



[www.ElitesJournal.ir](http://www.ElitesJournal.ir)

مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

ISSN 2538-581X

جلد ۲- شماره ۱- سال ۱۳۹۶



## بررسی عملکرد، طراحی و مدلسازی موتور القایی تک فاز خازن دایم شار محوری با روش المان محدود

علی بوبه رژ

کارشناس ارشد مهندسی برق-قدرت دانشگاه صنعتی شاهرود

[aliboobehrej@gmail.com](mailto:aliboobehrej@gmail.com)

ارسال: اسفند ماه ۹۵ پذیرش: اردیبهشت ماه ۹۶

### خلاصه

با توجه به کاربرد روز افزون موتورهای شارمحوری و عدم وجود یک الگوریتم کامل طراحی به خصوص در مورد موتور تکفاز خازن دایم شارمحوری، یک الگوریتم جهت طراحی که شامل یافتن ابعاد قسمت های مختلف موتور و محاسبه پارامترهای الکتریکی مانند مقاومت ها و راکتانس ها و خازن می باشد، در این مقاله ارائه شده است. یک موتور القایی تک فاز شار محوری، که کاربرد قابل توجهی در سیستم های تهویه مطبوع دارد، مورد بررسی عملکردی قرار می گیرد. این بررسی عملکردی شامل آزمایش های DC، روتور قفل شده و بی باری، اندازه گیری پارامترهای مکانیکی مانند ممان اینرسی و مدلسازی حالت دائمی بوسیله روابط مدل حالت دائمی پیشنهادی موتور تکفاز خازن دایم شار محوری، محاسبه پارامترهای عملکردی موتور به ازای لغزش های مختلف و شبیه سازی حالت گذرا بوسیله روشهای مدلسازی مرسوم توسط نرم افزار سیمولینک متلب می باشد. در انتها روش اجزای محدود<sup>۱</sup> برای تایید الگوریتم طراحی، مدل حالت دائمی، مدل دینامیکی و نتایج آزمایش ها استفاده شده است.

کلمات کلیدی: موتور القایی شار محوری تکفاز، الگوریتم طراحی، مدل عملکردی حالت دائم، مدل عملکردی حالت گذرا، روش اجزای محدود.

### ۱. مقدمه

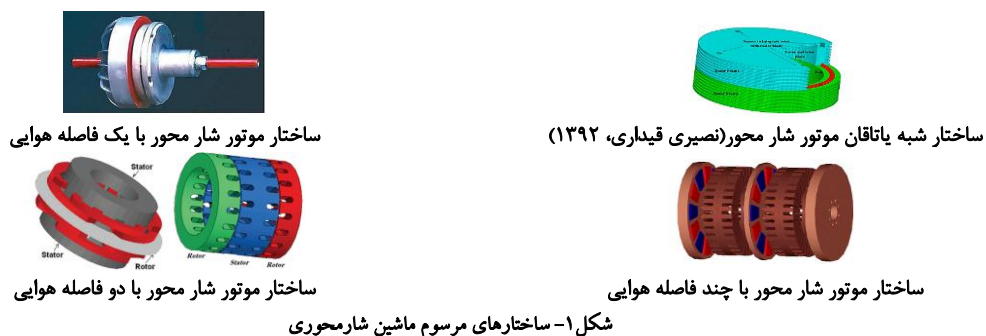
ماشین های شار محوری به دلیل مزایای منحصر به فرد خود در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. از جمله این ماشین ها می توان به ماشین القایی تک فاز شار محوری اشاره کرد. اخیرا قابلیت استفاده از این ماشین به عنوان جایگزین ماشین های استوانه ای القایی تک فاز و ماشین های یونیورسال در وسایل خانگی، سیستم های تهویه و سرمایش منازل، مورد توجه صنایع وابسته می باشد. این رویکرد از ویژگی های خاص ماشین های شار محوری از قبیل ساختار فشرده و قابلیت تنظیم فاصله هوایی بعداز طی فرایند ساخت و هنگام مونتاژ ناشی شده است. اخیرا تعداد محدودی از شرکت های داخلی اقدام به واردات این نوع ماشین ها و یا احیانا کپی سازی آنها می کنند. با توجه به اینکه تحقیقات انجام گرفته و یا منتشر شده در مورد ماشین های القایی شار محوری، به ویژه نوع تک فاز آن بسیار محدود و یا نادر می باشد، بنابراین، ضرورت تدوین الگوریتم طراحی و ارائه روش مدلسازی به منظور تحلیل عملکرد این نوع ماشین، قابل انکار نیست.

<sup>1</sup> Finite element method

ماشینهای شار محور (AFMs)<sup>۱</sup> یا دیسکی در سال ۱۸۲۱ توسط فاراده اختراع شد و به تدریج با اختراع ماشین های شار شعاعی (RFMs) در سال ۱۸۳۷ توسط داون پورت، کاربرد ماشین های شار محوری کاهش یافت (NasiriGheidari, 2012). کاربرد اکثر این ماشین ها به صورت موتوری است. در دهه های اخیر به دلیل گشتاور بالا در سرعت کم و همچنین چگالی توان بالا و بازده بالاتر نسبت به موتورهای شار شعاعی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته اند (سلیمانی و اجلالی، ۱۳۹۳).

به طور کلی در ماشین های شار شعاعی، شار فاصله هوایی در راستای شعاعی و عمود بر محور و همچنین هادی-ها، محوری قرار گرفته اند، اما در ماشین های شار محوری، شار فاصله هوایی در راستای محور و هادیها به صورت شعاعی قرار می گیرند. این موتورها می توانند در انواع القایی، براشلس دی سی (BLDC)، هیستریزیس، سویچ رلوکتانس (SR) یا مغناطیس دائم (PM) ساخته شوند. همچنین موتورهای القایی می توانند به صورت تکفاز و سه فاز ساخته شوند. موتور مورد بحث در این مقاله، از نوع تکفاز با خازن دائم کار می باشد. انواع ساختارهای مرسوم ماشین های شار محوری القایی ساختار با یک فاصله هوایی (یک طرفه)<sup>۲</sup>، ساختار با دو فاصله هوایی (دو طرفه)<sup>۳</sup>، ساختار با چند فاصله هوایی<sup>۴</sup>، ساختار ترکیبی شار محوری و شار شعاعی است. ساختار با یک فاصله هوایی در مواردی که گشتاور کمی مورد نیاز است، استفاده می شود (NasiriGheidari, 2012).

این ساختار در طراحی موتورهای با گشتاور کمتر از ۱۰۰ نیوتن متر، معمولاً کاربرد دارد (سلیمانی و اجلالی، ۱۳۹۳). یک راه کاهش نیروی کشش مغناطیسی بین روتور و استاتور استفاده از ساختار شبه یاتاقان به صورت داده شده در شکل ۱ می باشد. در این ساختار شیار باریکی روی بدنه استاتور و روتور ایجاد و از ساجمه های ریزی پر می شود (NasiriGheidari, 2010). ساختار دو طرفه دارای دو فاصله هوایی است و می تواند به صورت دو روتور و یک استاتور در وسط<sup>۵</sup> یا دو استاتور و یک روتور در وسط<sup>۶</sup> باشد. بوسیله این ساختار می توان گشتاور بیشتری تولید نمود و نیروی محوری را کاهش داد (NasiriGheidari, 2012). در ساخت موتورهای با گشتاور بالاتر از ۲۰۰ نیوتن متر، معمولاً از این ساختار استفاده می شود (سلیمانی و اجلالی، ۱۳۹۳). برای کاربردهای خاص ماشین های بسیار پر قدرت می توان از ساختار با چند فاصله هوایی استفاده نمود. ماشین- های با چند فاصله هوایی در ساختار استاتور داخلی- روتور خارجی (ISER)<sup>۷</sup> دارای N استاتور و N+1 روتور می باشند و در ساختار استاتور خارجی- روتور داخلی (ESIR)<sup>۸</sup> دارای N+1 استاتور و N روتور می باشند. و بخاطر بازده بالاتر، نوع ISER معمولاً ترجیح داده می شود (Neelima, 2014). در ساختار ترکیبی می توان به چگالی توان زیاد و راندمان بالا دست پیدا کرد. این ساختار شامل یک استاتور و دو روتور، یکی به صورت محوری و یکی به صورت شعاعی سیم پیچی شده، است، که در (Benoudjit, 1998) به طور کامل بحث شده است.



شکل ۱- ساختارهای مرسوم ماشین شار محوری

<sup>1</sup> Axial flux machine

<sup>2</sup> Single sided axial air gap motor

<sup>3</sup> Double side axial air gap motor

<sup>4</sup> multiple air gap axial flux motor

<sup>5</sup> Central-stator motor

<sup>6</sup> Central-rotor motor

<sup>7</sup> internal stator external rotor

<sup>8</sup> external stator internal rotor

به دلیل چگالی توان و بازده و نسبت قطر به طول بزرگ و طول فاصله هوایی قابل تنظیم، کاربرد این نوع موتورها بسیار زیاد است، از آن جمله می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

بدلیل امکان اتصال مستقیم و سروصدا و خرابی کم در لوازم خانگی با نام تجاری DirectDrive کاربرد زیادی یافته اند. بدلیل چگالی توان بالا می توان در مکانهایی که فضای کمی وجود دارد، مانند سفینه های فضایی استفاده نمود. چون روتور می تواند با قسمتهای گردان به صورت یکپارچه ساخته شود، در فن ها و پمپ ها کاربرد دارد (Nasiri-Gheidari, 2012).

با توجه به چگالی گشتاور، راندمان و کسینوس فی بالا و قابلیت تغییرات زیاد سرعت در خودروهای الکتریکی کاربرد یافته است. همچنین در مواردی که به پاسخ سریع نیاز است از روتورهای بدون آهن یا ساختار بدون هسته استفاده می شود.

در مقالات و مراجعی که قبلا در مورد این نوع موتورها نگاشته شده است مواردی به شکل زیر مطرح گردیده است: در بعضی مقالات مانند (سلیمانی و اجلالی، ۱۳۹۳)، (Nasiri-Gheidari, 2012) و (Benoudjit, 1998) به معرفی ساختارهای این نوع موتورها اکتفا شده است. در بعضی از تحقیقات (Ashari, 2014)، (Chan, 1987, 16) و (Tootoonchian, 2008, 17) به برخی فرمولهای طراحی به شکل ناقص اشاره شده است. در بعضی مراجع مانند (Vishnu, 2008)، (Dashpande, 2010)، (boldea, 2010) فقط یک الگوریتم طراحی برای ماشین های القایی ارائه شده و به ماشینهای شار محور اشاره نگردیده است. در مراجع (Ong, 1998)، (Krause, 2002) مدلسازی دینامیکی انواع ماشین های معمول و خصوصا ماشین های القایی دو فاز و سه فاز تشریح شده است، اما به طور خاص موتور تکفاز با خازن دائم مورد بحث قرار نگرفته است. در (میر سلیم، ۱۳۸۴) (Bianchi, 2005) در مورد اصول اولیه روش اجزای محدود و نحوه استفاده از آن در حل ماشین های الکتریکی صحبت شده است، ولی هیچکدام به طور مشخص در مورد موتور تکفاز شار محوری سخنی نگفته اند.

در این مقاله ضمن ارائه یک الگوریتم طراحی کامل، فرمولهای طراحی به طور کامل تری ارائه شده است. همچنین یک مدل dq کامل، شامل خازن و پارامترهای روتور و استاتور آورده شده است. در ضمن یک مدل حالت دائم برای موتورهای شار محوری خازن دائم پیشنهاد شده است که بوسیله آن نمودارهای عملکردی ماشین قابل حصول است. در پایان نیز مدلسازی بوسیله پارامترهای موتور انجام شده است. با توجه به مدلسازی موتورهای دو فاز در بقیه مراجع ذکر شده، این مقاله یک مدلسازی واقعی بر مبنای وجود خازن دائم، در مدار ارائه نموده است. همچنین به وسیله ترسیم مدل دو بعدی خطی و دایره ای در نرم افزار اجزای محدود، مطابقت مدل طراحی، مدلسازی حالت گذرا و آزمایش ها بررسی شده است.

## ۲. روشهای محاسبه پارامترهای مدار معادل موتور

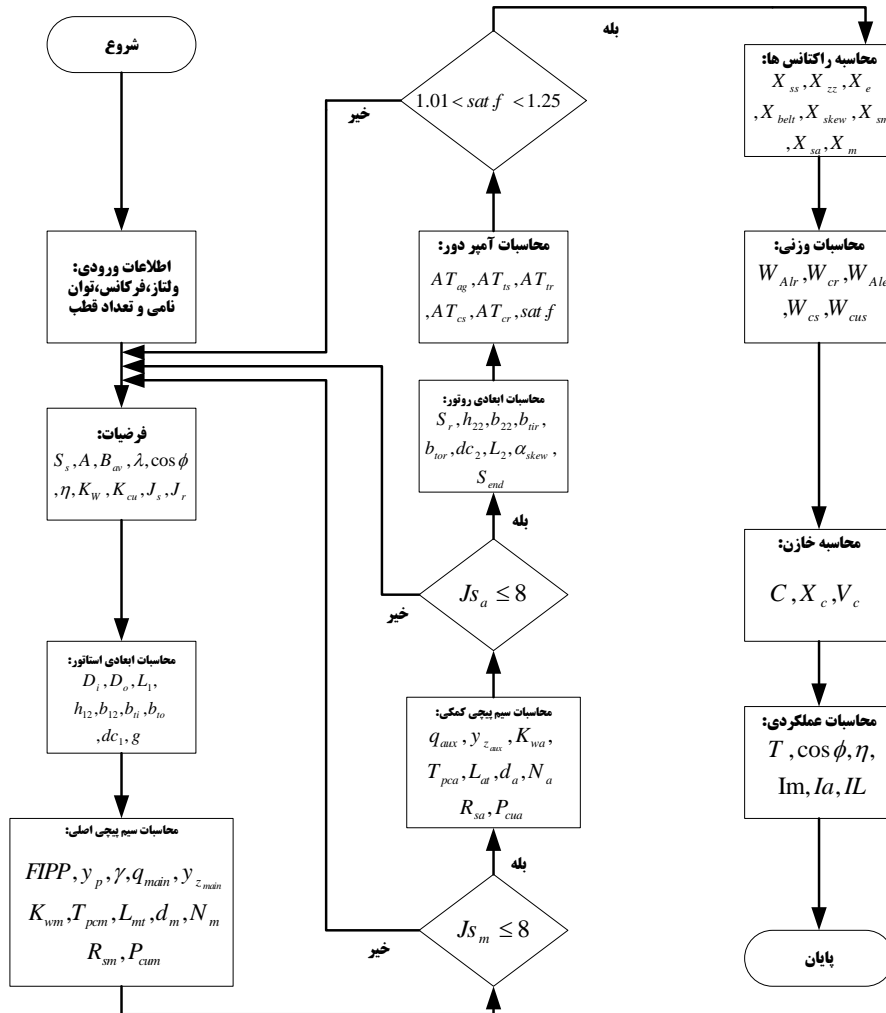
به طور معمول آزمایش های dc و بی باری و روتور قفل شده برای محاسبه پارامترهای موتور می تواند به کار رود اما روشهای جدید مانند روش تخلیه جریان استاتور که در (NasiriGheidari, 2012) به طور کامل تشریح شده، می تواند برای محاسبه به کار روند. روش های دیگر شامل الگوریتم طراحی، یافتن پارامترها بر اساس محاسبات و همچنین روش اجزای محدود است، که در ادامه تشریح می گردد.

## ۳. الگوریتم طراحی

الگوریتم طراحی به کار رفته جهت موتور شار محور تکفاز به صورت شکل ۲ می باشد که در این مقاله قسمت هایی از آن توضیح داده می شود. در این الگوریتم بعد از انتخاب اطلاعات ورودی که معمولا سفارش مشتری می باشد، پارامترهای اختیاری (فرضیات) مانند چگالی جریان، لاند، بارگذاری الکتریکی، مغناطیسی ویژه، نسبت تبدیل اسکالر و ... انتخاب می شوند و بر اساس الگوریتم پیشنهادی، محاسبات ابعادی استاتور و روتور و سیم پیچی ها انجام می شود و با چک کردن چگالی جریان و ضریب اشباع، درستی محاسبات بررسی می گردد. قابل ذکر است که این مرحله ممکن است چندین بار تکرار شود تا

<sup>1</sup> coreless

به نتیجه مطلوب برسیم. سپس پارامترهای الکتریکی شامل مقاومت ها و اندوکتانس ها و خازن محاسبه می شود. بعد از یافتن تمام پارامترها می توان مدار معادل نهایی حالت دائمی و گذرا را رسم نمود و محاسبات عملکردی شامل یافتن راندمان، گشتاور، ضریب توان، جریان های سیم پیچی اصلی و کمکی را انجام داد و همچنین نمودارهای عملکردی موتور در دو حالت دائمی و گذرا را رسم نمود.



شکل ۲- الگوریتم طراحی استفاده شده برای موتور تکفاز خازن دایم شار محور

### ۱.۳. عدد طلایی (لاندا)

نسبت قطر خارجی به قطر داخلی یکی از مهمترین پارامترها در طراحی موتور شار محور می باشد. این مقدار با لاندا نمایش داده می شود و معکوس این مقدار برابر  $K_D$  است. در ماشین شار محور انتخاب لاندا بسیار مهم است به همین دلیل می توان گفت لاندا، یک عدد طلایی است.

طبق تعریف دو پارامتر به شکل زیر تعریف می نمایم:

$$\lambda = \frac{D_o}{D_i} \tag{1}$$

$$K_D = \frac{D_i}{D_o} \tag{2}$$

کمپبل<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۱ بهترین نسبت  $K_D$  برای ماشین ایده آل مغناطیس دایم و القایی را ۰/۵۸ بدست آورد (Valtonen,2007).

### ۲.۳. ضریب بارگذاری الکتریکی ویژه

بارگذاری ویژه الکتریکی، طبق (Dashpande,2010) برای ماشینهای الکتریکی کوچک و متوسط بین ۳۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ و برای ماشین های بزرگ بین ۴۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ انتخاب می گردد. طبق (لسانی، ۱۳۶۱) مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه بین ۴۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ تغییر می کند. عوامل موثر بر روی مقدار این پارامتر شامل ولتاژ کارکرد موتور، ظرفیت اضافه بار و تلفات مس می باشد. در ماشین های شارمحور می توان مقدار مذکور را بیشتر انتخاب نمود (نصیری قیداری، ۱۳۹۲).

### ۳.۳. ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه

ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه همان چگالی شار متوسط فاصله هوایی برای یک قطب، است. این ضریب با  $B_{av}$  نمایش داده می شود. انتخاب  $B_{av}$  باید طوری باشد که هیچ قسمتی از مدار مغناطیسی وارد اشباع نشود.  $B_{av}$  وابسته به چگالی شار دندانه ( $B_t$ ) و چگالی شار هسته ( $B_c$ ) است.  $B_t$  حداکثر ۱.۸ و  $B_c$  بین ۱.۳ تا ۱.۵ در موتور های القایی انتخاب می شود (Dashpande,2010). بارگذاری ویژه مغناطیسی طبق (Dashpande,2010) در حدود ۰.۴۵ تا ۰.۶ تسلا انتخاب می گردد. در (لسانی، ۱۳۶۱) این مقدار بین ۰.۳ تا ۰.۶۵ توصیه شده است. به دلیل اینکه نسبت قطر به طول و قطر داخلی به قطر محور در ماشینهای شار محور بزرگتر از ماشین های مرسوم است، خنک سازی بهتر و تهویه راحت تر است پس می توان  $B_{av}$  را بیشتر انتخاب کرد (نصیری قیداری، ۱۳۹۲). از آنجا که نقطه شروع طراحی ماشینهای الکتریکی، معادله خروجی است پس آن را می یابیم. در ماشین القایی معمولی، معادله خروجی از روابط زیر یافت می شود:

$$S = mV_1I_1 \quad (۳)$$

$$V_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi_p K_w T_{ph} \quad (۴)$$

$$FIPP = \phi_p = B_{av} \tau_p l \quad (۵)$$

در این روابط  $m$  تعداد فاز،  $V_1$  ولتاژ ورودی،  $I_1$  جریان ورودی،  $f$  فرکانس،  $FIPP$  شار زیر هر قطب،  $K_w$  ضریب سیم پیچی،  $T_{ph}$  تعداد هادیهای هر فاز،  $\tau_p$  گام قطبی و  $l$  طول محوری ماشین است. طبق روش پیشنهادی منابع مختلف، جهت یافتن معادلات ماشین شار محور القایی کافی است که به جای  $D$  از  $D_{avg}$  و به جای  $l$  از  $l_{equ}$  استفاده شود (Xinzheng).

$$FIPP = B_{max} \times \frac{D_o^2 - D_i^2}{2P} \quad (۶)$$

که در این فرمول  $D_o$  قطر خارجی،  $D_i$  قطر داخلی و  $P$  تعداد قطب هاست. بعد از محاسبات معادله خروجی ماشین شار محور به شکل زیر در می آید:

$$S = \frac{\sqrt{2}}{32} \pi^3 K_w B_{av} A (\lambda + 1)^2 (\lambda - 1) D_i^3 n_s \quad (۷)$$

که در این فرمول  $n_s$  سرعت سنکرون بر حسب دور بر ثانیه است.

### ۴.۳. محاسبات ابعادی استاتور

فرمول محاسبه قطر داخلی موتور را می توان به شکل زیر نوشت (Tootoonchian,2008):

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{32P_{out}}{\sqrt{2}\pi^3 K_w B_{av} A (\lambda + 1)^2 (\lambda - 1) n_s \eta \cos \phi}} \quad (۸)$$

طول استاتور طبق (Chan,1987) به شکل زیر بدست می آید:

<sup>1</sup> campbell

$$L_1 = (2.3 \frac{A}{J_s} + 0.7 \frac{\pi D_i}{4P})(\lambda + 1) \quad (9)$$

که در این فرمول  $J_s$  چگالی جریان عبوری از هادی های استاتور است. برای محاسبه عرض شیار استاتور فرمولی به شکل زیر در (Wallace) ذکر شده است:

$$b_{10} = b_{12} = \frac{\pi}{2S_1} (D_o + D_i) (1 - \frac{B_{g \max}}{B_{f \max}}) \quad (10)$$

که در این رابطه  $S_1$  تعداد شیار استاتور است. برای محاسبه عمق مفید شیار دو فرمول به شکل زیر در (Nasiri- Gheidari, 2010) و (Huang, 1999) ذکر شده است:

$$h_{12} = \frac{A}{2J_s K_{CU}} (1 + \lambda) = \frac{A}{2J_s K_{CU}} (\frac{1 + K_D}{K_D}) \quad (11)$$

که در این فرمول ها  $K_{CU}$  ضریب پرشوندگی مس نام دارد و حدوداً ۰/۴ در نظر گرفته می شود. برای محاسبه عمق یوغ استاتور داریم:

$$dc_1 = L_1 - h_{10} - h_{11} - h_{12} \quad (12)$$

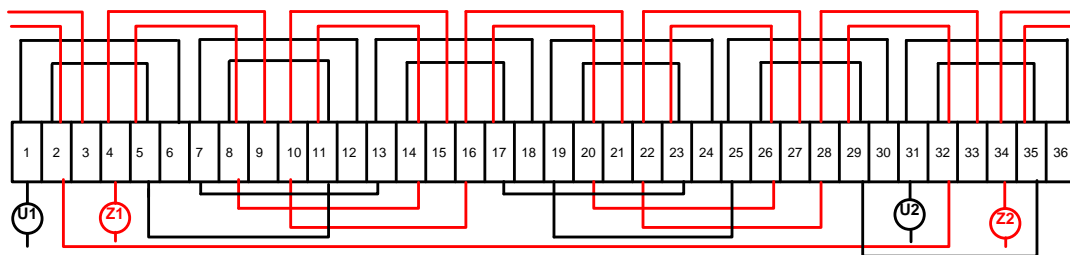
برای محاسبه طول فاصله هوایی روابط زیادی وجود دارد که همگی تقریباً اعداد مشابهی را پیشنهاد می دهند، یکی از این روابط که در (Ashari, 2014) آمده، به شکل زیر می باشد.

$$g = (3.06 - \frac{6560}{D_{avg} + 2280}) \times 10^{-3} \quad (13)$$

تعداد دور سری سیم پیچ اصلی تقسیم بر تعداد قطب از رابطه زیر یافت می شود:

$$T_{pc} = \frac{(1 - \Delta V \%) V_1}{4.44 f \times FIPP \times K_{Wm} \times P} \quad (14)$$

طبق روش سیم پیچی موجود در (عراقی، ۱۳۸۴) برای طراحی موتور القایی خازن دائم تکفاز، نوع سیم پیچی به شکل ۳ طراحی می شود:



شکل ۳- نقشه سیم پیچی موتور تکفاز ۳۶ شماره ۶ قطب شار محور با سیم پیچی متحدالمرکز

#### ۱.۴.۳. محاسبه قطر سیم مصرفی در سیم پیچ اصلی

برای محاسبه قطر سیم مصرفی باید ابتدا نسبت تبدیل بین سیم پیچ اصلی و کمکی را در نظر گرفت. نسبت تبدیل اسکالر (a) به صورت تعداد دور سیم پیچی کمکی به اصلی تعریف می شود، طبق (Boldea, 2010) نسبت تبدیل a عددی بین ۱ و ۲ است. در (Ghial, 2014) یک روش برای محاسبه نسبت تبدیل مختلط (CCVR) به طور کامل تشریح شده است و مدار معادلی بر این اساس تعریف گردیده است.

با توجه به فرمول پیشنهادی در (Boldea, 2010) داریم:

$$I_{Lph} = \frac{P_{out}}{\eta V \cos \phi} \quad (15)$$

$$I_{mph} = \frac{I_{Lph}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{a}\right)^2}} \quad (16)$$

$$S_m = \frac{I_{mph}}{J_s} \quad (17)$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4S_m}{\pi}} \quad (18)$$

که در این روابط  $S_m$  مساحت سطح مقطع سیم پیچ اصلی،  $d_m$  قطر سیم پیچ اصلی،  $I_{Lph}$  جریان کلی ورودی به موتور و  $I_{mph}$  جریان سیم پیچ اصلی است

### ۵.۳. محاسبات ابعادی روتور

برای انتخاب تعداد شیارهای روتور محدودیت هایی به شکل زیر وجود دارد (Vtu Learning, 2012):

- برای جلوگیری از خزش<sup>۱</sup> و کوچینگ<sup>۲</sup> باید:

$$S_s \neq S_r, S_s - S_r \neq \pm 3P$$

- برای جلوگیری از نقاط نوک تیز<sup>۳</sup> و کج شدگی<sup>۴</sup> در نمودار "گشتاور سرعت" باید:

$$S_s - S_r \neq \pm P, \pm 2P, \pm 5P$$

- برای جلوگیری از عملکرد نویزی باید:

$$S_s - S_r \neq \pm 1, \pm 2, (\pm P \pm 1), (\pm P \pm 2)$$

برای یافتن ابعاد روتور باید به این موضوع توجه کرد که شاری که از قسمتهای فلزی روتور و استاتور می گذرد یکی است پس در نتیجه:

$$L \times S_s \times b_{to_s} = L \times S_r \times b_{to_r} \quad (19)$$

سپس:

$$b_{to_r} = \frac{S_s}{S_r} \times b_{to_s} \quad (20)$$

عرض شیار در فاصله هوایی از رابطه زیر یافت می شود:

$$b_{22} = G_{or} - b_{to_r} \quad (21)$$

جریان روتور به طور تقریبی از رابطه زیر یافت می شود:

$$I'_r = I_{mph} \times \cos \phi \quad (22)$$

$$\frac{I'_r}{I_r} = \frac{S_r}{2mT_{ph}K_{W_m}} \quad (23)$$

$$I_r = \frac{2mT_{ph}K_{W_m}}{S_r} \times I'_r \quad (24)$$

مساحت کلی قفس از رابطه ذیل بدست می آید:

<sup>1</sup> crawling

<sup>2</sup> cogging

<sup>3</sup> cusps

<sup>4</sup> hooks

$$S_{cage} = \frac{I_r}{J_r} \quad (25)$$

به طور تقریبی می توان عمق شیار روتور را از رابطه زیر یافت:

$$h_{22} = \frac{S_{cage}}{b_{22}} \quad (26)$$

همچنین جریان در حلقه انتهایی از رابطه زیر یافت می شود:

$$I_{end} = I_r \times \frac{S_r}{\pi \times P} \quad (27)$$

مساحت حلقه انتهایی نیز به شکل زیر است:

$$S_{end} = \frac{I_{end}}{J_r} \quad (28)$$

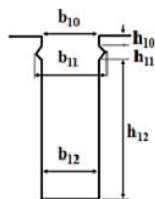
که در این رابطه  $J_r$  چگالی جریان روتور است. طبق (نصیری قیداری، ۱۳۹۲) عمق یوغ روتور و طول روتور از رابطه های زیر یافت می شود:

$$dc_2 = 0.95 \times dc_1 \quad (29)$$

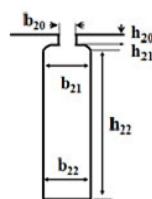
$$L_2 = dc_2 + h_{20} + h_{21} + h_{22} \quad (30)$$

بعد از این محاسبات، ابعاد قسمت های مختلف به صورت جدول ۱ نوشته شده است:

جدول ۱- ابعاد موتور ۶ قطب ۶۵۰ وات شار محوری تکفاز خازن دائم



ابعاد استاتور



ابعاد روتور

مقدار	واحد	پارامتر
۸۷	mm	$D_{i-S}$
۱۷۳.۷	mm	$D_{o-S}$
۳۶	-	$S_S$
۵.۵	mm	$b_{10}$
۷	mm	$b_{11}$
۵.۵	mm	$b_{12}$
۱	mm	$h_{10}$
۲	mm	$h_{11}$
۳۰.۲۵	mm	$h_{12}$
۱۱.۷۵	mm	$dc_1$
۴۵	mm	$L_S$
۲.۲۰	mm	$bt_{iS}$
۹.۶۵	mm	$bto_S$
۰.۶	mm	$L_g$

مقدار	واحد	پارامتر
۸۶	mm	$D_{i-R}$
۱۷۳	mm	$D_{o-R}$
۴۵	-	$S_R$
۱	mm	$b_{20}$
۳.۶۵	mm	$b_{21}$
۳.۶۵	mm	$b_{22}$
۱	mm	$h_{20}$
۰.۳	mm	$h_{21}$
۹.۳	mm	$h_{22}$
۱۹.۵	mm	$dc_2$
۳۰.۱	mm	$L_R$
۵.۲	mm	$bt_{iR}$
۱۱	mm	$bto_R$



## ۶.۳. محاسبات آمپر دور و ضریب اشباع

اگر هسته وارد اشباع شود، دیگر رلوکتانس مغناطیسی هسته در مقایسه با رلوکتانس فاصله هوایی کم نیست و نمی-توان از آن چشم پوشی کرد. به همین دلیل محاسباتی برای آمپر دور، انجام می شود و در نهایت ضریبی به نام ضریب اشباع<sup>۱</sup> تعریف می شود که باید عددی بین ۱/۰۱ و ۱/۲۵ باشد تا صحت محاسبات تایید شود (MITTLE). با توجه به اینکه طول فاصله هوایی در مقابل عبور شار، در تمام نقاط یکسان نیست؛ به همین دلیل ضریبی به نام کارتر<sup>۲</sup> در محاسبات ظاهر می شود. مقدار این ضریب عددی بین ۱/۲ تا ۱/۶ می باشد. این ضریب معمولاً به صورت حاصلضرب ضریب کارتر روتور و ضریب کارتر استاتور تعریف می شود. برای یافتن ضریب کارتر طبق (نصیری قیداری، ۱۳۹۲) از فرمول های (۳۱) و (۳۲) استفاده می گردد.

$$K_{cs} = \frac{t_s}{t_s - g \times \frac{4}{\pi} \left( \frac{b_{10}}{2g} \tan^{-1} \left( \frac{b_{10}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{b_{10}}{2g} \right)^2} \right)} \quad (31)$$

$$K_{cr} = \frac{t_r}{t_r - g \times \frac{4}{\pi} \left( \frac{b_{20}}{2g} \tan^{-1} \left( \frac{b_{20}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{b_{20}}{2g} \right)^2} \right)} \quad (32)$$

$$K_c = K_{cs} \times K_{cr} \quad (33)$$

که در این فرمول ها  $g$  طول فاصله هوایی و  $K_{cs}$  ضریب کارتر استاتور و  $K_{cr}$  ضریب کارتر روتور است و  $K_c$  ضریب کارتر کلی است. همچنین  $t_s$  و  $t_r$  گام متوسط شیار استاتور و گام متوسط شیار روتور می باشند.

## ۷.۳. محاسبه پارامترهای مدار معادل پیشنهادی

جهت محاسبه مقاومت، ابتدا مقاومت ویژه در دمای کارکرد موتور بدست آورده می شود.

$$R_{sm} = \rho_{75^\circ} \frac{L_{mt} \times P}{S_m} \quad (34)$$

بعد از این محاسبه، باید اثر پوستی را نیز لحاظ نمود. برای محاسبه مقاومت سیم پیچ کمکی ابتدا طول کلی سیم در زیر هر قطب به وسیله رابطه زیر یافت می شود:

$$L_{at} = T_{pca} \times (D_o - D_i + 2W_{cui} + 2W_{cuo} + l_{ei} + l_{eo}) \quad (35)$$

پس:

$$R_{sa} = \rho_{75^\circ} \frac{L_{at} \times P}{S_a} \quad (36)$$

و در نهایت باید اثر پوستی را نیز لحاظ نمود. برای محاسبه مقاومت روتور که بعد از محاسبه تلفات و تقسیم آن بر مربع جریان یافت می شود، طبق (NasiriGheidari, 2010) داریم:

$$R_r = \rho_{75^\circ} \left( \frac{D_o - D_i}{2A_b N_b \cos \alpha_{skew}} + \frac{1}{\pi} \frac{K_{Rin} D_{min} + K_{Rout} D_{mout}}{P^2 S_{end}} \right) \quad (37)$$

مقاومت منتقل شده از دید سیم پیچ اصلی به سمت استاتور برابر است با:

$$R'_m = P \times N_m^2 \times K_{Wm}^2 \times R_r \quad (38)$$

<sup>1</sup> Saturation factor

<sup>2</sup> Carter's coefficient

## ۱.۷.۳. محاسبه راکتانس ها

راکتانس های ناشی موتور شامل راکتانس ناشی شیار ( $X_{ss}$ )، راکتانس زیگزآگ ( $X_{zz}$ )، راکتانس کله سیم ها ( $X_e$ )، راکتانس ناشی کمربندی ( $X_{belt}$ )، راکتانس کج شدگی ( $X_{skew}$ )، راکتانس مغناطیس کننده ( $X_m$ ) و راکتانس ناشی روتور ( $X_r$ ) است.

$$X_{ss} = 2.512 \times K_x \times (K_{s1} C_x + K_{s2} \frac{S_1}{S_2}) \times \frac{D_o - D_i}{2S_1} \quad (39)$$

که در این فرمول طبق (نصیری قیداری، ۱۳۹۲):

$$K_x = 2\pi f (N_m K_{wm})^2 \times 10^{-8} \quad (40)$$

$$K_{s1} = \frac{h_{12}}{3b_{12}} \times \frac{h_{12}}{b_{12}} + \frac{h_{10} + h_{11}}{b_{12}} \quad (41)$$

$$K_{s2} = \frac{h_{22}}{3b_{22}} \times \frac{h_{22}}{b_{22}} + \frac{h_{20}}{b_{20}} + \frac{2 \times h_{21}}{b_{20} + b_{21}} \quad (42)$$

همچنین  $C_x$  ضریب تصحیح دلخواه است و برای سیم پیچی دو فاز ۰/۷۵ است (NasiriGheidari, 2010). راکتانس زیگزآگ به وضعیت نسبی استاتور و روتور و پهنای دندانهای روبروی هم بستگی دارد و برای محاسبه آن داریم:

$$X_{zz} = K_x \times K_{zz} \times \frac{0.838 \times (D_o - D_i)}{2S_1 L_g} \quad (43)$$

که در این فرمول ثابت  $K_{zz}$  بر اساس (Nasiri-Gheidari, 2010) از رابطه زیر یافت می شود:

$$K_{zz} = \frac{\pi(D_o + D_i)(S_1 + S_2) - 2S_1 S_2 (b_{10} + b_{20})}{\pi(D_o + D_i)(S_1 + S_2)} \quad (44)$$

راکتانسی که به دلیل شار ناشی در کله سیم ها بوجود می آید، با رابطه زیر بدست می آید:

$$X_e = 1.236 \times K_x \times D_g \times \frac{T_{pc} / T_{pp}}{S_1 P} \quad (45)$$

که در این فرمول  $T_{pc}$  تعداد دور بر کوئل و  $T_{pp}$  تعداد دور بر قطب است. راکتانس تفاضلی یا کمربندی به علت تفاوت در شکل موج نیروی محرکه روتور و استاتور، که بر روی هم توزیع ایجاد می کنند، به وجود می آید.

$$X_{belt} = 9.29 \times 10^{-3} K_x K_B \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4K_{ag} L_g \times sat.f \times P} \quad (46)$$

راکتانس کج شدگی که بدلیل کج بودن میله های روتور نیروی محرکه ای تولید می کند، با رابطه زیر یافت می شود (Nasiri-Gheidari, 2010).

$$X_{skew} = \frac{0.2546 \times \pi(D_o^2 - D_i^2)}{4K_{ag} L_g \times sat.f \times P} \times \frac{K_p \times K_x}{4} \times \left(\frac{\alpha_{skew}}{100}\right)^2 \quad (47)$$

از جمع کلیه این راکتانس ها، راکتانس ناشی کل استاتور محاسبه می گردد

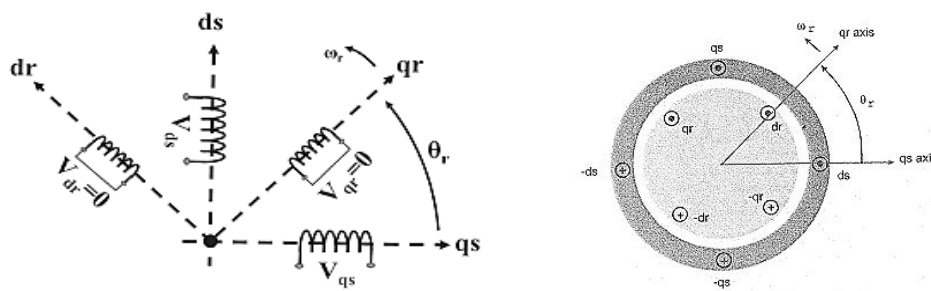
نتیجه محاسبات در موتور ۶۵۰ وات ۶ قطب شرکت نیروتهویه در جدول ۲ نمایش داده شده است:

جدول ۲- پارامترهای محاسبه شده موتور مورد نظر

نام پارامتر	مقدار محاسبه شده برای موتور مورد نظر
نسبت تبدیل اسکالر	$a = 1.2$
تعداد دور سیم پیچ اصلی	$N_m = 72 \text{turn}$
قطر سیم پیچی اصلی	$d_m = 0.9 \text{mm}$
تعداد دور سیم پیچ کمکی	$N_a = 87 \text{turn}$
قطر سیم پیچی کمکی	$d_a = 0.7 \text{mm}$
مقاومت سیم پیچ اصلی در حین کار	$R_{smAC} = 7.21 \Omega$
مقاومت سیم پیچ کمکی در حین کار	$R_{saAC} = 14.4 \Omega$
مقاومت روتور در حین کار	$R'_{ra} = 19.68 \Omega$ $R'_m = 13.88 \Omega$
راکتانس نشتی کلی استاتور	$X_{sa} = 7.901 \Omega$ $X_{sm} = 5.5748 \Omega$
راکتانس نشتی کلی روتور	$X'_r = 3.37 \Omega$
راکتانس مغناطیس کننده	$X_m = 130 \Omega$
مقدار خازن	$X_c = 127.3 \Omega$ $c = 25 \mu F$
فاصله هوایی	$g = 0.6 \text{mm}$
فاصله هوایی موثر با اعمال ضریب کارتر	$L_g = 0.88 \text{mm}$
عمق یوغ استاتور	$dc_1 = 17 \text{mm}$
عمق یوغ روتور	$dc_2 = 16.15 \text{mm}$
طول کل استاتور	$L_1 = 50 \text{mm}$
طول کل روتور	$L_2 = 28.86 \text{mm}$

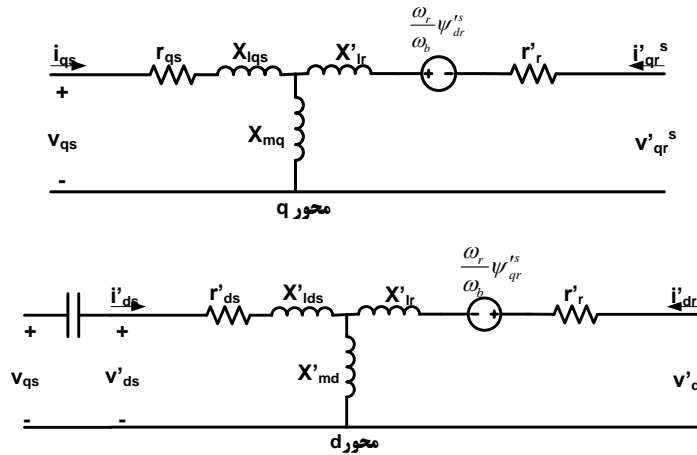
#### ۴. مدل عملکردی پیشنهادی

مدل مداری ایده آل ماشین القایی تکفاز خازن دائم به شکل ۴ می باشد:



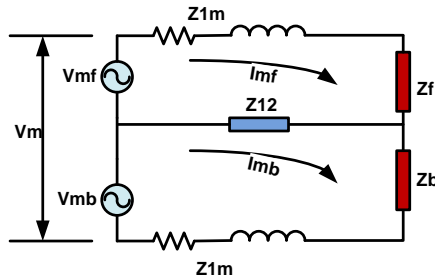
شکل ۴- مدل مداری ایده آل ماشین القایی تکفاز

مدار معادل dq ماشین القایی تکفاز خازن دائم که در حالت گذرا و دائم قابل استفاده است، طبق (Krase,2002) و (Ong,1998) البته با اعمال اثر خازن، به صورت شکل ۵ می باشد:



شکل ۵- مدار معادل dq ماشین القایی تکفاز خازن دائم شارمحوری

طبق این مدار معادل، مدل‌سازی حالت دینامیک با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب انجام شد و نتایج در ادامه مقاله آورده می شود. مدار معادل حالت دایمی، طبق (Yeadon,2001), (Kothari,2010), (فیضی، ۱۳۸۰) به شکل ۶ پیشنهاد شده است:



شکل ۶- مدار معادل حالت دائمی موتور تکفاز با خازن دائم

طبق پارامترهای جدول ۲ و مدار معادل فوق، نمودارهای عملکردی حالت دائمی توسط یک برنامه اکسل نوشته شد، که در ادامه مقاله آورده می شود.

## ۵. روش اجزای محدود

روش اجزای محدود، به وسیله تبدیل کردن معادلات انتگرالی یا دیفرانسیلی حاکم بر مسائل پیچیده مهندسی به تعداد زیادی معادله جبری ساده و تقسیم مدل به قسمتهای کوچکتر و آنالیز آن قسمت ها، آن ها را حل نموده و جواب بسیار دقیقی را تولید می نماید.

### ۱.۵. شبیه سازی با نرم افزار JMAG

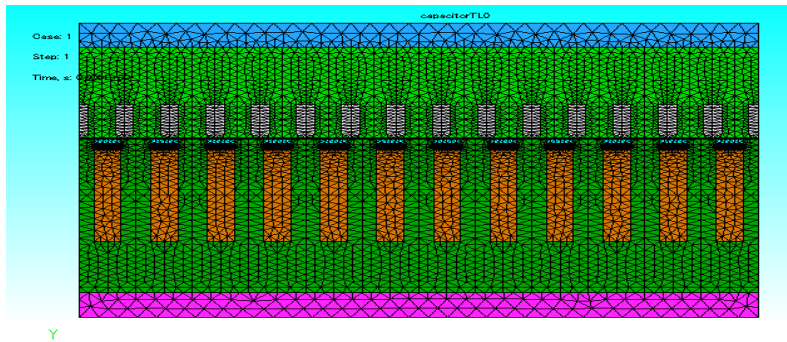
انجام محاسبات روش اجزای محدود توسط نرم افزارهای تجاری مختص این کار مانند، ANSYS, FLUX, MAXWELL, JMAG, ... صورت می گیرد. تمامی این نرم افزارها شامل سه مرحله در انجام پروژه ها می باشند. مرحله پیش پردازش<sup>۱</sup> که شامل ترسیم شکل دو بعدی یا سه بعدی مساله، تعیین شرایط مرزی، رسم مدار تحریک، مش بندی و تعیین خواص مواد و شرایط کارکرد مدار می باشد. مرحله حل کننده<sup>۲</sup> که شامل تشکیل ماتریس ها و حل معادلات جبری حاکم بر مش ها و گره ها و ارائه پاسخ های اولیه شامل مجموعه ای از پتانسیل گره ها می باشد. مرحله پس پردازش<sup>۳</sup> که تحلیل نتایج و محاسبه پارامترهایی چون مقاومت، جریان گردابی، اندوکتانس، تلفات فوکو، هیستریزس و اضافی، نیرو و گشتاور را بر عهده دارد. نرم

<sup>1</sup> Preprocessing

<sup>2</sup> Solver

<sup>3</sup> postprocessing

افزار JMAG یک نرم افزار ژاپنی از شرکت JSOL است، که از کامل ترین این نرم افزار ها می باشد، و دارای تحلیل های حرارتی و الکترو مغناطیسی دینامیکی و استاتیکی زمانی و فرکانسی، است. در این مقاله برای شبیه سازی موتور شار محور، از مدل های دو بعدی خطی و دو بعدی دایره ای، استفاده شد که نمونه مش بندی و خروجی های این برنامه در ادامه آورده می شود.



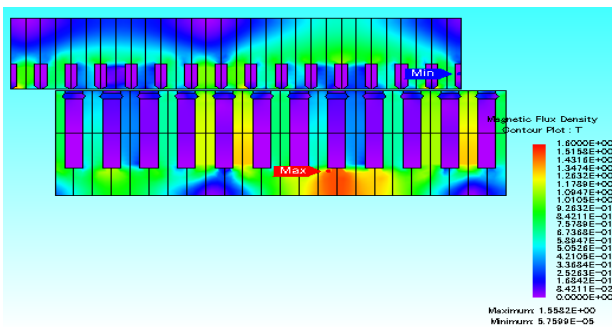
شکل ۷- مش بندی مدل دو بعدی رسم شده

در مدل دوبعدی (2D-FEM) رسم شده، دو نکته ای که مورد توجه قرار گرفته است، به شکل زیر می باشد:

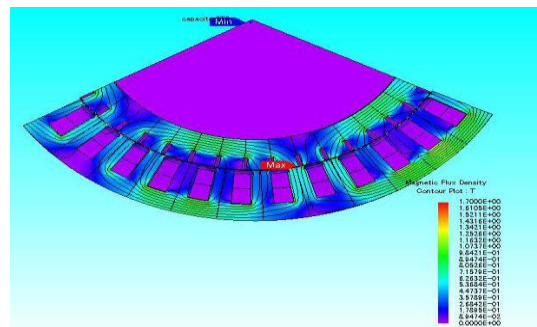
الف) طول کلی طرح از رابطه  $l_{equ} = \pi \left( \frac{D_o + D_i}{2} \right)$  یافت می شود.

ب) ضخامت طرح<sup>۱</sup> برابر  $\frac{D_o - D_i}{2}$  بدست می آید.

همچنین یک مدل دو بعدی دایره ای به وسیله قسمت ترسیم این نرم افزار (Geometry editor) برای یک جفت قطب (۱۲۰ درجه مکانیکی) رسم گردید، تا بتوان نمودارهای گشتاور و سرعت دورانی را مشاهده نمود. در این مدل به دلیل اینکه نسبت پهنای روتور و استاتور به قطر کلی طرح کم است، با تقریب بسیار خوبی نمودارهای خروجی بدست می آید. نمودارهای رنگی<sup>۲</sup> مربوط به چگالی میدان مغناطیسی در شکل های ۸ و ۹ نمایش داده شده است:



شکل ۹- نمودار رنگی چگالی شار مدل دوبعدی رسم شده



شکل ۸- مدل دو بعدی دایره ای ترسیم شده

## ۲.۵. تنظیم استپ های زمانی<sup>۳</sup>

جهت تنظیم زمان استپ ها برای انجام تحلیل المان محدود، باید طبق فرمول زیر، زمان مورد نظر را تنظیم نمود.

$$\text{Analysis time} = \text{start time} + (((\text{end time} - \text{start time}) / (\text{number of divisions})) \times (\text{number of steps} - 1))$$

به طور مثال، در بعضی از تحلیل های این مقاله، زمان شروع صفر ثانیه و زمان پایان ۰/۰۹ و تعداد تقسیمات ۱۰۰ دفعه و تعداد استپ ها ۱۵۰۰ تنظیم گردید در این صورت زمان تحلیل ۱/۳۵ ثانیه محاسبه می گردد.

<sup>۱</sup> Stack length

<sup>۲</sup> contour

<sup>۳</sup> Time stepping

**۳.۵. شرایط مرزی<sup>۱</sup>**

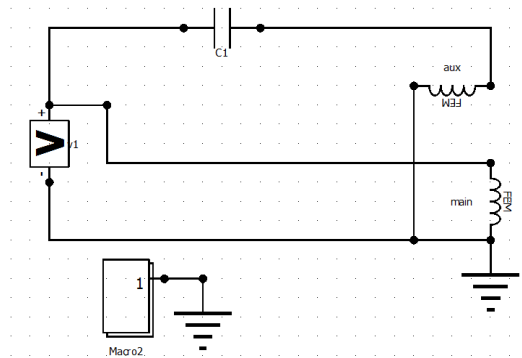
شرایط مرزی موجود در این نرم افزار شامل شرایط مرزی پریودیک<sup>۲</sup>، شرایط مرزی طبیعی<sup>۳</sup> و شرایط مرزی متقارن<sup>۴</sup> می-باشد. در مدل خطی، باید از شرط مرزی پریودیک حرکت خطی<sup>۵</sup>، استفاده می نمایم و در مدل دو بعدی دایره ای، نیز از شرط مرزی پریودیک حرکت دورانی<sup>۶</sup> استفاده می گردد. چون در تحلیل مدل خطی از روش تولید منطقه هوایی<sup>۷</sup> استفاده گردید، شرط مرزی متقارن بر روی آن قرار می گیرد. برای اینکه بتوان خرابی مش ها در اثر جابجایی روتور نسبت به استاتور را اصلاح نمود، از روش لغزیدن<sup>۸</sup> استفاده گردیده است.

**۴.۵. مش بندی**

همانطور که بیان شد، در مدل خطی ودایره ای، جهت انجام مش بندی (شبکه بندی) از روش لغزیدن (اسلاید) همراه با تولید منطقه هوایی استفاده گردید. در مش بندی انجام شده برای مدل جفت قطبی کشیده شده خطی، تعداد گره ها ۵۹۵۱ و تعداد عناصر ۱۰۷۴۳ عدد تعیین شد و در مدل جفت قطبی دایره ای، تعداد گره ها ۱۶۰۴۰ و تعداد عناصر ۲۵۹۵۰ می باشد. در هنگام مش بندی توجه به این نکته حائز اهمیت است که در هر مکانی که تعداد خطوط شار و تغییرات آن بالا است، همانند فاصله هوایی در این مدل، باید مش بندی ریز تری اعمال شود.

**۵.۵. مدار بندی**

مدار استفاده شده برای موتور تکفاز خازن دایم به شکل ۱۰ در فضای Edit Circuit ترسیم گردید، طبق این مدار، در سیم پیچها (FEM coil)، سیم پیچ اصلی با ۷۲ دور و مقاومت ۷/۲ اهم و سیم پیچ کمکی با ۸۷ دور و مقاومت ۱۴/۴ اهم شبیه سازی گردید و هادیهای قفس روتور (FEM conductor) نیز با مقاومت انتهایی  $6 \times 10^{-5}$  اهم در نظر گرفته شد. در این مدار به دلیل اینکه یک سوم طرح ترسیم شده است باید مقاومت سیم پیچ ها و ولتاژ ورودی یک سوم حالت کامل در نظر گرفته شود و خازن سه برابر حالت اصلی در نظر گرفته می شود.



شکل ۱۰- مدار بندی تکفاز روتور و استاتور

نمودار گشتاور سرعت در حالت بی باری، حاصل از روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار JMAG، مدل عملکرد دینامیکی با استفاده از نرم افزار SIMULINK/MATLAB و مدل عملکرد حالت دائمی با استفاده از نرم افزار اکسل به صورت شکل زیر است:

<sup>1</sup> Boundary conditions

<sup>2</sup> Periodic Boundary conditions

<sup>3</sup> Natural Boundary conditions

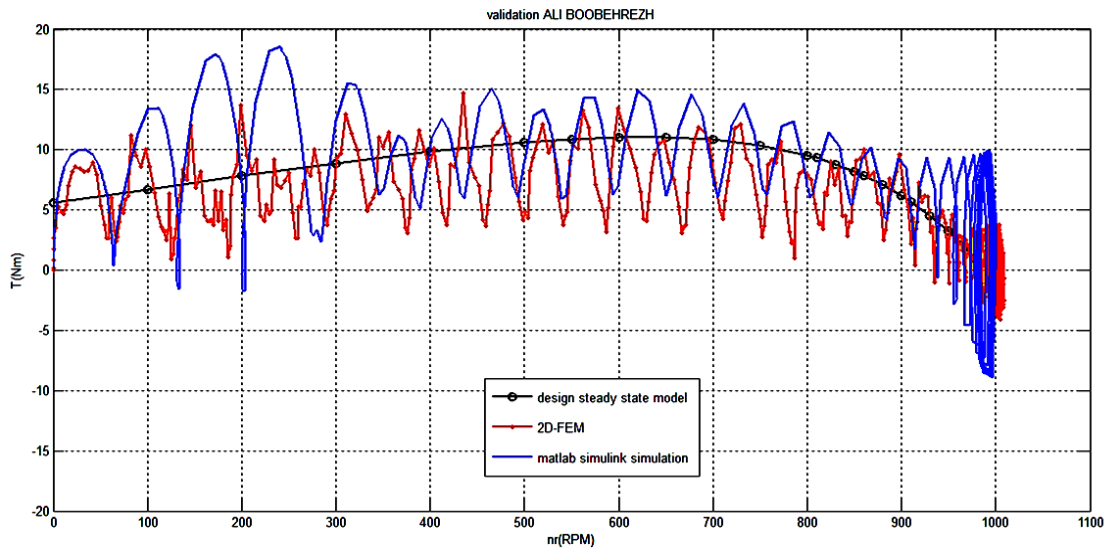
<sup>4</sup> Symmetry Boundary conditions

<sup>5</sup> Translation Periodic Boundary conditions

<sup>6</sup> Rotation Periodic Boundary conditions

<sup>7</sup> Air region

<sup>8</sup> Slide



شکل ۱۱- نمودار گشتاور سرعت با سه روش طراحی حالت دائم، اجزای محدود و مدل سازی با متلب

### ۶.۵. یافتن مدار معادل با روش اجزای محدود

برای یافتن مدار معادل باید شرایط بی باری و قفل روتور توسط نرم افزار JMAG شبیه سازی گردد. جهت شبیه سازی شرایط قفل روتور طبق (میرسلیم، ۱۳۸۴)، (jmag, 2012)، (Bianchi, 2005) بهتر است تحلیل فرکانسی انجام شود. طبق (میرسلیم، ۱۳۸۴) برای یافتن امپدانس در فرکانس های متفاوت داریم:

$$Z(j\omega) = \frac{V}{I} \quad (48)$$

و برای یافتن مقاومت کل نیز داریم:

$$R = \frac{P}{I_{rms}^2} \quad (49)$$

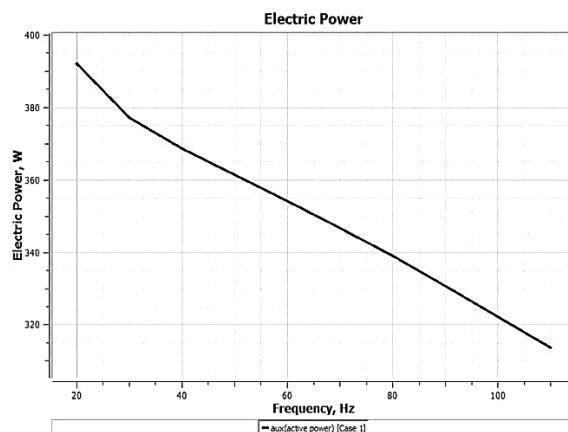
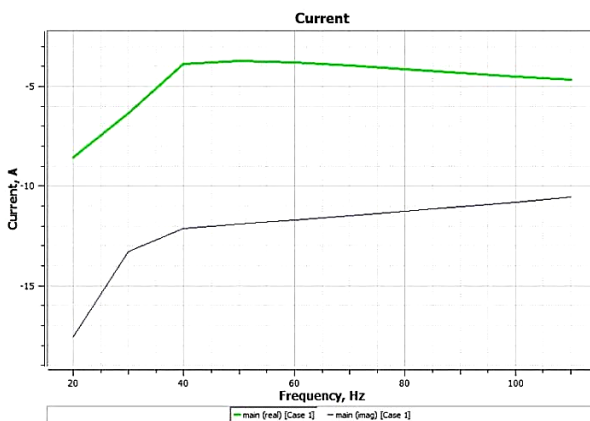
و جهت یافتن راکتانس کلی در حالت قفل روتور:

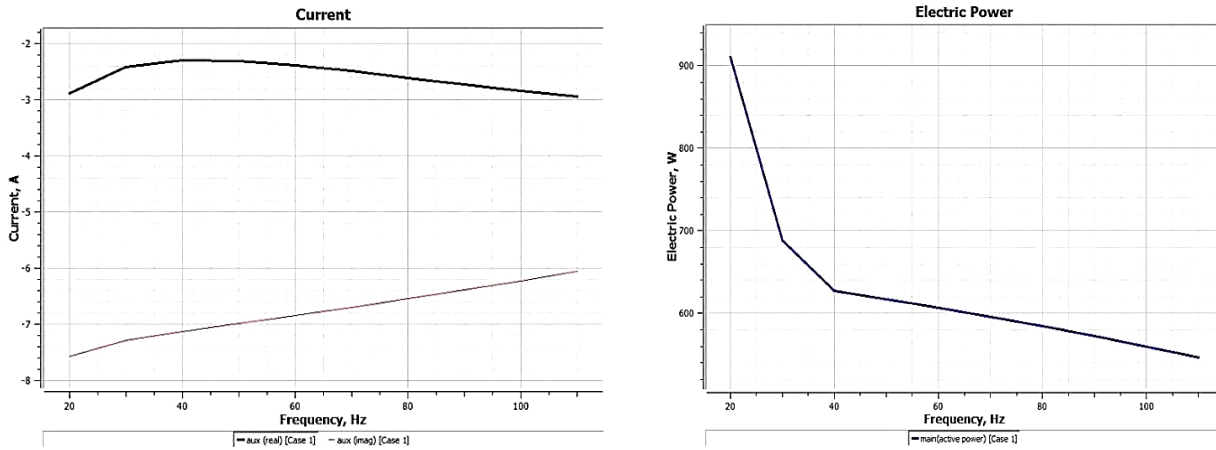
$$X_{LR} = \sqrt{|Z|^2 - R^2} \quad (50)$$

و در این حالت مقاومت روتور منتقل شده به سمت استاتور برابر است با:

$$R_r = R - R_s \quad (51)$$

تحلیل فرکانسی انجام شده، توسط نرم افزار جی مگ، یک بار برای سیم پیچ اصلی و یک بار برای سیم پیچ کمکی، نمودارهایی به شکل ۱۲ را ارائه می نماید:





شکل ۱۲- نمودارهای حاصل از تحلیل فرکانسی حالت روتور قفل شده موتور موردنظر

برای شرایط بی باری می توان از همان روش تحلیل زمانی استفاده نمود. در این حالت نیز، تحلیل یک بار برای سیم پیچ اصلی و یک بار برای سیم پیچ کمکی با سرعت بی باری اجرا می گردد:  
برای سیم پیچ اصلی:

$$V_{ab1} = V_{NL} - I_{NL} \left( X_{sm} + \frac{X_r}{2} \right) \quad (52)$$

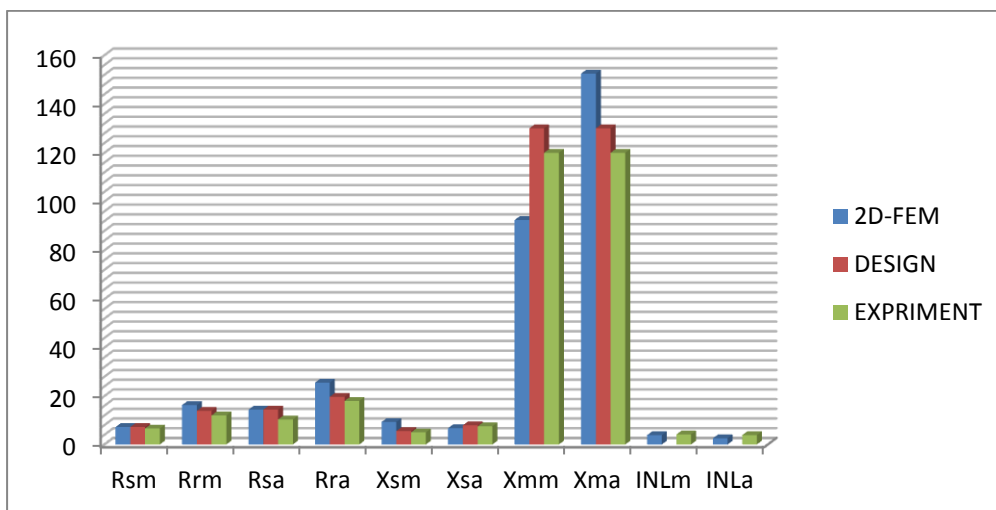
$$X_{mm} = \frac{2 * V_{ab1}}{I_{NL}} \quad (53)$$

و برای سیم پیچ کمکی:

$$V_{ab2} = V_{NL} - I_{NL} \left[ X_{sa} + \frac{X_r}{2} \right] \quad (54)$$

$$X_{ma} = \frac{2 * V_{ab2}}{I_{NL}} \quad (55)$$

مقایسه بین مقادیر واقعی و نتایج الگوریتم طراحی و آزمایش های معمول به صورت نمودار شکل ۱۳ می باشد:



شکل ۱۳- مقایسه پارامترهای مدار معادل بین مقادیر واقعی و نتایج الگوریتم طراحی و آزمایش های معمول



**۶. نتیجه گیری**

با توجه به متن، یک روش کامل طراحی برای موتور تکفاز خازن دائم شار محوری که در منابع بسیار کمی در مورد آن صحبت شده است، ارائه گردید و یک مدل dq و یک مدل حالت دائمی برای این موتور پیشنهاد شد و مدلسازی کاملی شامل حالت دائمی و حالت گذرا، که در هیچ منبعی بدین شکل موجود نبود، ارائه گردید. همچنین مطابقت روش های ذکر شده با روش اجزای محدود، راستی آزمایی گردید. از نتایج حاصله از نمودارها مشخص است که الگوریتم طراحی ارائه شده و مدل حالت دائمی حاصل از آن، در این مقاله، طبق محاسبات انجام شده با مدل واقعی و مدل تحلیلی dq و همچنین مدل اجزای محدود دو بعدی (2D-FEM) مطابقت دارد.

**۷. قدردانی**

در پایان از کارکنان و بخصوص مدیرعامل گروه صنعتی نیروتئوویه، جناب مهندس امیرحسین خسروجردی به جهت همکاری های بی دریغ و اساتید دانشگاه صنعتی شاهرود، دکتر احمد دارابی و دکتر حامد طحانیان کمال تشکر را دارم.

**۸. مراجع**

1. Zahra nasiri-gheidari, Hamid LESANI "A Survey on Axial Flux Induction Motors" PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), R. 88 NR /2012ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), pp.300-305, 2012
2. Mikko Valtonen, "Performance Characteristics Of An Axial-Flux Solid-Rotor-Core Induction Motor" Phd Thesis, Lappeenranta University Of Technology, Lappeenranta, Finland, 2007
3. Benard Capaldi, "THE THEORY AND PERFORMCE OF A. C. AXIAL FLUX MACHINES" A thesis submitted to the University of Warwick for the degree of Doctor of Philosophy submitted to the University of Warwick for the degree of Doctor of Philosophy, October, 1973
۴. زهرا نصیری قیداری، "طراحی بهینه و ساخت موتور القایی کوچک شار محوری"، رساله جهت اخذ درجه دکتری، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲
5. A. Benoudjit, N. Nait Said, "New Dual-Airgap & Radial-Flux Induction Motor For On Wheel Drive Electric Propulsion Systems", IEEE, 1998
6. R Wallace, L Mopan, G Cea, F Perez, "Design And Construction Of Medium Power Axial Flux Induction Motors", IEEE, Pp.260-265
7. Pesari Neelima, Mrs. Ch. Manjeera, Mr. V Ramesh Babu, "Modelling Of Axial Flux Induction Machines And It Application As Differential In Electrical Vehicles", International Journal Of Innovative Research In Advanced Engineering (Ijirae) Volume 1 Issue 12 (December 2014)
8. Vijay Kumar Ghial, Lalit Mohan Saini, And Jasbir Singh Saini, "Parameter Estimation of Permanent-Split Capacitor-Run Single-Phase Induction Motor Using Computed Complex Voltage Ratio", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 2, FEBRUARY 2014
9. Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani, "Using Stator Discharge Current For The Parameter Estimation Of A Single-Phase Axial Flux Induction Motor", scientia iranica d, pp.1794-1801, (2012)
10. Zahra Nasiri-Gheidari, Hamid Lesani, "New Design Solution For Static Eccentricity In Single Stator-Single Rotor Axial Flux Induction Motors", IET Electr. Power Appl., 2013, Vol. 7, pp.523-534
11. D P Kothari, I J Nagrath, "Electric Machines" Forth Edition, Tata Mcgraw Hill Education Private Limited New Delhi, 2010
12. William H. Yeadon, Alan W. Yeadon, "Handbook Of Small Electric Motors", mcgraw-Hill, 2001
۱۳. جواد سلیمانی، عبدالحسین اجلائی، "تئوری، طراحی و تحلیل ماشین های الکتریکی مخصوص"، انتشارات نهر دانش، چاپ اول، ۱۳۹۳
14. Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Optimal Design of Adjustable Air-Gap, Two-Speed, Capacitor-Run, Single-Phase Axial Flux Induction Motors", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 28, NO. 3, SEPTEMBER 2013
15. M.V. Dashpande, "Design & Testing Electrical Machine", Phi Learning, New Delhi, 2010
16. C.C. Chan, "axial-field electrical machines-design and applications" IEEE Transactions on energy conversion, vol. EC-2, No. 2, June 1987, pp.294-300

17. Farid Tootoonchian, Zahra Nasiri-Gheidari, Hamid Lesani, "Design, Analysis, And Implementation Of Extra Low Air-Gap Single-Phase Axial-Flux Induction Motors For Low-Cost Applications", International Transactions On Electrical Energy Systems, 2016
18. K M Vishnu Murthy, "Computer-Aided Design Of Electrical Machines" Bs Publications, 2008
19. P.C. Sen, "Principles Of Electric Machines And Power Electronics", Third Edition, Wiley, 2012
۲۰. حمید لسانی (مترجم)، "طراحی جامع ماشینهای الکتریکی" تألیف آک ساونی، انتشارات دانش و فن، چاپ اول ۱۳۶۱
21. ion boldeasyed a. nasar, "the induction machines design handbook" s e c o n d e d i t i o n, crc press, 2010
22. Surong Huang, Jim Luo, Franco Leonardi, Thomas A. Lipo, "A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999
23. Liu Xinzheng, Su Shaoping, Chen Dunli, "Integrated Cad Software For Axial Flux Induction Machines"
۲۴. علی عراقی، علی رحیمیان پرور، محمد حیدری، احمد معیری، "محاسبه و طراحی موتورهای الکتریکی تکفاز، انیورسال و سیم بندی آرمیچر"، نشر کیفیت، چاپ ششم، ۱۳۸۴
۲۵. دکتر محمدرضا فیضی، کامران خفافی، "ماشینهای الکتریکی مخصوص"، انتشارات دانشگاه تبریز، چاپ اول، ۱۳۸۰
26. Vtu Learning Course, "Design Of Induction Motors", 2012
27. V. N. MITTLE, "DESIGN OF ELECTRICAL MACHINES"
28. M. Ashari, H. Suryatomo, "... Design And Implementation Of Axial Flux Induction Motor Single Stator - Single Rotor For Electric Vehicle Application", Iptek, Journal Of Proceeding Series, Vol. 1, 2014
29. Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, "Analysis Of Electric Machinery And Drive Systems", Second Edition, Wiley Press, 2002
30. Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation Of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, 1998
۳۱. مجتبی میر سلیم، عارف درودی، محمود حالتی املشی (مترجمان)، "تحلیل ماشینهای الکتریکی با روش عناصر محدود"، شپارد جی. سالون، نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر، چاپ دوم، زمستان ۱۳۸۴
32. Nicola Bianchi, "Electrical Machine Analysis Using Finite Elements", CRC Press, 2005
۳۳. دکتر ابوالفضل واحدی، "جزوه طراحی ماشینهای الکتریکی"، بهار ۹۱، دانشگاه علم و صنعت ایران