

## **Noise Reduction in Switched Reluctance Machine Using Shape Optimization and Design of Experiment Algorithm**

**Omid Naderi Samani<sup>1</sup>, Babak Ganji<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Isfahan, Iran

### **Abstract:**

In the present paper, the shape optimization is done for the switched reluctance machine to decrease the noise and vibration of this motor. The main reason for noise and vibration in the switched reluctance machine is the instantaneous radial force which is applied on the stator poles of the machine. Using the ANSYS finite element package, an electromagnetic simulation model has been developed for the switched reluctance motor by which the instantaneous radial force applied to stator poles and the natural frequencies are obtained precisely from the done electromagnetic and modal analyses. Applying the developed simulation model to a 6/4 switched reluctance motor, the simulation results are presented and they are validated using the given experimental results. To reduce the noise of the considered switched reluctance motor, a different structure is suggested for the stator and the optimal design parameters are determined using the developed simulation model and different algorithms are proposed in the design of experiment method.

**Keywords:** Finite element analysis, vibration, switched reluctance motor, noise.

## کاهش نویز در ماشین سوئیچ رلوکتانس با تغییر ساختار هندسی ماشین به کمک روش طراحی آزمایش‌ها

امید نادری سامانی<sup>۱</sup>، بابک گنجی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

omidns2012@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

bganji@kashanu.ac.ir

**چکیده:** در مقاله حاضر، روندی برای بهینه‌سازی شکل استاتور موتور سوئیچ رلوکتانس به منظور کاهش ارتعاش و نویز صوتی در این موتور معرفی شده است. نیروی شعاعی اعمال‌شده بر روی قطب استاتور سبب جابه‌جایی استاتور و ارتعاش ماشین و باعث تولید نویز صوتی می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ANSYS، الگوی شبیه‌سازی برای موتور سوئیچ رلوکتانس معرفی شده است که در آن با انجام تحلیل‌های الکترومغناطیسی و مودال نیروی شعاعی لحظه‌ای وارد بر قطب استاتور و فرکانس‌های طبیعی استاتور با دقت زیادی پیش‌بینی می‌شوند. با اعمال الگوی شبیه‌سازی ایجادشده به یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۶۷، نتایج شبیه‌سازی، ارائه و برای اطمینان از صحت نتایج با داده‌های اندازه‌گیری مقایسه شده‌اند. همچنین، برای کاهش نویز موتور مزبور سوئیچ رلوکتانس، یک ساختار متفاوت برای استاتور پیشنهاد شده است و پارامترهای طراحی بهینه موتور به کمک الگوی شبیه‌سازی ایجادشده و الگوریتم‌های مختلف مطرح در روش طراحی آزمایش‌ها تعیین شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** ارتعاشات، تحلیل المان محدود، موتور سوئیچ رلوکتانس، نویز صوتی

### ۱- مقدمه

آهن ساخته شده است و هیچ‌گونه تحریکی روی آن وجود ندارد. این ویژگی باعث می‌شود که از موتور مزبور به خوبی در شرایط سخت و سرعت‌های بالا استفاده شود. قابلیت اطمینان بالای این موتور نیز به دلیل مجزای بودن سیم‌پیچ‌های تحریک و امکان عملکرد موتور در صورت خارج شدن یکی از فازها است. علت اصلی کمتر استفاده شدن موتور سوئیچ رلوکتانس در صنایع و رقابت نکردن آن با سایر موتورها، سروصدای زیاد این موتور است. عوامل اصلی ایجاد سروصدا در موتور سوئیچ رلوکتانس، تموج گشتاور و نویز مکانیکی هستند [۱].

موتور سوئیچ رلوکتانس از جمله موتورهایی است که به دلیل مزایای زیادش، همچون ساختار ساده و مقاوم، بازده زیاد، قابلیت اطمینان زیاد و عملکرد مناسب برای رنج وسیعی از سرعت، در بسیاری از کاربردها به نحو شایسته‌ای استفاده می‌شود. موتور سوئیچ رلوکتانس رتوری دارد که از

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۴

نام نویسنده مسئول: بابک گنجی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - کاشان - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گشتاور الکتریکی در موتور سوئیچ رلوکتانس براساس تزریق جریان به یکی از فازها و حرکت رتور در جهت کم شدن رلوکتانس مسیر و افزایش اندوکتانس فاز به وجود

در مقاله حاضر، الگوسازی الکترومغناطیسی - نویز موتور سوئیچ رلوکتانس به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ANSYS مطرح می‌شود. با توجه به اینکه پیش‌بینی دقیق نیروی شعاعی لحظه‌ای وارد بر قطب استاتور به عنوان عامل اصلی تولید نویز لازم است، در الگوسازی الکترومغناطیسی انجام‌گرفته نیروی لحظه‌ای از تحلیل گذرای دوبعدی تعیین می‌شود. الگوی الکترومغناطیسی مزبور به صورت پارامتری به زبان برنامه‌نویسی پارامتری ANSYS ایجاد شده است و به راحتی برای طراحی‌های مختلف انواع مرسوم این موتور استفاده می‌شود. همچنین در الگوسازی نویز معرفی شده برای موتور سوئیچ رلوکتانس میزان ارتعاش موتور حاصل از نیروی شعاعی لحظه‌ای وارد بر قطب‌های استاتور از تحلیل مودال به روش اجزاء محدود سه‌بعدی محاسبه می‌شود. در این الگوسازی، مودهای فرکانسی و شکل مودها از تحلیل مودال تعیین می‌شوند. با استفاده از الگوهای الکترومغناطیسی و نویز ایجادشده، نتایج شبیه‌سازی برای موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ نمونه ارائه می‌شوند. به منظور کاهش نویز موتور مدنظر، ساختار متفاوت برای الگوی هندسی استاتور پیشنهاد می‌شود و پارامترهای هندسی بهینه به کمک روش طراحی آزمایش‌ها به دست می‌آیند. در ادامه، ابتدا الگوی شبیه‌سازی الکترومغناطیسی - نویز ایجادشده در بخش دوم معرفی می‌شوند. با استفاده از الگوی شبیه‌سازی مزبور، نتایج شبیه‌سازی برای یک موتور ۶/۴ موجود در بخش سوم ارائه می‌شوند و سپس ساختار پیشنهادی برای کم کردن نویز موتور سوئیچ رلوکتانس، معرفی و در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌شود.

## ۲- الگوی شبیه‌سازی

الگوی شبیه‌سازی معرفی شده از دو بخش جداگانه تشکیل شده است. این بخش‌ها تحلیل الکترومغناطیسی دوبعدی برای پیش‌بینی نیروی شعاعی و تحلیل مودال برای تعیین فرکانس‌های طبیعی استاتور و محاسبه میزان ارتعاشات تولیدی ناشی از نیروی شعاعی را شامل می‌شوند. در الگوی شبیه‌سازی مزبور، ساختار هندسی موتور به صورت الگوی پارامتری ایجاد شده است و شعاع بخش‌های مختلف، کمان

می‌آید. گشتاور تولیدی با تحریک پی در پی فازها، حرکت رتور را باعث خواهد شد. در هنگام تحریک یک فاز، نیروی جاذبه‌ای قوی بین قطب استاتور تحریک می‌شود و قطب رتور مجاور به وجود می‌آید. نویز و ارتعاش در این موتور اساساً به دلیل نیروی شعاعی اعمالی از طرف قطب‌های رتور به قطب‌های استاتور است [۲].

به دلیل اهمیت مسئله نویز در موتور سوئیچ رلوکتانس، تحقیقات درخور توجه‌ای در سه دهه گذشته برای کم کردن نویز این موتور، هم در زمینه سیستم کنترل [۲-۴] و هم روی طراحی ماشین [۵-۱۲] انجام گرفته‌اند؛ برای نمونه، در [۵-۶] با در نظر گرفتن ساختارهای متفاوتی برای قطب‌های استاتور و بررسی آنها، مناسب‌ترین شکل قطب استاتور برای بهبود نویز موتور سوئیچ رلوکتانس به دست آمده است. همچنین با اصلاح ساختار هندسی استاتور و استفاده از مواد غیرمغناطیسی نگه‌دارنده سیم‌پیچی در فضای بین قطب‌ها، روشی برای کاهش نویز در [۷] مطرح شده است. با انجام مقایسه‌ای بین دو موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ و ۱۲/۸ در [۸]، مشاهده شد که نویز موتور ۱۲/۸ کمتر است. در [۹-۱۰] چندین توپولوژی مختلف برای بدنه استاتور در نظر گرفته شده و بهترین ساختار برای حداقل کردن نویز پیشنهاد شده است. مورب کردن قطب‌های رتور و استاتور در [۱۱] روشی مؤثر برای کاهش نویز در موتور سوئیچ رلوکتانس معرفی شده است. الگوسازی الکترومغناطیسی - نویز موتور سوئیچ رلوکتانس به روش اجزاء محدود در [۱۲] انجام شده است که با استفاده از آن، فشار صوتی تولیدی محاسبه می‌شود. برای کاهش نویز موتور در [۱۳]، مقادیر بهینه برخی پارامترهای هندسی استاتور که در مشخصات (Data sheet) تمامی موتورهای سوئیچ رلوکتانس مرسوم، پارامترهای طراحی استاندارد هستند، به کمک روش سطح پاسخ و تحلیل موتور از روش اجزاء محدود تعیین می‌شوند. علاوه بر انجام بهینه‌سازی طراحی مزبور در [۱۴]، برای کاهش بیشتر نویز موتور سوئیچ رلوکتانس، تعدادی نگه‌دارنده سیم‌پیچی بین قطب‌های استاتور به کار می‌رود که درحقیقت استحکام بدنه استاتور را افزایش می‌دهد. با وجود کارهای انجام شده، هنوز مشکل نویز موتور سوئیچ رلوکتانس به صورت کامل مرتفع نشده است و لازم است تحقیقات بیشتری در این زمینه صورت گیرد.

حداکثر جابه‌جایی مطابق شکل (۲-ب) بین  $10^{-5} \times 3/83$  و  $10^{-5} \times 1/03$  متر است.

جدول (۱): مشخصات موتور سوئیچ رلوکتانس [۸]

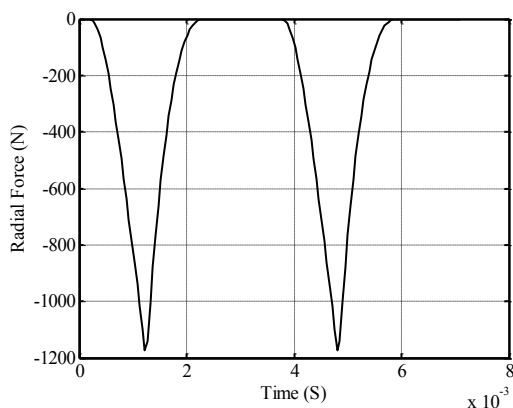
قطر بیرونی استاتور	۱۲۵ میلی‌متر
قطر داخلی استاتور	۱۰۰ میلی‌متر
قطر بیرونی رتور	۶۳ میلی‌متر
قطر داخلی رتور	۴۱ میلی‌متر
فاصله هوایی	۰/۳۵ میلی‌متر
قطر شفت	۲۱ میلی‌متر
طول محوری	۹۰ میلی‌متر
کمان قطب استاتور	۳۰ درجه
کمان قطب رتور	۳۲ درجه
تعداد دور سیم‌پیچی بر قطب	۷۸

جدول (۲): خواص مکانیکی استاتور [۱۵]

ضریب یانگ	$2/07 \times 10^{11}$ نیوتن بر مترمربع
ضریب پواسون	۰.۳
چگالی حجمی	۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

جدول (۳): نقطه کار مورد نظر

زاویه روشن‌شدن	۱۵ درجه مکانیکی
زاویه خاموش‌شدن	۳۰ درجه مکانیکی
سرعت	۳۶۰۰ دور بر دقیقه



شکل (۱): شکل موج نیروی شعاعی لحظه‌ای پیش‌بینی شده

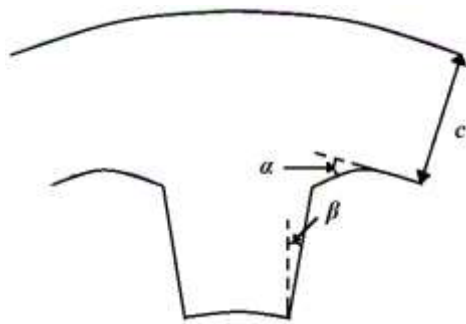
قطب‌ها و طول محوری ماشین، پارامترهای هندسی انتخاب شده‌اند. با کویلاژ مدار الکتریکی خارجی به الگوی اجزاء محدود و انجام تحلیل گذرا، نیروی شعاعی وارد بر قطب‌های استاتور در الگوسازی الکترومغناطیسی ایجادشده پیش‌بینی می‌شود. در الگوسازی انجام‌گرفته برای تحلیل مودال به منظور پیش‌بینی فرکانس و شکل مودهای سیستم، از المان‌های PLANE182 و FLUID29 استفاده می‌شود و در مرحله تخصیص مواد ضریب یانگ، ضریب پواسون و جرم حجمی استاتور برای سطوح مختلف ایجادشده مشخص می‌شود. پس از مش‌بندی، تحلیل مودال به کمک روش استخراج مود UNSYM انجام می‌گیرد و فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها تعیین می‌شوند. سپس با تعریف‌کردن بدنه صوتی در اطراف استاتور، میزان نویز و ارتعاش در فرکانس‌های مختلف به دست می‌آید. جزئیات بیشتر راجع به الگوی شبیه‌سازی ایجادشده در [۱۳] ارائه شده است.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

الگوی شبیه‌سازی معرفی‌شده برای موتور سوئیچ رلوکتانس  $6/4$  با مشخصات طراحی داده‌شده در جداول (۱) و (۲) به کار گرفته شده است و نتایج شبیه‌سازی در این بخش ارائه شده‌اند. با انجام تحلیل گذرای این موتور برای نقطه کار جدول (۳)، نیروی شعاعی لحظه‌ای وارد بر قطب استاتور پیش‌بینی شده و در شکل (۱) نمایش داده شده است. همچنین، میزان نیرو در هارمونیک‌های مختلف نیرو در جدول (۴) داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین مقدار نیروی شعاعی  $1170$  نیوتن است که در موقعیت هم‌راستایی کامل به دست می‌آید.

علت اصلی به وجود آمدن تنش و جابه‌جایی قطب استاتور نیروی شعاعی اعمالی بر قطب استاتور است. شکل (۲-الف) میزان تنش حاصل از نیروی شعاعی ماکزیمم واردشونده به قطب‌های استاتور و شکل (۲-ب) میزان تغییر شکل قطب‌ها را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل (۲-الف) مشاهده می‌شود قسمت قرمز رنگ ماکزیمم، تنش را بر روی موتور نشان می‌دهد که در محل اتصال بین قطب و یوغ استاتور است. میزان فشار ماکزیمم محاسبه‌شده در این حالت  $5/95 \times 10^7$  پاسکال است و بازه تغییرات مقدار

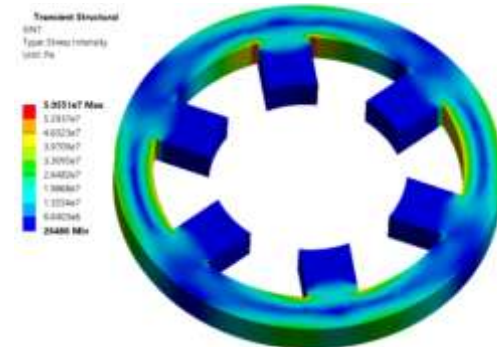
تغییر ساختار هندسی ماشین مطرح می‌شود. این تفاوت اصلی مقاله حاضر با کار انجام‌شده در [۱۳] است؛ زیرا در آنجا مقادیر بهینه برخی پارامترهای هندسی ماشین که در مشخصات یک موتور سوئیچ رلوکتانس (Data sheet)، پارامترهای طراحی استاندارد هستند، برای کاهش نویز موتور تعیین می‌شوند.



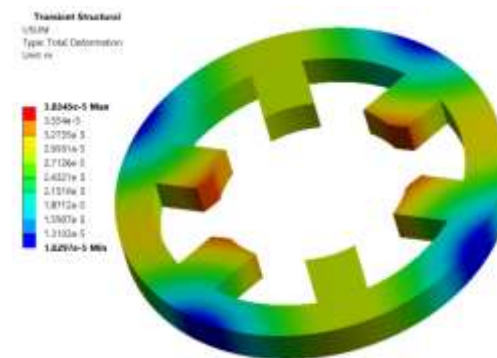
شکل (۳): پارامترهای هندسی انتخاب‌شده

هدف اصلی در فرآیند بهینه‌سازی طراحی، تعیین مقادیر بهینه پارامترهای یادشده برای حصول کمترین نویز است که با استفاده از نرم‌افزار Minitab، یکی از ابزارهای قدرتمند بهینه‌سازی در روش طراحی آزمایش‌ها، بر مبنای روش سطح پاسخ (Response surface) انجام می‌شود. در انجام این کار برای بازه تغییرات پارامترها مطابق جدول (۵)، نرم‌افزار تعداد حالات به مراتب کمتری از کل حالات ممکن را (تنها ۲۰ حالت در اینجا) مشخص می‌کند که برای هر یک از آنها لازم است تحلیل‌های الکترومغناطیسی و مودال با استفاده از الگوی شبیه‌سازی ایجادشده انجام شوند. پس از انجام این شبیه‌سازی‌ها به صورت برون‌خط، اطلاعات لازم شامل مقادیر پارامترها و نویز تولیدی برای هر یک از این ۲۰ حالت به نرم‌افزار انتقال می‌یابد؛ سپس مقادیر بهینه پارامترها با نرم‌افزار مطابق جدول (۵) تعیین می‌شوند.

روش طراحی آزمایش‌ها، روش آماری است که اولین بار آقای فیشر آن را در سال ۱۹۲۰ معرفی کرد. هدف اولیه آقای فیشر استفاده از این روش برای تعیین ترکیب بهینه‌ای از اجزاء مختلف شامل آب، باران، نور، آفتاب و خاک برای حصول بهترین محصول بود. ایشان ابتدا کلیه حالات ممکن بین فاکتورهای مختلف را با استفاده از یک ماتریس در نظر گرفت. آزمایش‌های متعددی صورت گرفت و روش‌هایی برای تحلیل نتایج به‌دست‌آمده ارائه شد. با افزایش تعداد



(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) تنش حاصل از حداکثر نیروی شعاعی، (ب) میزان تغییر شکل استاتور

جدول (۴): میزان نیرو در هارمونیک‌های مختلف

هارمونیک	۱	۲	۳	۴
فرکانس	۲۳۶/۶۸	۴۷۳/۳	۷۱۰/۰۶	۹۴۶/۷۴
برحسب هرتز				
نیرو برحسب نیوتن	۴۴۰/۶۶	۹۰/۷۶	۳۱/۱۳	۱۰/۵۲

### ۳-۱- ساختار پیشنهادی

برای کاهش نویز موتور سوئیچ رلوکتانس، ساختار هندسی نشان داده شده در شکل (۳) پیشنهاد می‌شود که در آن مقادیر بهینه سه پارامتر  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $c$  برای حداقل کردن جابه‌جایی قطب استاتور و میزان صدای تولیدی به دست می‌آید. این سه پارامتر به ترتیب نشان‌دهنده نحوه پرشدگی فضای بین قطب‌ها و یوغ استاتور، میزان مورب‌شدن قطب‌ها و ضخامت هسته استاتور هستند که بیشترین تأثیر را بر نویز موتور سوئیچ رلوکتانس دارند. درخور ذکر است با در نظر گرفتن پارامتر  $\alpha$  در ساختار پیشنهادی، شکل استاتور از حالت متعارف خارج می‌شود و درحقیقت بهینه‌سازی با

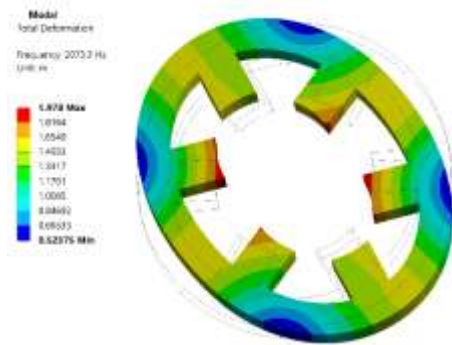
ترکیبات ممکن بین فاکتورها، آقای فیشر روش‌هایی را برای کاهش تعداد آزمایش‌های لازم پایه‌ریزی کرد. از مزایای این روش، کاهش تعداد آزمایش‌ها، هزینه‌ها و زمان رسیدن به نقطه بهینه هستند. جزئیات بیشتر درباره این روش در [۱۶] ارائه شده است.

به دلیل زمان‌بر بودن تحلیل‌های مبتنی بر روش اجزاء محدود، استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها در بهینه‌سازی موتورهای الکتریکی مرسوم است [۱۶]. درخور ذکر است در بهینه‌سازی مطرح‌شده در مقاله حاضر، انجام تحلیل‌های الکترومغناطیسی و نویز لازم برای یک طراحی خاص بسیار زمان‌بر است (حدود ۱۵۰ دقیقه روی یک سیستم با مشخصات 2.3 GHz Intel Core 2, 10 GB RAM). از طرف دیگر، تغییر جزئی هر یک از سه پارامتر مشخص‌شده در جدول (۵) تأثیر چشمگیری بر نویز موتور سونچ رلوکتانس دارد؛ بنابراین تعداد حالت‌های ممکن برای یافتن جواب بهینه بسیار زیاد است. این درحالی‌ست که تعیین جواب بهینه بر مبنای روش طراحی آزمایش‌ها تنها به انجام تحلیل‌های یادشده برای تعداد به مراتب کمتری از تعداد کل حالت‌های ممکن (همان‌طور که در بالا اشاره شد در اینجا تنها ۲۰ طراحی مختلف شکل‌گرفته حاصل از تغییر پارامترها) نیازمند است.

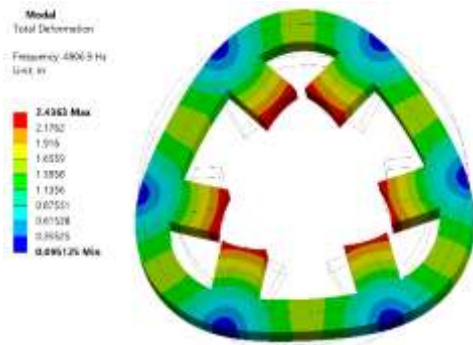
فرکانس تشدید موتور و شکل مودها با تحلیل مودال محاسبه می‌شوند. شکل مودهای موتور موجود و موتور با پارامترهای طراحی بهینه در فرکانس‌های رزونانس دوم تا چهارم در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شوند. هر چه فرکانس طبیعی بیشتر باشد، احتمال رزونانس، کمتر و سبب بهبود نویز می‌شود. همان‌طور که از این شکل مشخص است فرکانس‌های مزبور برای موتور با طراحی بهینه بیشتر است.

جدول (۵): محدوده تغییرات پارامترها و مقادیر آنها

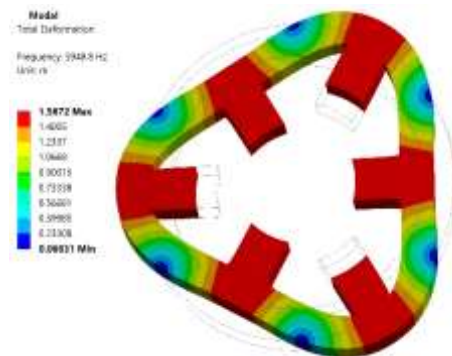
پارامتر	محدوده تغییرات	پارامترهای اولیه	پارامتر بهینه
$\alpha$	صفر تا ۳۰ درجه	صفر درجه	۹ درجه
$\beta$	۱۵ تا ۱۵ درجه	صفر درجه	۱۴ درجه
$c$	۹/۴ تا ۱۸/۸ میلی‌متر	۱۲/۵ میلی‌متر	۱۴/۲ میلی‌متر



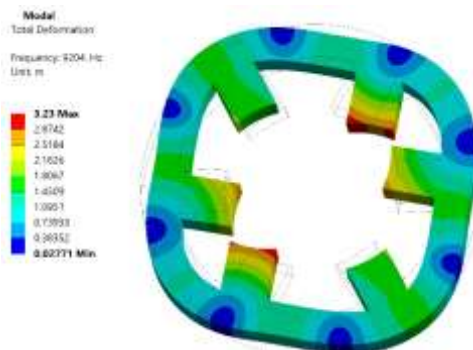
(الف)



(ب)



(ج)

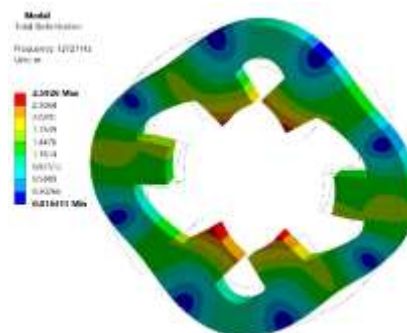
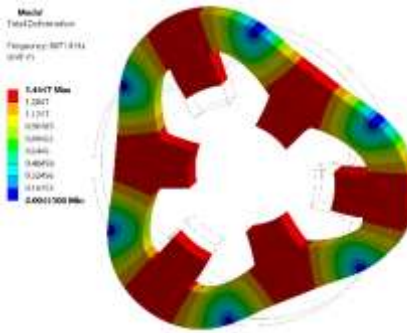
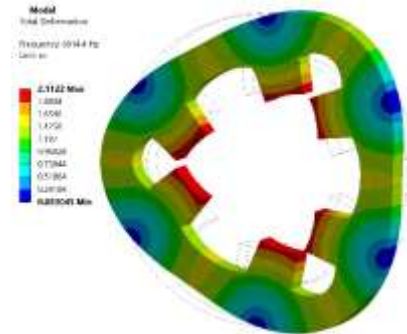
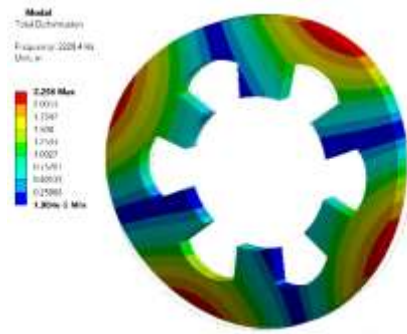
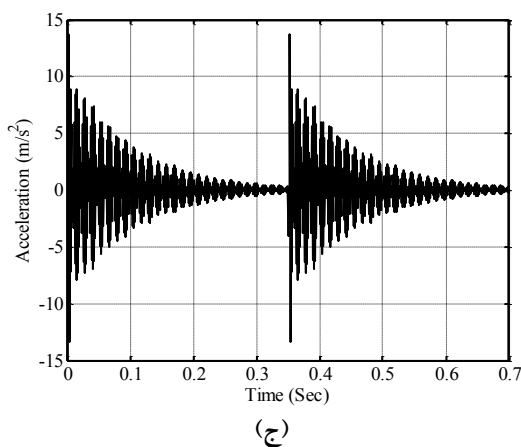
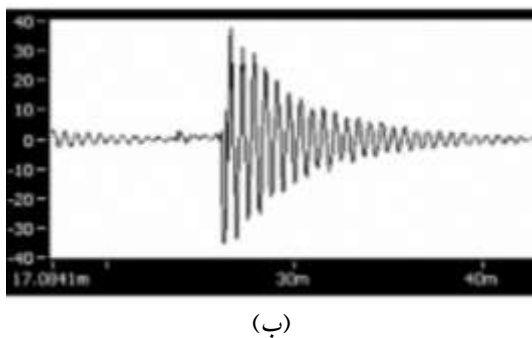
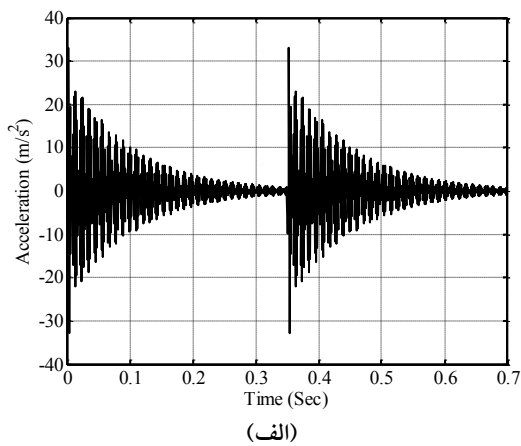


(د)

شکل (۴): تغییر شکل استاتور موتور موجود در مودهای مختلف: (الف) مود دوم، (ب) مود سوم، (ج) مود چهارم، (د) مود پنجم

کاهش نویز در ماشین سوئیچ رلوکانس با تغییر ساختار هندسی ماشین به کمک روش طراحی آزمایش‌ها

ارتعاش در موتور بهینه‌شده از ۳۳/۱۵ به ۱۳/۷۵ متر بر مجذور ثانیه کاهش یافته است. میزان ارتعاش و سیگنال نویز در حوزه فرکانس برای هر دو موتور در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است و مشاهده می‌شود ارتعاش موتور از ۱۳/۹ به ۴/۸۵ متر بر مجذور ثانیه و و میزان دامنه نویز سیگنال از ۰/۲۱ به ۰/۰۷ در نزدیکی فرکانس مود دوم کاهش یافته است.



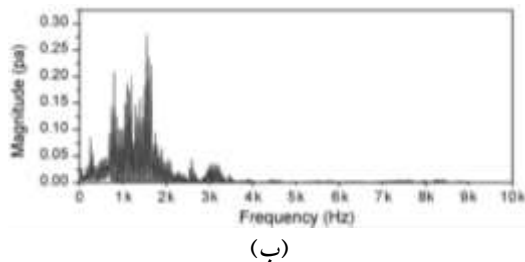
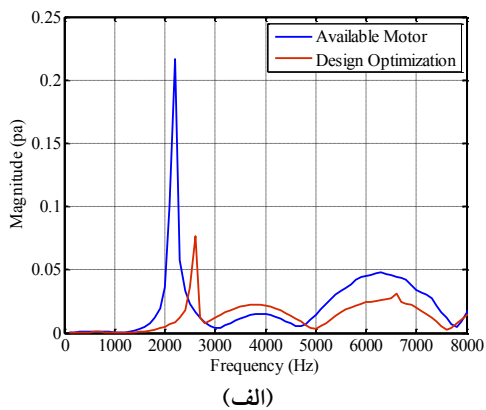
شکل (۵): تغییر شکل استاتور موتور بهینه‌شده در مودهای مختلف: (الف) مود دوم، (ب) مود سوم، (ج) مود چهارم، (د) مود پنجم

شکل (۶): میزان ارتعاش موتور در حوزه زمان: (الف) پیش‌بینی شده برای موتور موجود، (ب) اندازه‌گیری شده برای موتور موجود [۸]، (ج) موتور بهینه‌شده

شکل (۶) میزان ارتعاش در حوزه زمان را برای دو موتور مزبور نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود حداکثر

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

موتور سوئیچ رلوکتانس به دلیل قطب برجسته بودن، هم در طرف استاتور و هم در طرف رتور و وجود نیروی شعاعی زیاد بین قطب استاتور و رتور، ذاتاً نویز و ارتعاش بالایی دارد. به دلیل اهمیت موضوع، ابتدا الگوی شبیه سازی الکترومغناطیسی - نویز مبتنی بر روش اجزاء محدود برای موتور سوئیچ رلوکتانس معرفی شد که به صورت کامل در محیط نرم افزار اجزاء محدود ANSYS ایجاد شده است. پیش بینی نیروی شعاعی وارد بر قطب های استاتور برای تعیین دقیق نویز ضروری است که این کار در الگوی الکترومغناطیسی معرفی شده از تحلیل گذرای دوبعدی انجام شده است.



شکل (۸): دامنه نویز سیگنال در حوزه فرکانس:

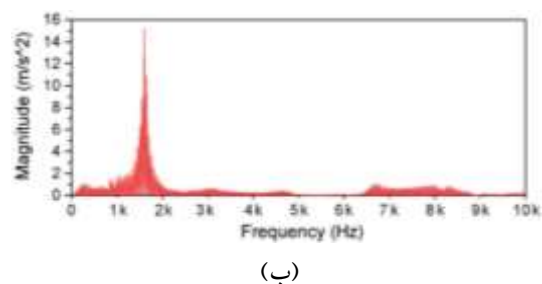
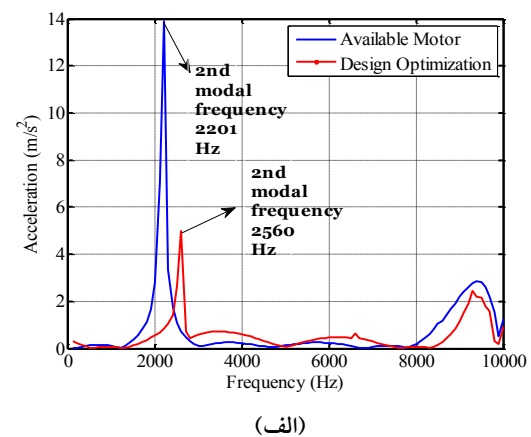
(الف) پیش بینی شده، (ب) اندازه گیری شده [۸]

در الگوسازی نویز صورت گرفته، الگوی هندسی استاتور به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده و شکل مودها و فرکانس های طبیعی از تحلیل مودال تعیین شده اند. با استفاده از الگوی شبیه سازی ایجاد شده، نتایج شبیه سازی برای یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ موجود ارائه شده اند. به منظور کاهش نویز این موتور، یک ساختار متفاوت برای استاتور

برای روش طراحی آزمایش ها الگوریتم های مختلفی معرفی شده است که بیشتر در بحث های بهینه سازی ماشین های الکتریکی مبتنی بر تحلیل های زمان بر اجزاء محدود مطرح هستند. همچنین از جهت مقایسه، بهینه سازی موتور مورد بحث از دو الگوریتم دیگر شامل تاگوچی (Taguchi) و فاکتوریال (Factorial) انجام شده است و نتایج شبیه سازی مربوط شامل مقادیر پارامترهای بهینه به همراه حداکثر جابه جایی قطب های استاتور با نتایج به دست آمده از روش سطح پاسخ در جدول (۶) مقایسه شده اند.

جدول (۶): نتایج شبیه سازی برای روش های مختلف

Factorial	Taguchi	Response surface	پارامترها و هدف
۸/۸۷	۸/۶۴	۹	$\alpha$ [°]
۱۴/۰۹	۱۳/۶۹	۱۴	$\beta$ [°]
۱۳/۸۴	۱۳/۹۶	۱۴/۲	$c$ [mm]
$۳/۲۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۹۷ \times ۱۰^{-۵}$	بیشینه جابه جایی قطب ها (متر)



شکل (۷): میزان ارتعاش موتور در حوزه فرکانس: (الف)

پیش بینی شده، (ب) اندازه گیری شده برای موتور موجود [۸]



- پیشنهاد شد و پارامترهای طراحی بهینه آن به کمک سه الگوریتم مختلف شناخته شده در روش طراحی آزمایش‌ها به دست آمد. از مقایسه نتایج شبیه‌سازی، مشاهده شد میزان ارتعاش و نویز ساختار پیشنهادی نسبت به موتور موجود به‌طور چشمگیری کمتر شده است.
- مراجع**
- [1] Miller, T. J. E., *Switched Reluctance Motor and Their Control*, Oxford U. K. Clarendon, 1993.
- [2] Cameron, D. E., Lang, J. H., Umans S. D., "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 6, pp. 1250-55, 1992.
- [3] Wu C. Y., Pollock C., "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, No. 1, pp. 91-98, 1995.
- [4] Takiguchi, M., Sugimoto, H., Kurihara, N., Chiba, A., "Acoustic Noise and Vibration Reduction of SRM by Elimination of Third Harmonic Component in Sum of Radial Forces", *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 30, No. 3, pp. 883-91, 2015.
- [5] Hong, J. P., Ha, K. H., Lee, J., "Stator Pole and Yoke Design for Vibration Reduction of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 38, No. 2, pp. 929-932, 2002.
- [6] Kotegawa, T., Miki, I., "Stator Structure for Reducing Noise in Switched Reluctance Motor", *European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-9, 2013.
- [7] Rasmussen, P. O., Andreasen, J. H., Pijanowski, J. M., "Structural Stator Spacers- A Solution for Noise Reduction of Switched Reluctance Motors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 40, No. 2, pp. 574-81, 2004.
- [8] Li, J., Song, X., Cho, Y., "Comparison of 12/8 and 6/4 Switched Reluctance Motor: Noise and Vibration Aspects", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 44, No. 11, pp. 4131-34, 2008.
- [9] Pillay, P., Cai, W., "An Investigation into Vibration in Switched Reluctance Motors", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 3, pp. 589-96, 1999.
- [10] Li, J., Cho, Y., "Investigation into Reduction of Vibration and Acoustic Noise in Switched Reluctance Motors in Radial Force Excitation and Frame Transfer Function Aspects", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 45, No. 10, pp. 4664-67, 2009.
- [11] Yang, H., Lim, Y., Kim, H., "Acoustic Noise/Vibration Reduction of a Single-Phase SRM using Skewed Stator and Rotor", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 10, pp. 4292-4300, 2013.
- [12] Santos, F. L. M., Anthonis, J., Naclerio, F., Gyselinck, J. J. C., Auweraer, H., Goes, L. C. S., "Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 61, No. 1, pp. 469-76, 2014.
- [13] Naderi, O., Ganji, B., "Design Optimization of Switched Reluctance Motor for Noise Reduction", *Engineering Review*, Vol. 36, No. 3, pp. 293-301, 2016.
- [14] Naderi, O., Ganji, B., "Noise Reduction of Switched Reluctance Motors", 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, Iran, pp. 300-304, 2017.
- [15] Fiedler, J. O., Kasper, K. A., De Doncker, R. W., "Calculation of the Acoustic Noise Spectrum of SRM Using Modal Superposition", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 57, No. 9, pp. 2939-45, 2010.
- [16] Rashidaee, S. S., Gholamian, S. A., "Optimum Design of Permanent Magnet Motor for Cogging Torque Reduction using Taguchi Experimental Design Method and Finite Element Analysis", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 55-72, 2013.