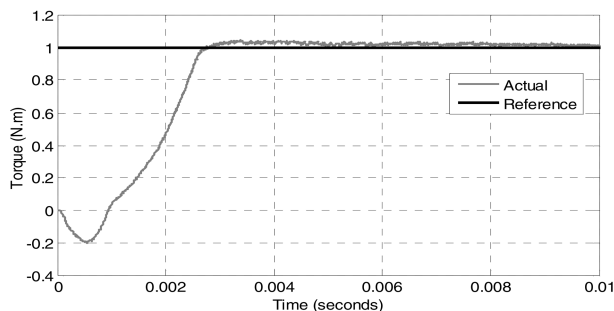


شکل (۱۵): خطوط شار مغناطیسی یک‌فاز



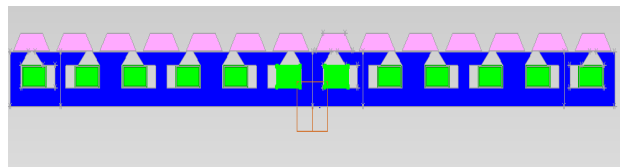
شکل (۱۶): توزیع چگالی و مسیر

شکل (۱۵) نحوه توزیع چگالی شار از طریق مسیرهای مشخص را که در شکل (۱۴) مشخص شده نشان می‌دهد. نحوه توزیع چگالی شار در این شکل‌ها بدین صورت است که هر چقدر فاصله لبه روتور از لبه استاتور بیشتر باشد، چگالی شار افزایش می‌یابد. یکی از خروجی‌های اصلی لازم برای موتور اصلاح‌شده، گشتاور تولیدی موتور است. با توجه به اینکه موتور شبیه‌سازی شده قادر به ارائه گشتاور به صورت مستقیم نیست، ابتدا مقدار نیروی آن در راستای محور X به دست آمده، سپس در مقدار شعاع میانگین ضرب شده است که به این ترتیب می‌توان مقدار گشتاور را به دست آورد (شکل ۱۵).



شکل (۱۷): گشتاور موتور اصلاح‌شده برحسب جابه‌جایی

این شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد سرعت پایین سیستم کنترل

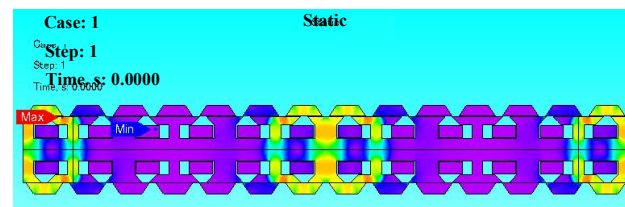


شکل (۱۲): نمای دوبعدی از موتور اصلاح‌شده به صورت خطی

پس از شبیه‌سازی کامل موتور، حال نوبت آن است که تنظیمات مربوط به شبیه‌سازی را به نرم افزار داد. پس از آنکه تنظیمات مربوط به هر یک از قسمت‌ها از جمله سرعت، جریان، تعداد دور کوئل‌ها و... وارد شدند، می‌توان موتور را در دو حالت استاتیک و دینامیک مورد تحلیل قرار داد. برای این کار ابتدا شبیه‌سازی استاتیک صورت گرفته است.

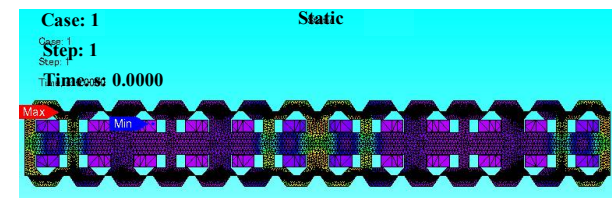
### ۲.۳. شبیه‌سازی به روش المان محدود در حالت استاتیک

در این شبیه‌سازی ابتدا یکی از فازهای موتور جریان خواهد داشت و تحلیل‌ها و نمودارهای مربوط بر اساس آن صورت خواهد گرفت.



شکل (۱۳): توزیع چگالی شار موتور

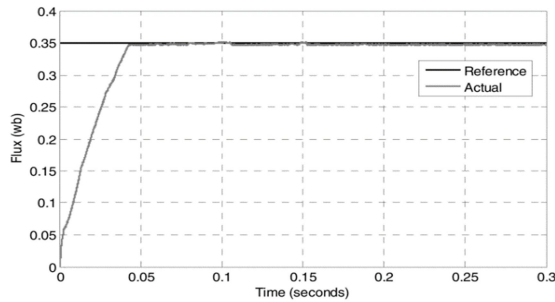
با توجه به شکل (۱۳) و (۱۴) فاز تحریک‌شده A دارای شار مغناطیسی در مسیر هم‌راستایی برای به حرکت درآوردن روتور است. با افزایش میزان هم‌پوشانی روتور و دندانه‌های استاتور چگالی شار بیشتری از مسیر تعیین‌شده بیشتر خواهد شد؛ به طوری که در دندانه‌های استاتور فاز A دامنه چگالی شار به میزان ۱/۴۷۴ تسلا می‌باشد و در فازهای دیگر B و C در حدود ۰/۰۸۷ تسلا می‌باشد که این اختلاف چگالی شار بین فازهای هم‌راستا و ناهم‌راستا قدرت عامل برای ایجاد گشتاور را نتیجه می‌دهد.



شکل (۱۴): نحوه مش‌بندی موتور اصلاح‌شده

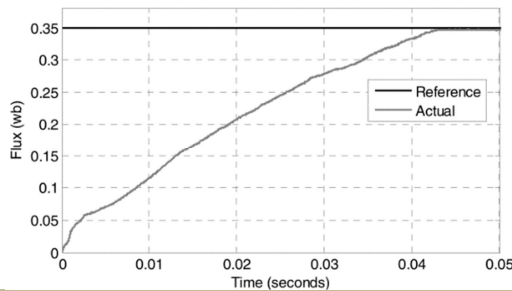
همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است، مش‌های استاتور به نسبت روتور بزرگ‌ترند. مش‌بندی در نزدیکی فاصله هوایی بسیار ریز انتخاب شده‌اند تا تحلیل دقیق‌تری صورت بگیرد. برای آنکه بتوان موتور را شبیه‌سازی نمود نیاز است که قسمت‌های مختلف موتور مش‌بندی شوند تا تحلیل استاتیک آن به درستی صورت بگیرد. مقدار خطوط شار





شکل (۲۱): موج شار استاتور بر اساس باند هیستریز

بر اساس شکل (۲۰)، موتور اصلاح شده پیشنهادی کاهش قابل توجهی در موج شار استاتور را نشان می‌دهد. حداکثر مقدار ریپل گشتاور موج شار استاتور کمتر از ۰/۰۵ و بر اساس باند هیستریز مشخص شده است. از آنجایی که جریان شار استاتور یک پارامتر الکتریکی است، کاهش موج آن به این معنی است که هارمونیک‌های فرکانس بالا جریان ورودی موتور کاهش می‌یابد.



شکل (۲۲): نمای بسته از ردیابی مسیر شار SRM

همان طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، موتور پیشنهادی می‌تواند مرجع شار را در کمتر از ۰/۰۴۵ دنبال کند. جدول (۶) عملکرد موتورهای شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. درحالی‌که موتور پیشنهاد شده و اصلاح شده درصد کمتری از جرم مواد فعال استفاده می‌کند، این موتورها از لحاظ تولید گشتاور و نقاط کارایی عملکرد تقریباً یکسان دارند. شایان ذکر است که نقطه عملکرد انتخاب شده لزوماً نقطه‌ای نیست که موتورها در حداکثر کارایی عمل کنند.

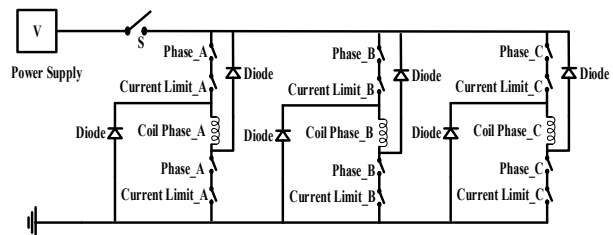
جدول (۶): مقایسه عملکرد موتورها

پارامترها	موتور STW	موتور پیشنهاد شده	موتور پیشنهادی اصلاح شده
سرعت (rpm)	۵۸۶	۵۸۶	۵۸۶
گشتاور (Nm)	۲۸/۹	۲۸/۳	۲۹/۱
تلفات آهن استاتور (W)	۶۹	۶/۶۳	۵/۲۲
تلفات آهن روتور (W)	۱۴/۵	۲/۱۶	۲/۱۶
مجموع تلفات آهن (W)	۷۳/۵	۴۹/۸	۶۰
تلفات مس (W)	۳۰۷	۳۱۵	۳۰۷
مجموع تلفات (W)	۳۸۰/۵	۳۶۵	۳۶۷
راندمان (%)	۸۲/۳	۸۲/۶	۸۲/۹

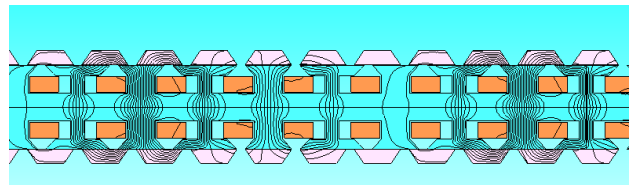
انجام شده است. همان طور که در شکل (۱۷) نشان داده شده است، یک اعوجاج نامطلوب بزرگ در دوره گذرا  $t = 0$  تا  $t = 0.03$  ثانیه در گشتاور خروجی رخ می‌دهد و پس از یک دوره کوتاه گذرا، مقدار مرجع را دنبال می‌کند.

### ۳.۳. شبیه‌سازی به روش المان محدود در حالت دینامیکی

برخلاف شبیه‌سازی استاتیکی، در حالت دینامیکی نیاز است که همه کوپل‌های مربوط به هر سه فاز تحریک شوند تا شبیه‌سازی مناسب‌تری حاصل شود. مراحل شبیه‌سازی دینامیکی همانند شبیه‌سازی استاتیکی است با این تفاوت که مدار الکتریکی این دو با یکدیگر متفاوت است.

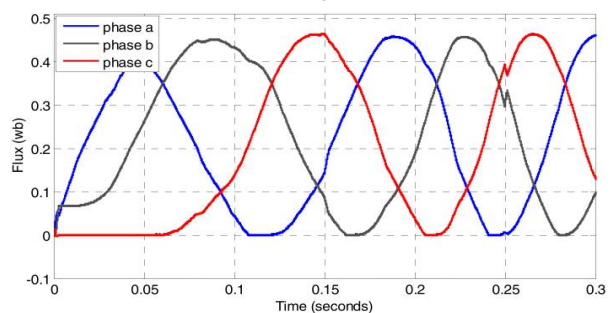


شکل (۱۸): درایو پیاده‌سازی شده برای موتور



شکل (۱۹): توزیع خطوط شار

همان گونه که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود، در هر لحظه دو فاز تحریک شده و خطوط شار آن‌ها در شکل (۱۹) مشخص است که با حرکت روتور در طول محور X این فازها هر لحظه دچار تغییر خواهند شد. شار مغناطیسی هر سه فاز با توجه به تعداد کوپل‌ها و تعداد دور هریک از آن‌ها در شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شکل (۲۰): شار مغناطیسی مربوط به هر سه فاز

شار مغناطیسی مربوط به هر سه فاز در شکل (۱۴) نشان داده شده است. به دلیل تغییرات گام در مقدار مرجع گشتاور موتور، دو اغتشاش اصلی در  $t = 0.15$  ثانیه و  $t = 0.25$  ثانیه وجود دارد.

نتایج دوبعدی و سه‌بعدی صورت پذیرفته است. سپس موتور پیشنهادی با افزایش تعداد بخش‌های روتور و تغییر شکل استاتور اصلاح شده است. موتور پیشنهادی و موتور پیشنهادی اصلاح‌شده از جرم مواد اکتیو کمتر استفاده می‌کنند. موتور پیشنهادی اصلاح‌شده گشتاور بسیار بالا در هر نرخ جرم ماده اکتیو را نشان می‌دهد (۳/۵۵ Nm/kg). موتور پیشنهادی چگالی بیشتری نسبت به موتور معمول (STW) دارد. ساختار پیشنهادی دارای پتانسیل بالایی برای وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) و وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی (HEVs) است.

پارامترها	نماد	مقدار
ماژول استاتور / بخش روتور	$N_s/N_r$	۱۲/۱۴
ولتاژ منبع تغذیه (V)	V	۵۶۰
حداکثر جریان فاز، A	$I_{ph,m}$	۱۰
توان (KW)	$P_n$	۴
سرعت پایه (rpm)	w	۱۳۰۰

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، موتور شارمحور سوئیچ رلوکتانسی با استاتور مدولار با چگالی گشتاور بالا ارائه شده است. تحلیل استاتیک موتور با استفاده از

#### مراجع

- [1] Ling, X., Li, B., and et. al., "Simulation of Switched Reluctance Motor Drive System Based on Multi-Physics Modeling Method", in IEEE Access, Vol. 5, pp. 26184-26189, 2017.
- [2] Santos, F., Anthonis, J., Naclerio, F., "Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 1, pp. 469-476, 2014.
- [3] Hu, Y., Gan, C., H. Wen, "Modular Tri-Port High-Power Converter for SRM Based Plug-in Hybrid Electrical Trucks", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 4, pp. 3247-3257, 2018.
- [4] Sun, Q., Wu, J., Guo, J., "A New Phase Current Reconstruction Scheme for Four-Phase SRM Drives Using Improved Converter Topology without Voltage Penalty", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 1, pp. 133-144, 2018.
- [5] Ye, J., Malysz P., Emadi, A., "A Fixed-Switching-Frequency Integral Sliding Mode Current Controller for Switched Reluctance Motor Drives", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 2, pp. 381-394, 2015.
- [6] Li, X., Shamsi, P., "Inductance Surface Learning for Model Predictive Current Control of Switched Reluctance Motors", in IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 1, No. 3, pp. 287-297, 2015.
- [7] فرهادی قریبه، حامد، صادقی یزدانخواه، احمد، عزیزیان، محمدرضا، «بهبود بازده انرژی و ارزیابی اقتصادی موتورسیکلت الکتریکی با حضور موتور چهار فاز AFPM و ترکیب ابرخازن و باتری»، مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۳۷-۲۴، ۱۳۹۲.
- [8] Xue, D., Cheng, K., Bao, Y., Cheung, N., "Switched Reluctance Generators with Hybrid Magnetic Paths for Wind Power Generation", in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 11, pp. 3863-3866, 2012.
- [9] Mecrow, B., El-Kharashi, E., Jack, A., "Preliminary Performance Evaluation of Switched Reluctance Motors with Segmental Rotors", in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 679-686, 2004.
- [10] Y. Pang, Y., and et. al., "Eddy Current Loss in the Frame of a Flux-Switching Permanent Magnet Machine", in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, pp. 3413-3415, 2006.
- [11] Yang, Z., Shang, F., Brown, I., Krishnamurthy, M., "Comparative Study of Interior Permanent Magnet Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications", in IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 1, No. 3, pp. 245-254, 2015.
- [12] Dorrell, D., and et. al., "Comparison of Different Motor Design Drives for Hybrid Electric Vehicles", in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Vol. 11, No. 4, pp. 3352-3359, 2010.
- [13] Desai, P. C., and et. al., "Novel Switched Reluctance Machine Configuration with Higher Number of Rotor Poles than Stator Poles: Concept to Implementation", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, pp. 649-659, 2010.
- [14] Neudorfer, H., Wicker, N., Binder, A., "Comparison of Three Different Electric Powertrains for the Use in Hybrid Electric Vehicles", in 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Vol. 95, No. 4, pp. 510-514, 2008.
- [15] Ye, J., Malysz P., Emadi, A., "A Fixed-Switching-Frequency Integral Sliding Mode Current Controller for Switched Reluctance Motor Drives", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 2, pp. 381-394, 2015.
- [16] Madhavan, R., Fernandes, B., "Axial Flux Segmented SRM with a Higher Number of Rotor Segments for Electric Vehicles", in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 28, No. 1, pp. 203-213, 2013.
- [17] Madhavan, R., Fernandes, B., "A novel axial flux segmented SRM for electric vehicle application", The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, pp. 1-6.
- [18] Peng, F., Ye, J., Emadi, A., Huang, Y., "Position Sensorless Control of Switched Reluctance Motor Drives Based on Numerical Method", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 3, pp. 2159-2168, 2017.
- [19] Widmer, J. D., Mecrow, B. C., "Optimized Segmental Rotor Switched Reluctance Machines with a Greater Number of Rotor Segments Than Stator Slots", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 4, pp. 1491-1498, 2013.
- [20] Loureiro, L., Filho, A., Zabadal, J., Homrich, R., "A Model of a Permanent Magnet Axial-Flux Machine Based on Lie's Symmetries", in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 4321-4324, 2008.