# طراحی و ساخت موتور سوئیچ رلوکتانس برای کاربرد در کولرهای آبی جهت افزایش راندمان و کاهش مصرف انرژی

مریم بهرامگیری*[۱]، رضا عفت‌نژاد[۲]، مجتبی بابایی[۳]

**تاریخ دریافت مقاله:**
۸۸/۴/۲۰
**تاریخ پذیرش مقاله:**
۸۸/۷/۱۸

**چکیده:**

به دنبال رشد اقتصادی کشور، تقاضا برای مصرف انرژی الکتریکی روبه افزایش است. درحال حاضر موضوع جایگزینی موتورهای جدید نظیر موتور سوئیچ رلوکتانس و موتورهای مغناطیس دائم به جای موتورهای القایی به طور جدی در پژوهشگاه‌های صنعتی دنیا پی‌گیری می‌شود. از دلایل این امر می‌توان به پایین بودن راندمان موتورهای القایی تک‌فاز که در اکثر وسایل خانگی مورد استفاده شده و درصد زیادی از مصرف انرژی را به خود اختصاص داده، نام برد.

موتورهای سوئیچ رلوکتانس یا SRM از خانواده موتورهای رلوکتانس است. از جمله مزایای این موتورها راندمان بالا و ساختار بسیار ساده آن است. جایگزینی موتورهای سوئیچ رلوکتانس و حذف موتورهای القایی تک‌فاز در کولر آبی که یکی از پرکاربردترین لوازم خانگی است، باعث کاهش مصرف انرژی کولر و نیز کنترل‌پذیری بهتر آن می‌شود و می‌توان میزان خنک‌کنندگی کولر را با یک پیچ تنظیم، کنترل کرد.

**کلمات کلیدی:**
موتور سوئیچ رلوکتانس، روش مسیرهای شار مغناطیسی، روش المان محدود، بهینه‌سازی

۱) پژوهشگاه نیرو ـ نویسندهٔ مسئول
۲) دانشگاه آزاد اسلامی ـ واحد کرج
۳) دانشگاه آزاد اسلامی ـ واحد شهرری

**مقدمه**

کولر آبی یکی از پرکاربردترین لوازم خانگی است و مصرف انرژی به نسبت زیادی دارد. موتورهای به کار رفته در کولر آبی غالباً القایی تک‌فاز بوده و راندمان آن کمتر از حد استاندارد است. جایگزینی موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کولر آبی و حذف موتورهای القایی تک‌فاز در آن، باعث افزایش راندمان یا بازده کولر و کاهش مصرف انرژی آن می‌شود.

از سوی دیگر موتورهای سوئیچ رلوکتانس از خانواده موتورهای رلوکتانس است و ساختار بسیار ساده‌ای دارد. این موتور دارای قطب‌های برجسته در روتور و استاتور بوده و تنها روی قطب‌های استاتور دارای سیم‌پیچ است. نداشتن سیم‌پیچ یا آهن‌ربا روی روتور و نیز کنترل پذیری عالی سرعت، باعث انتخاب قطعی آن برای درایوهای با سرعت متغیر و پرسرعت شده است.

در این مقاله روند طراحی و ساخت نمونه‌ای از موتور سوئیچ رلوکتانس برای جایگزینی در کولر آبی بیان می‌شود. موتور طراحی شده دارای ساختار ۸/۶ بوده یعنی دارای ۸ قطب استاتور و ۶ قطب روتور است. این موتور ۴ فاز بوده و توان خروجی آن ۳۰۰ وات است. سرعت نامی موتور ۱۴۲۵ دور در دقیقه درسرعت زیاد و ۹۲۵ دور در دقیقه در سرعت کم است. این موتور دارای درایو الکترونیک برای راه‌اندازی و کارکرد است. طراحی ابعاد موتور به گونه‌ای صورت گرفته که موتور در همان پوسته موتورهای القایی فعلی مونتاژ شده و جایگزینی آن در کولر بدون هیچ تغییری در ساختار و محل نصب موتور بر روی کولر انجام می‌گیرد. توجیه اقتصادی جایگزینی این موتور در کولر آبی در پیوست ارائه شده است.

## طراحی الکترومغناطیسی موتور سوئیچ رلوکتانس

ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس به علت کاربردهای متنوع دارای ساختارهای مختلفی است. در این ساختارها تعداد قطب‌های روتور و استاتور متغیر است. در کاربردهای معمول قطب‌های استاتور از قطب‌های روتور به اندازهٔ دو قطب بیشتر در نظر گرفته می‌شود. برای طراحی و ساخت این موتور، با توجه به توانایی‌ها و امکانات موجود در ساخت و در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، به ناچار محدودیت‌هایی در انتخاب ابعاد و برخی پارامترها در نظر گرفته شده است. فرضیاتی در صورت مسئله در نظر گرفته شده که برخی از آن‌ها عبارت است از:

الف) اندوکتانس متقابل بین فازها و اثر انتهای سیم‌پیچی نادیده گرفته می‌شود.

ب) فازها به صورت متقارن است.

ج) مقدار چگالی شار نقطه زانویی منحنی B-H ورقه های مغناطیسی پیشنهادی که از نوع (V800-50A) است، برابر با ۱/۶۸ تسلا است.

د) ضریب پرشوندگی سیم‌پیچ‌ها برابر با ۰/۷ است.

با کاهش طول فاصله هوایی در موتور سوئیچ رلوکتانس، مقدار گشتاور متوسط بیشتر خواهد شد [۱ و ۲]. بنابراین، برای رسیدن به گشتاور متوسط، با کاهش طول فاصله هوایی می‌توان حجم آهن و یا مس بکار رفته در موتور را کاهش داد. در جدول (۱) ابعاد و مشخصات موتور که به صورت پیش‌فرض در طراحی مورد استفاده قرار گرفته، ارائه شده است.

**جدول ۱: ابعاد و مشخصات موتور**

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| توان نامی خروجی | ۳۰۰ وات |
| سرعت نامی (دورتند) | ۱۴۲۵ دور در دقیقه |
| سرعت نامی (دورکند) | ۹۵۰ دور در دقیقه |
| ولتاژ متناوب ورودی | ۲۲۰ ولت |
| قطر بیرونی استاتور | ۱۵۷/۲ میلی‌متر |
| کمترین اندازه طول فاصله هوایی | ۰/۳۵ میلی‌متر |
| قطر محور روتور | ۱۷ میلی‌متر |
| تغییرات چگالی جریان | ۵ تا ۱۲ (آمپر/میلی‌مترمربع) |

در قدم بعد با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به راه‌اندازی، تموج گشتاور و طراحی سیستم درایو و کنترل قطع و وصل فازها، موتور چهار فاز با ساختار متعارف ۸/۶ ( $N_s/N_r$) انتخاب شد که در آن $N_s$ و $N_r$ به ترتیب تعداد قطب‌های استاتور و روتور است[۳].

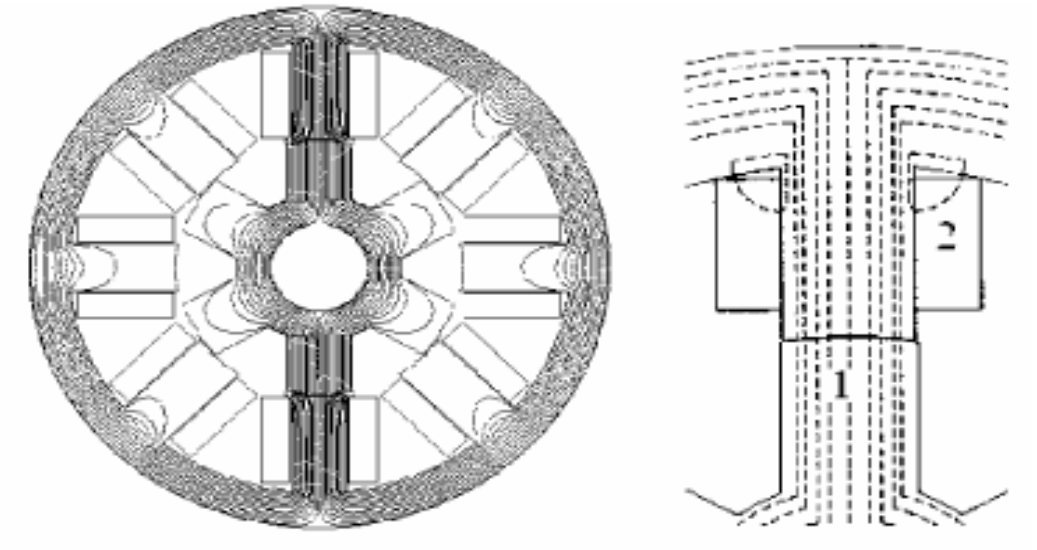
برای تعیین اندازه زاویه کمان قطب روتور و استاتور ترکیب‌های بسیار زیادی را می‌توان انتخاب کرد و البته در محدوده خاصی باید قرار گیرد که این محدوده Feasible Triangle نامیده می‌شود [۴ و ۵]. در طرح اولیه، کمان قطب استاتور ($\beta_s$) برابر با ۲۱ درجه و اندازه کمان قطب روتور ($\beta_r$) برابر با ۲۳ درجه انتخاب می‌شود.

برای تعیین تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز، اولین قدم محاسبه پیک جریان هر فاز است. برای این منظور از رابطه (۱) می‌توان استفاده کرد. در این رابطه $P_{out}$، $k_e$، $k_d$ و $V_{dc}$ به ترتیب توان خروجی نامی، راندمان در سرعت نامی، duty cyde و ولتاژ dc سیستم است:

$$P_{out} = k_e k_d V_{dc}\, i_p \qquad (۱)$$

با فرض آن که طراحی موتور برای راندمان حداقل برابر با ۸۰ درصد انجام می‌شود، $K_d$ =۰/۵ در نظر گرفته می‌شود، پیک جریان نامی برابر با ۳/۵ آمپر قابل محاسبه است[۴ و ۵].

نظر به اینکه که کارکرد مناسب موتورهای سوئیچ رلوکتانس در شرایط اشباع زیاد انجام می‌شود، لذا انتخاب تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز با توجه به پیک جریان نامی می‌باید به گونه‌ای صورت گیرد که آمپر دور مورد نیاز را برای این منظور فراهم نماید. در موقعیت هم‌راستایی در موتور سوئیچ رلوکتانس، به دلیل کاهش طول فاصله هوایی، ماکزیمم چگالی شار در قطب‌های روتور و استاتور به وجود می‌آید. بنابراین، تعیین تعداد دور سیم‌پیچی با استفاده از روش مسیرهای شار در این موقعیت انجام می‌شود. در شکل (۱)، مسیرهای شار مغناطیسی در موقعیت هم راستایی نشان داده شده است[۶].




**شکل۱: مسیرهای شار مغناطیسی در موقعیت هم راستایی در موتور SR ۸/۶**

با فرض چگالی شار قطب استاتور برابر با ۱/۷۲ تسلا و جریان تحریک برابر با مقدار نامی، تعداد دور سیم پیچی از رابطه (۲) به دست می آید. این رابطه بر روی مسیر شار ۱ نوشته شده و اثر شار نشتی در آن در نظر گرفته نشده است [۴ و ۵]:

$$F_{aligned} = T_{ph} \times i_p = 2\times(H_s l_s + H_r l_r) + \frac{B_g A_g}{P_a} + \frac{1}{2} H_{rc} l_{rc} + \frac{1}{2} H_y l_y \qquad (۲)$$

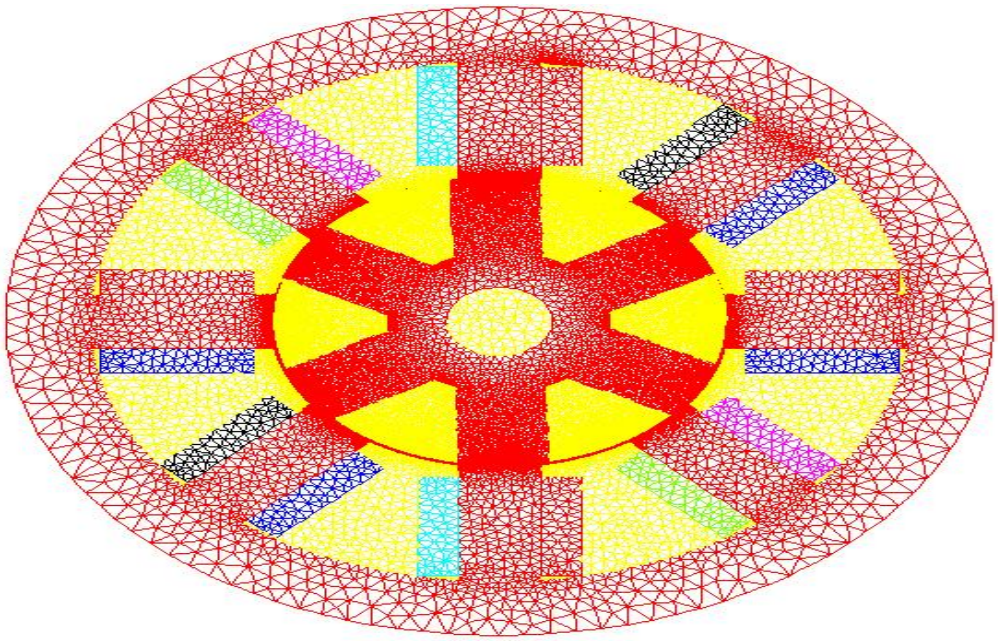
که در آن $F_{aligned}$ آمپردور مسیر شار ۱ است و $H_s l_s$ ، $H_r l_r$ ، $H_{rc} l_{rc}$ و $H_y l_y$ به ترتیب حاصل‌ضرب طول و شدت میدان مغناطیسی در قطب‌های استاتور، قطب‌های روتور، هسته روتور و یوغ استاتور است. $B_g$، $A_g$ و $P_a$ نیز به ترتیب

چگالی شار مغناطیسی، سطح مقطع و پرمئانس مسیر شار ۱ در فاصله هوایی است. با ثابت بودن مقدار چگالی شار در قطب استاتور (۱/۷۲ تسلا)، تعداد دور سیم پیچی با توجه به رابطه (۲) مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

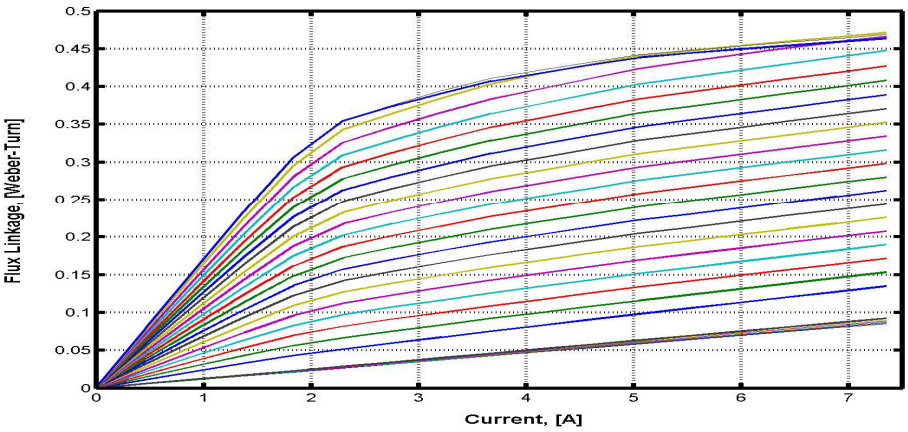
تعیین تعداد دور سیم‌پیچی‌های فاز استاتور، پس از تعیین ابعاد اصلی موتور سوئیچ رلوکتانس انجام می‌شود. کلیه معادلات لازم جهت طراحی سیم‌پیچی (با توجه به سیم‌های استاندارد AWG) برای تعیین سطح مقطع و ملاحظات مربوط به جای شدن سیم پیچی ها در درون شیارها، در [۵] ارائه شده است. به این ترتیب تعداد دور سیم‌پیچی در هر فاز، چگالی جریان و سطح مقطع استاندارد هادی‌ها به دست می‌آید.

## مدل‌سازی موتور توسط نرم‌افزار المان محدود و بهینه‌سازی پارامترهای آن

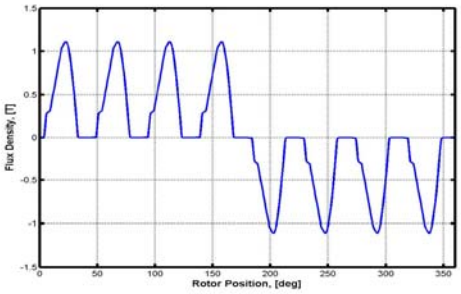
پس از تعیین مقادیر اولیه ابعاد و پارامترهای موتور SR با استفاده از روابط کلاسیک و محدودیت‌های اعمال شده از طرف شرکت سازنده، طرح اولیه در نرم‌افزار المان محدود FLUX2D مدل‌سازی شده و مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار گرفته است. در شکل (۲) مدل‌سازی و مش‌بندی موتور، در شکل (۳) مشخصه‌های شار پیوندی-جریان تحریک در موقعیت‌های مختلف روتور و در شکل (۴) موج‌های چگالی شار در تمام نقاط موتور نظیر قطب‌های استاتور، قطب‌های روتور، یوغ استاتور و هسته روتور در یک دور گردش کامل روتور نشان داده شده است.



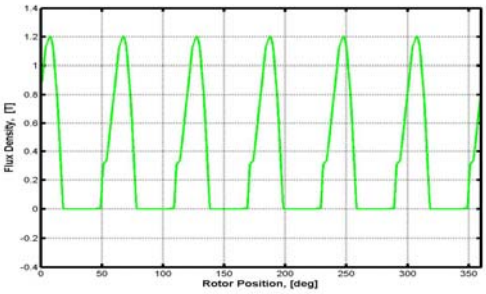
**شکل ۲: مدل‌سازی و مش‌بندی موتور سوئیچ رلوکتانس ۸/۶**



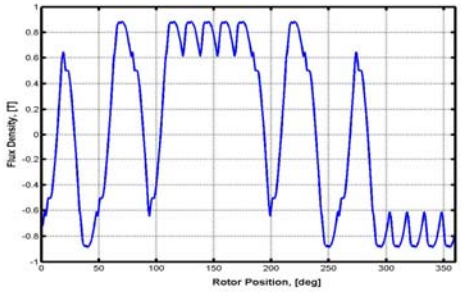

**شکل۳: مشخصه‌های شار پیوندی-جریان تحریک در موقعیت‌های مختلف روتور**



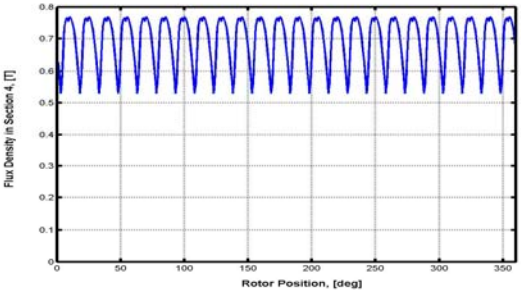

(ب)




(الف)




(د)

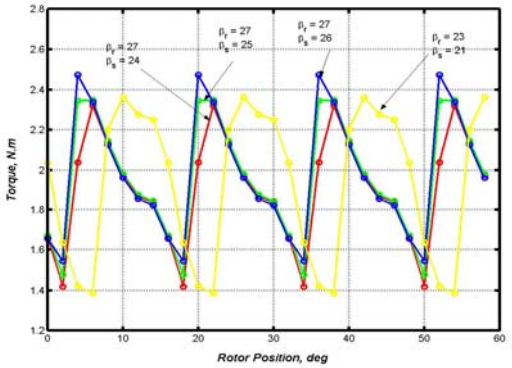



(ج)

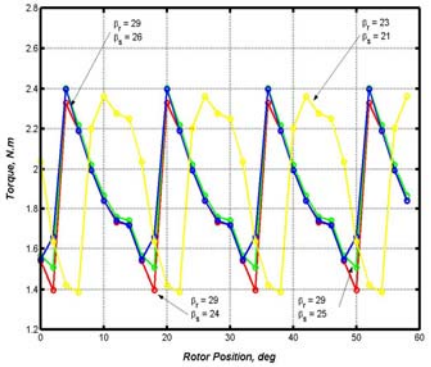
**شکل۴: شکل موج‌های چگالی شار در الف: قطب‌های استاتور، ب: قطب‌های روتور، ج: یوغ استاتور و د: هسته روتور در یک دور گردش کامل روتور**

پس از انجام تحلیل الکترومغناطیسی بر روی طرح اولیه موتور، تحلیل حساسیت برای انتخاب دقیق و مناسب آن انجام می‌شود. برای این منظور بعضی از پارامترها و ابعاد اصلی موتور تغییر داده شده و اثر آن بر روی گشتاور خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

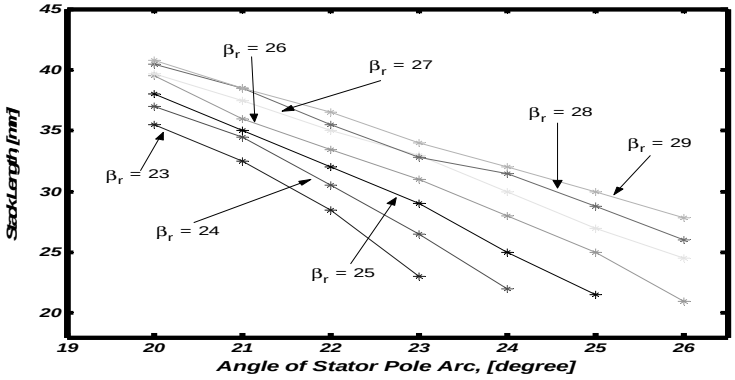
در این مقاله برای به دست آوردن نتایج مطمئن و دقیق، از روش المان محدود استفاده می‌شود. اصلی‌ترین عیب این روش، زمان‌بر بودن تحلیل آن است. جهت ادامه کار، تغییرات کمان‌های قطب رتور و استاتور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور طرح‌هایی با کمان قطب استاتور از ۲۴ تا ۲۶ درجه و تغییرات کمان قطب رتور از ۲۷ تا ۲۹ درجه مدل‌سازی و تحلیل شده و منحنی گشتاور چهار فاز آن در شکل‌های (۵) و (۶) با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل (۷) تغییرات طول استک برحسب تغییرات کمان قطب استاتور در کمان‌های مختلف قطب روتور برای تولید گشتاور متوسط ثابت نیز نشان داده شده است.




**شکل ۵: مقایسه گشتاور چهار فاز با تغییرات زوایای قطب روتور و استاتور**

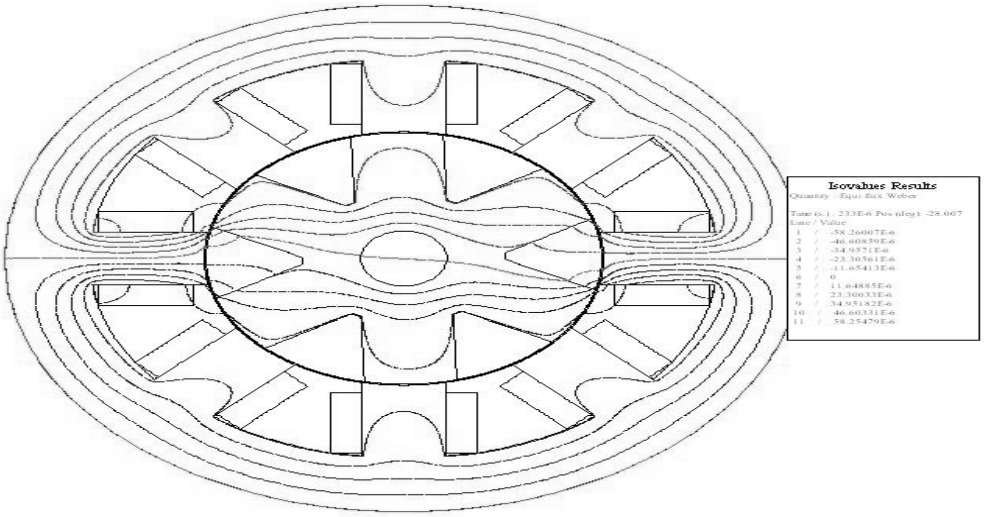



**شکل۶: مقایسه گشتاور چهار فاز با تغییرات زوایای قطب روتور و استاتور**

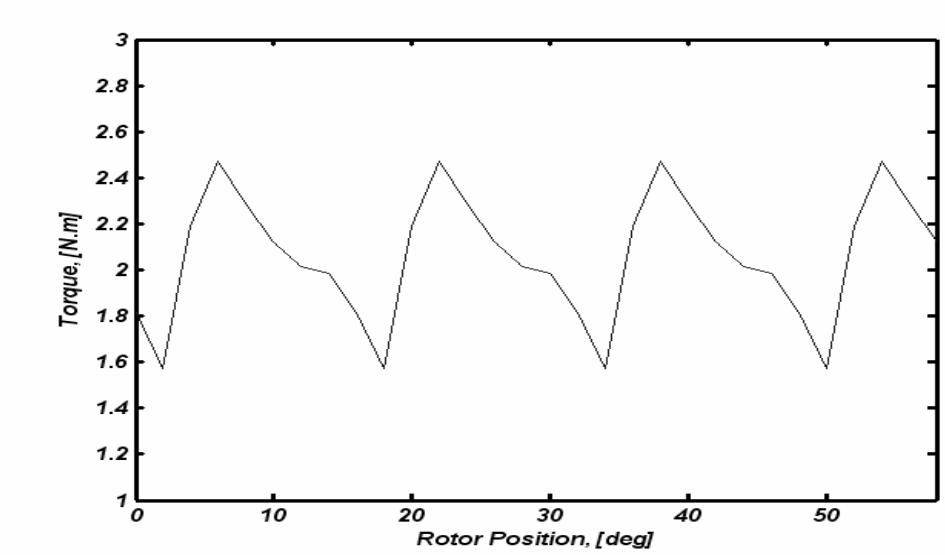



**شکل ۷: تغییرات طول استک برحسب تغییرات کمان قطب استاتور در کمان‌های مختلف قطب روتور برای تولید گشتاور متوسط ثابت**

پس از بررسی نتایج به‌دست آمده کمان قطب روتور برابر ۲۷ و کمان قطب استاتور برابر ۲۴ درجه انتخاب می‌شود. بدین ترتیب دیگر پارامترهای هندسی موتور برای رسیدن به گشتاور مورد نیاز نیز به دست می‌آید. در شکل (۸) طرح نهایی موتور به‌همراه خطوط شار مغناطیسی و در شکل (۹) گشتاور چهار فاز در این طرح دیده می‌شود.




**شکل ۸: طرح نهایی موتور به‌همراه خطوط شار مغناطیسی**



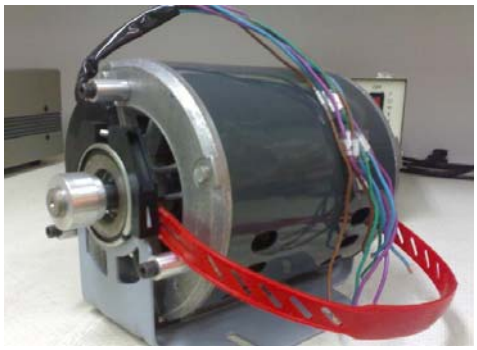

**شکل ۹: گشتاور چهار فاز در طرح نهایی موتور**

### ساخت موتور و نصب آن بر روی کولر آبی

پس از تعیین پارامترهای هندسی موتور و تحلیل‌های نهایی الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی آن، نقشه‌های ساخت موتور آماده شد و موتور توسط یکی از سازندگان الکتروموتورهای کولر ساخته شد. در طی مراحل ساخت روتور و استاتور وایرکات شد و سیم‌بندی‌های استاتور مطابق شکل (۱۰) در درون شیارها جاسازی شد. شفت، پوسته و درپوش‌ها نیز مطابق شکل تهیه شد.

**شکل ۱۰: نمایی از روتور، استاتور سیم‌بندی‌شده، شفت، پوسته و درپوش‌های موتور**

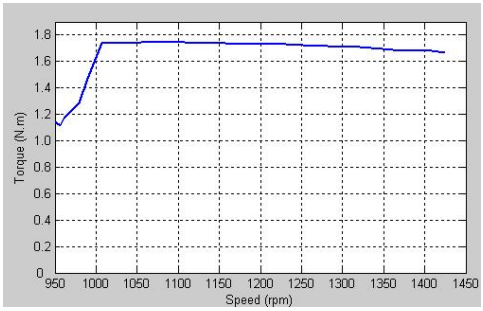
گفتنی است درایور این موتور نیز طراحی و ساخته شد. تصاویری از موتور ساخته‌شده و درایور آن در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



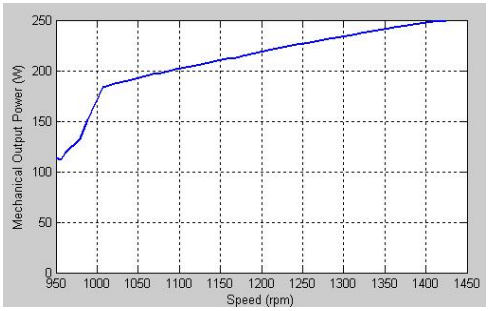
**شکل۱۱: موتور سوئیچ رلوکتانس ساخته شده**

**شکل۱۲: درایور موتور سوئیچ رلوکتانس**

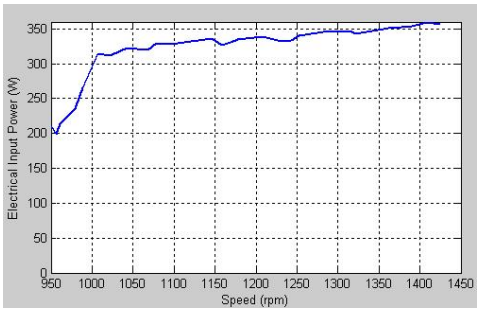
پس از نصب موتور بر روی کولر و راه‌اندازی آن توسط برد الکترونیک، آزمون‌های کارکرد، حرارتی و صوتی بر روی آن انجام گرفت. در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) منحنی‌های گشتاور خروجی، توان مکانیکی خروجی، توان الکتریکی ورودی و راندمان موتور بر حسب سرعت نشان داده شده است.



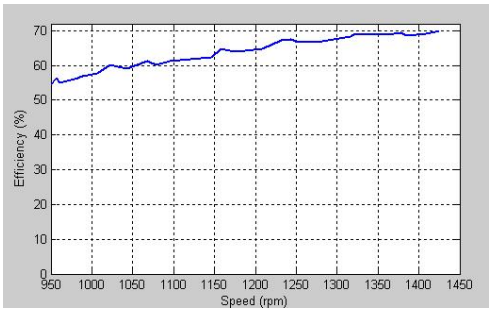

**شکل ۱۳: منحنی گشتاور خروجی بر حسب سرعت**




**شکل ۱۴: منحنی توان مکانیکی خروجی بر حسب سرعت**




**شکل ۱۵: منحنی توان الکتریکی ورودی بر حسب سرعت**




**شکل ۱۶: منحنی راندمان بر حسب سرعت**

با توجه به منحنی‌های فوق، راندمان موتور در سرعت زیاد برابر ۷۰ و در سرعت کم برابر ۵۶/۵ درصد است که افزایش راندمان به میزان ۲۰ درصد در سرعت زیاد و ۲۶/۵ درصد در سرعت کم ملاحظه می‌شود. اعداد فوق نشان می‌دهد که جایگزینی موتور سوئیچ رلوکتانس به جای موتورهای القایی در کولرهای آبی باعث کاهش ۲۸/۶ درصد مصرف انرژی الکتریکی در سرعت زیاد و ۴۶/۸ درصد در سرعت کم می‌شود.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، روند طراحی و ساخت یک نمونه موتور سوئیچ رلوکتانس ۸/۶ با مقادیر نامی مشخص، جهت استفاده در کولرهای آبی ارائه شد. پس از تعیین پارامترهای بهینه موتور و تحلیل‌های نهایی الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی آن، نقشه‌های ساخت موتور آماده شد و موتور توسط یکی از سازندگان الکتروموتورهای کولر ساخته شد.

از طرف دیگر درایور موتور نیز طراحی و ساخته شد این موتور به همراه درایو آن بر روی کولر نصب و راه‌اندازی شده است. گفتنی است تحلیل قابلیت حرارتی و مکانیکی موتور، نحوه تهیه نقشه‌های ساخت و نیز روند طراحی و ساخت درایور در این مقاله ارائه نشده است.

نتایج حاصل از آزمایش‌های موتور نشان می‌دهد راندمان موتور در سرعت زیاد برابر ۷۰ و در سرعت کم برابر ۵۶/۵ درصد است که ۲۰ درصد افزایش راندمان در سرعت زیاد و ۲۶/۵ درصدی در سرعت کم ملاحظه می‌شود. اعداد فوق نشان می‌دهد که جایگزینی موتور سوئیچ رلوکتانس به جای موتورهای القایی در کولرهای آبی باعث کاهش ۲۸/۶ درصد مصرف در سرعت زیاد و ۴۶/۸ درصد در سرعت کم می‌شود.

با توجه به وجود دانش فنی یا فن آگاهی طراحی و ساختار موتور، می‌توان طراحی آن را برای کاربردهای دیگر مانند ماشین لباسشویی، جارو برقی و نیز موتورهای صنعتی انجام داد.

نتایج بکارگیری این موتور عبارت است از: افزایش نسبت گشتاور بر جرم موتور و در نتیجه افزایش راندمان موتور، قابلیت تولید گشتاور راه اندازی زیاد، کنترل آسان سرعت موتور، افزایش قابلیت اطمینان و استحکام موتور، قابلیت کار در شرایط سخت مانند دماهای زیاد و یا قطع یک فاز، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری و تغییر میزان خنک کنندگی کولر با یک پیچ تنظیم به طور پیوسته.

## سپاسگزاری

این مقاله از پروژه **"طراحی و ساخت یک نمونه موتور سوئیچ رلوکتانس و سیستم درایو برای استفاده در کولر آبی"** برگرفته شده و کارفرمای آن معاونت انرژی وزارت نیرو بوده و با همکاری شرکت الکتروژن به انجام رسیده است.

## منابع

[1] F.Sahin, H.B.Erton, K.Leblebicioglu,2000 “Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motor”, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.15, No.1, pp.

[2] J.Faiz, J.W.Finch, 1993. “Aspect of Design Optimization for Switched Reluctance Motor”, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.8, No.4, pp.

[3] N. K. Sheth, K. R. Rajagopal, 2005. “Calculation of the Flux-Linkage Characteristics of a Switched Reluctance Motor by Flux Tubes Method”, IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 41, No.10.

[4] P.Vijayraghavan, 2001. “Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives”, PhD Thesis, Electrical Engineering Department, Virginia Polytechnic Institute and State University.

[5] R.Krishnan, 2001. Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Analysis, Design and Application, CRC Press.

[6] T.J.E.Miller, 1996. Electronic Control to Switched Reluctance Machines, Clarendon Press, Oxford.

**پیوست: توجیه اقتصادی جایگزینی موتور جدید در کولر**

نتایج آزمون‌ها نشان دادند راندمان موتور در سرعت زیاد برابر ۷۰ و در سرعت کم برابر ۵۶/۵ درصد است که افزایش راندمان به میزان ۲۰ درصد در سرعت زیاد و ۲۶/۵ درصد در سرعت کم ملاحظه می‌شود. اعداد فوق نشان می‌دهد جایگزینی موتور سوئیچ رلوکتانس به جای موتورهای القایی در کولرهای آبی باعث کاهش مصرف برق به میزان ۲۸/۶ درصد در سرعت زیاد و ۴۶/۸ درصد در سرعت کم می‌شود.

اگر فرض شود هر کولر ۱۳۵ روز در سال و در هر روز در حدود ۱۰ ساعت در روز روشن باشد که نیمی از ساعات کار آن در سرعت زیاد و نیمی دیگر در سرعت کم باشد، میزان مصرف هر کولر در سال برابر ۶۱۸/۳ کیلووات ساعت خواهد بود.

جایگزینی موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کولرهای آبی باعث می‌شود که میزان مصرف برق هر کولر در سال برابر ۴۰۲/۳ کیلووات ساعت باشد. و این به معنای کاهش ۳۵ درصد از مصرف انرژی الکتریکی است.

در حال حاضر برای مصرف‌کنندگان خانگی، قیمت تمام شده برق برای هر کیلووات ساعت ۷۷۳ ریال و متوسط قیمت فروش هر کیلووات ساعت برای مصرف‌کنندگان معمولی خانگی حدود ۱۱۵ ریال است. به دین ترتیب، میزان یارانهٔ پرداختی از طرف دولت ۶۵۸ ریال برای هر کیلووات ساعت است. اگر فرض شود ۱/۵ میلیون کولر سالانه وارد بازار شود و دارای موتورهای جدید باشد، کاهش ۳۵ درصد از مصرف برق موتور باعث صرفه‌جویی معادل ۳۲۵/۶ (۰/۳۵*۶۱۸/۳*۱٫۵۰۰٫۰۰۰) گیگاوات ساعت می‌شود که یارانه پرداختی آن برابر ۲۳۱٫۵۹۲٫۰۰۰٫۰۰۰ ریال در سال است که رقم قابل ملاحظه‌ای است.