

## کاهش صدا و لرزش استاتور موتور BLDC از طریق

## انتقال فرکانس‌های طبیعی ساختار آن به مقادیر بالاتر

مهرداد جعفربلند<sup>\*</sup>، حسین باقریان فرح‌آبادی<sup>۲</sup>

۱-دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۴/۰۲/۰۱، پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۷)

**چکیده:** با توجه به ضرورت عملکرد کم‌صدا و کم‌لرزش موتورهای BLDC در کاربردهای خاص، در این مقاله از یک روش جدید بر مبنای تحلیل فرکانسی استفاده شده است که توسط آن فرکانس‌های طبیعی استاتور یک موتور BLDC به مقادیر بالاتر انتقال داده می‌شود. بدین وسیله با توجه به کاهش دامنه محتوای فرکانسی نیروهای تحریک الکترومغناطیسی در فرکانس‌های بالاتر، اثرات بروز احتمالی تشدید و صدا و لرزش شدید ناشی از آن کاهش خواهد یافت. روش معرفی شده مبتنی بر ایجاد یک حفره در نواحی مشخصی از سطح مقطع استاتور (تعداد نواحی برابر با تعداد دندانه‌ها) با موقعیت و قطر مشخص می‌باشد. تحلیل‌های فرکانسی توسط نرم‌افزار SolidWorks انجام شده و بهترین قطر و موقعیت حفره‌ها از طریق روش سطح پاسخ (RSM) تعیین گردیده است. عدم ورود ساختار استاتور به اشباع مغناطیسی و عدم افزایش گشتاور دندانه‌ای تولیدی موتور، به‌عنوان محدودیت مسئله محسوب می‌شود. روش پیشنهادی قابل استفاده در استاتور سایر ماشین‌های الکتریکی نیز می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** استاتور، تشدید، صدا و لرزش، حفره، SolidWorks

### ۱- مقدمه

ناشی از ساختمان ماشین، عوامل ناشی از بار کوپل شده به موتور و عوامل جانبی تقسیم می‌شوند. یکی از منابع اصلی تولید صدا، ساختمان استاتور می‌باشد که جز منابع مکانیکی ناشی از ساختمان ماشین دسته‌بندی می‌شود. استاتور ماشین الکتریکی دارای تعدادی فرکانس طبیعی در بازه فرکانسی بحرانی است که در صورت تداخل فرکانسی محرکه‌های الکترومغناطیسی ماشین (که جز منابع مغناطیسی دسته‌بندی می‌شوند) با یک یا تعداد بیشتری از این فرکانس‌های طبیعی، تشدید رخ می‌دهد. بروز تشدید سبب ایجاد صدا و لرزش زیادی در حین عملکرد ماشین می‌گردد.

منابع مکانیکی تولید صدا و لرزش ناشی از بار کوپل شده به موتور وابسته به شرایط کوپلینگ بار و فئدانس‌یونی هستند که موتور بر روی آن قرار داده شده است. منابع مکانیکی شامل عوامل جانبی، به صدا و لرزش ناشی از بیرینگ‌ها، جاروبک‌ها (در صورت وجود) و نامتعادلی رتور مربوط می‌شوند.

عوامل الکترونیکی تولیدکننده صدا و لرزش ناشی از مؤلفه‌های هارمونیک موجود در ولتاژ و جریان اعمال شده به موتور می‌باشند. عوامل آیرودینامیکی تولید صدا و لرزش شامل عوامل ناشی از خنک‌سازی ماشین به وسیله فن هستند [۱].

تعیین فرکانس‌های طبیعی ساختمان استاتور برای مطالعات

ماشین‌های الکتریکی به‌طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بسیاری از کاربردها تمایل بر این است که ماشین‌های الکتریکی در حین عملکرد، صدا و لرزش کم‌تری ایجاد نمایند و در بعضی از کاربردهای خاص، میزان صدا و لرزش ناچیز ماشین در حین عملکرد، از ارکان اساسی طراحی و ساخت آن است. در زمینه ساخت ماشین‌های الکتریکی با صدا و لرزش کم تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است و ماهیت برخی از روش‌ها با توجه به نوع ماشین، متفاوت است.

در یک دسته‌بندی مناسب، منابع تولید صدا در ماشین‌های الکتریکی به چهار گروه تقسیم‌بندی می‌گردند؛ منابع مغناطیسی، مکانیکی، الکترونیکی و آیرودینامیکی.

منابع مغناطیسی تولیدکننده صدا و لرزش با توجه به نوع ماشین الکتریکی شامل موارد مختلفی هستند. شار مغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی با عبور از فاصله هوایی در یک جهت تقریباً شعاعی، در استاتور و رتور تولید نیروهای شعاعی می‌نماید.

اطلاع از محتوای فرکانسی این نیروها در مطالعات مربوط به بروز تشدید در ساختمان ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

منابع مکانیکی تولیدکننده صدا و لرزش به سه دسته عوامل

در [۵] یک مدل مغناطیسی المان محدود معرفی شده است و نیروهای مغناطیسی شعاعی و مماسی در فاصله هوایی محاسبه گردیده است. سپس این نیروها به نیروهای معادل در گره‌های مختلف تبدیل شده به ساختار مدل المان محدود اعمال گشته است، به این ترتیب مشخصات لرزشی یک موتور با آهنربای دائم مورد بررسی قرار گرفته است.

در [۶] مشخصه‌های نیروهای مغناطیسی و لرزش‌های ناشی از عوامل مغناطیسی در نتیجه تغییرات زاویه‌ی فاز جریان اعمال‌شونده، ناشی از کنترل تضعیف شار، در یک موتور با آهنربای دائم مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. لرزش‌های ایجادشده در موتور ناشی از نیروهای مغناطیسی گردان، با استفاده از روش جمع آثار مدها مورد تحلیل قرار گرفته است. در همین راستا فرکانس‌های طبیعی موتور تحت مطالعه از طریق روش المان محدود و تست عملی تعیین و مقایسه‌شده و تأثیرات آن‌ها در طیف لرزش موتور بررسی شده است.

در [۷] لرزش‌های استاتور تحت نیروهای شعاعی ایجادشده در حین عملکرد موتور BLDC مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۸] تغییر شکل ساختمان استاتور تحت تأثیر مؤلفه‌های مختلف نیروهای مغناطیسی شعاعی، در شرایطی که موتور با آهنربای دائم تحت بار نامی در حال کار می‌باشد، ارائه گردیده است.

در [۹] از طریق ایجاد تغییراتی در پارامترهای موتور با آهنربای دائم، تلاش شده تا میزان تغییر شکل ساختار استاتور تحت تأثیر نیروهای مغناطیسی کاهش یابد و در نتیجه از میزان لرزش موتور کاسته شود. در این راستا از تحلیل مدال و فرکانس‌های طبیعی ساختار استاتور استفاده شده است.

مباحثی مرتبط با فرکانس‌های طبیعی و مشخصات لرزشی رتور در موتورهای با آهنربای دائم در [۱۰-۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. مدهای لرزشی متناظر با فرکانس‌های طبیعی رتور در موتورهای الکتریکی به دو دسته مدهای ساختاری مستحکم<sup>۵</sup> و مدهای آلاستیک<sup>۶</sup> تقسیم می‌شوند [۵]. فرکانس متناظر با مدهای ساختاری مستحکم تقریباً برابر با صفر است و این مدها جابه‌جایی‌های کل مجموعه رتور را در دستگاه مختصات کارتزین مدل می‌کنند. فرکانس‌های متناظر با مدهای آلاستیک، مقادیر بالاتری دارند و تغییرات شکل مکانیکی رتور را مدل می‌نمایند.

در این مقاله ساختار یک استاتور مورد استفاده در موتور BLDC مورد بررسی قرار گرفته است و فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای لرزشی آن توسط نرم‌افزار SolidWorks (با تحلیل المان محدود و از طریق حل معادلات با روش مقادیر ویژه<sup>۷</sup>)

مربوط به تشدید اهمیت به‌سزایی دارد. یکی از اقداماتی که در زمینه کاهش اثرات مخرب ناشی از بروز تشدید انجام می‌شود، ایجاد تغییرات ساختمانی بر روی استاتور جهت افزایش فرکانس‌های طبیعی آن است. بدین‌وسیله اصطلاحاً استقامت مکانیکی استاتور<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد. با توجه به کاهش محتوای فرکانسی مؤلفه‌های نیروهای تحریک الکترومغناطیسی در سطوح فرکانسی بالاتر، افزایش فرکانس‌های طبیعی استاتور سبب می‌شود که در صورت ایجاد تداخل بین فرکانس‌های مربوط به نیروهای تحریک الکترومغناطیسی و فرکانس‌های طبیعی و بروز تشدید، اثرات مخرب آن کاهش یابد و صدا و لرزش کم‌تری تولید شود.

در زمینه کاهش صدا و لرزش موتورهای با آهنربای دائم (از جمله موتورهای BLDC) از طریق روش‌های مرتبط با فرکانس‌های طبیعی، مطالعات و تحقیقاتی انجام شده است که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود.

در [۲] فرکانس‌های طبیعی استاتور با فرکانس مؤلفه‌های هارمونیک نیروی مغناطیسی شعاعی برای یک موتور با آهنربای دائم مقایسه شده است.

در [۳] یک فرآیند مطالعاتی شامل طراحی‌های ساختاری و الکترومغناطیسی جهت کاهش صدا و لرزش تولیدی در موتور BLDC معرفی شده است. در مرحله طراحی ساختاری، فرکانس‌های طبیعی به مقادیر بالاتر انتقال داده شدند تا استقامت مکانیکی استاتور افزایش یابد. میزان لرزش بر اساس تغییر متغیرهای ساختاری استاتور به‌وسیله سطح فشار صدا<sup>۲</sup> که با روش مرز-المان<sup>۳</sup> محاسبه می‌شود، مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت کاهش سطح فشار صدا، یک ساختار جدید برای استاتور با هدف افزایش استقامت مکانیکی آن معرفی گردید.

در [۴] یک روش بهینه‌سازی جهت کاهش لرزش‌های مغناطیسی یک موتور با آهنربای دائم پیشنهاد شده است. نیروی مغناطیسی اعمال‌شونده بر دندانه‌های استاتور از طریق تحلیل مغناطیسی المان محدود و روش تنسور ماکسول<sup>۴</sup> محاسبه شده است. فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای لرزشی متناسب با آن‌ها از طریق تحلیل المان محدود محاسبه شده و صحت نتایج از طریق تست عملی بررسی گردیده است. لرزش موتور ناشی از نیروی مغناطیسی گردان توسط روش جمع آثار برای مدهای لرزشی مختلف محاسبه شده و با لرزش اندازه‌گیری شده‌ی موتور مقایسه گردیده است.

5. Rigid body modes  
6. Elastic modes  
7. Eigenvalue

1. Stator Stiffness  
2. Sound Pressure Level (SPL)  
3. Boundary-Element Method (BEM)  
4. Maxwell Stress Tensor

مبحث فرکانس‌های طبیعی رتور و تأثیرات جانبی آن بر سایر بخش‌های موتور BLDC (از جمله استاتور که در این مطالعه مورد تمرکز است) جهت بسط تحقیقات این مطالعه برای کارهای آینده مد نظر قرار دارد.

## ۲- روابط تحلیلی فرکانس‌های طبیعی استاتور

استاتور یک موتور به شکل استوانه است و در نتیجه برای ساده‌سازی مدل تحلیلی می‌توان از یک پوسته استوانه‌ای به عنوان یک مدل ساده برای استاتور استفاده کرد. در این قسمت یک روش تحلیلی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی هسته استاتور ارائه می‌شود و میزان دقت نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرکانس طبیعی سیستم استاتور برای مد لرزشی  $m$ -ام با رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۵]:

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} \quad (1)$$

در این رابطه  $K_m$  استقامت مکانیکی فشرده‌ی سیستم استاتور بر حسب  $(N/m)$  و  $M_m$  جرم آن بر حسب  $(kg)$  است. اگر استاتور به عنوان یک پوسته‌ی استوانه‌ای با طول بی‌نهایت در نظر گرفته شود، فرکانس طبیعی برای مدهای لرزشی به صورت زیر توصیف می‌شود [۱۶]:

$$f_m = \frac{\Omega_m}{\pi D_c} \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c (1 - \nu_c^2)}} \quad (2)$$

در این رابطه  $E_c$  ضریب آلایستیته<sup>۲</sup>،  $\rho_c$  چگالی جرمی<sup>۳</sup>،  $D_c$  قطر متوسط استاتور و  $\nu_c$  نسبت پواسون<sup>۴</sup> برای هسته‌ی استاتور است. بر اساس تئوری دائل - مشتری [۱۶]، مقادیر  $\Omega_m$  که ریشه‌های معادله مشخصه حرکت از مرتبه ۲ هستند به صورت زیر می‌باشند:

$$\Omega_0 = 1 \quad (3)$$

- برای مد های  $m \geq 1$ :

$$\Omega_m = \sqrt{\frac{1}{2} [(1+m^2+\kappa^2 m^4) \pm \sqrt{(1+m^2+\kappa^2 m^4)^2 - 4\kappa^2 m^4}]} \quad (4)$$

در رابطه قبل پارامتر بدون بعد مربوط به ضخامت، به صورت رابطه (۵) تعیین می‌گردد:

$$\kappa^2 = \frac{h_c^2}{3D_c^2} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $h_c$  بیانگر طول مؤثر هسته استاتور است.

محاسبه شده است. در مدل‌سازی استاتور، جنس ماده هسته (شامل ویژگی‌های فیزیکی ماده بر اساس کاتالوگ شرکت سازنده) و ضخامت ورقه‌ها به طور دقیق لحاظ شده است. یکی از ویژگی‌های مطالعاتی خاص این مقاله، مدل‌سازی دقیق حالت مورق هسته با ضخامت استاندارد ورقه‌ها (بر اساس کاتالوگ شرکت سازنده) در محیط نرم‌افزار SolidWorks است. برای استاتور مورد مطالعه یک روش جدید جهت انتقال فرکانس‌های طبیعی استاتور به مقادیر بالاتر و در نتیجه افزایش استقامت مکانیکی آن پیشنهاد شده است. این روش شامل جایگذاری هدفمند حفره‌هایی در سطح مقطع عرضی استاتور بر اساس روش سطح پاسخ می‌باشد. با انجام بررسی مقایسه‌ای بین استاتور بدون حفره و مدل‌های بهبودیافته در نهایت مناسب‌ترین ساختار از نظر قطر و موقعیت دقیق حفره‌ها معرفی گردیده است. در تعیین بهترین قطر و موقعیت حفره‌ها دو قید مد نظر قرار گرفته است. با توجه به این که در این روش در سطح مقطع استاتور، حفره‌هایی ایجاد می‌شود، ممکن است محدودیت‌هایی برای عبور شار مغناطیسی از استاتور ایجاد گردد، در نتیجه قید اول عدم ورود ساختمان استاتور به اشباع مغناطیسی در اثر ایجاد حفره است. ضمناً با توجه به تغییر رلوکتانس مسیر عبور شار مغناطیسی در اثر ایجاد حفره در مقطع استاتور، امکان تغییر گشتاور دندانه‌ای تولیدی موتور وجود دارد، بنابراین دومین قید تعریف شده برای مسئله، عدم افزایش گشتاور دندانه‌ای تولیدشده در موتور ناشی از درج حفره در استاتور است. برای موتور اولیه و موتورهای ساختارهای بهبودیافته استاتور، تحلیل المان محدود جهت سنجش کارایی موتورها انجام شد. همچنین محدودیت‌های مربوط به قیود مسئله در مدل‌های بهبودیافته مورد بررسی قرار گرفت.

در مورد تحلیل ارتعاشات ناشی از فرکانس‌های طبیعی ساختمان موتورهای BLDC، فرکانس‌های طبیعی بخش‌های مختلف آن باید مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله تمرکز بر روی ساختار استاتور قرار گرفته است و پیشنهادهای جهت انتقال فرکانس‌های طبیعی ساختار آن به مقادیر بالاتر ارائه شده است. مدهای لرزشی استاتور می‌توانند مقادیر متعددی از صفر تا بی‌نهایت داشته باشند. مدهای پایین‌تر مهم‌ترین مدها هستند. مدهای بالاتر، فرکانس‌های طبیعی استاتور را خارج از محدوده عملیاتی مورد نظر قرار می‌دهند و اهمیت چندانی در بررسی‌های مربوط به بروز تشدید مخرب ندارند [۱۴].

در مورد فرکانس‌های طبیعی رتور در موتور BLDC باید اشاره شود که این فرکانس‌ها نیز از طریق تحلیل المان محدود و یا آزمایش مستقلاً قابل تعیین هستند. در تحلیل ارتعاشات رتور ناشی از فرکانس‌های طبیعی، مجموعه رتور و شفت به صورت یک واحد در نظر گرفته شده و مدهای طبیعی آن‌ها استخراج می‌شوند.

1. Lumped Stiffness
2. Elasticity Modulus
3. Mass Density
4. Poisson Ratio

که گسسته بودن تغییر متغیرها در این مسئله منطقی است، زیرا تغییرات فرکانس‌های طبیعی ناشی از جابه‌جایی موقعیت حفره‌ها و یا تغییر قطر آن‌ها حساسیت زیادی به تغییرات متغیرها در همسایگی آن‌ها ندارد؛ بنابراین مقدار متغیری که بیان‌گر یک موقعیت و یا یک قطر خاص حفره است، می‌تواند نماینده خوبی از همسایگی خود تا ابتدای همسایگی مقدار گسسته بعدی باشد.

در این مطالعه برای بهترین سناریوهای معرفی شده، تحلیل المان محدود عملکرد موتور BLDC جهت صحت‌سنجی مدل‌های به‌دست‌آمده انجام شد و محدودیت‌های مربوط به قیود عدم ورود ساختار استاتور به اشباع مغناطیسی و عدم افزایش گشتاور دندانه‌ای موتور مورد بررسی قرار گرفت.

دلیل عدم استفاده از روش‌های تحلیلی و یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی در این مطالعه، دقت کم روابط تحلیلی موجود در زمینه استخراج فرکانس‌های طبیعی ساختار استاتور است، طوری که نمی‌توان اثر درج حفره در مقطع استاتور را در روابط مذکور لحاظ نمود. در نتیجه امکان تعریف تابع هدفی که بر اساس آن مسئله بهینه‌سازی، جهت بهینه‌نمودن فرکانس‌های طبیعی در مدهای مختلف، تعریف شود، وجود ندارد و این موضوع به‌عنوان یک چالش در این زمینه تلقی می‌گردد. البته روی آوردن به روش‌های بهینه‌سازی با توابع هدف نامعلوم می‌تواند به‌عنوان راه حلی در این زمینه تلقی شود که در حال حاضر تحت بررسی قرار دارد.

### ۳-۱- مدل‌سازی استاتور

مشخصات استاتور مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار Solidworks در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، استاتور مورد نظر مربوط به یک موتور BLDC با تعداد ۴ قطب، توان ۵۵۰ (W) و سرعتی برابر با ۱۵۰۰ rpm است.

جدول (۱): مشخصات استاتور

۱۲۰ mm	قطر خارجی
۷۵ mm	قطر داخلی
۶۵ mm	طول
۲۴	تعداد شکاف‌ها <sup>۱</sup>
ASTM-A677-64F200 محصول شرکت Cogent	جنس ماده‌ی هسته

طرح شکاف استاتور به همراه پارامترهای مربوطه در شکل (۱) نمایش داده شده است:

برای نمایش رابطه (۲) به فرم رابطه (۱)، استقامت مکانیکی و جرم فشرده را می‌توان با روابط (۶) و (۷) فرموله نمود:

$$K_m = \frac{4\Omega_m^2 \pi L_i h_c E_c}{D_c (1 - \nu_c^2)} \quad (6)$$

$$M_m = \pi \rho_c D_c L_i h_c \quad (7)$$

در روابط (۶) و (۷)  $L_i$  بیانگر ضخامت یوغ استاتور است [۱۵]. برای استخراج روابط تحلیلی دقیق جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی استاتور، باید معادلات مربوط به آن برای پوسته‌ی استوانه‌ای نوشته شود، اما با توجه به انحنای پوسته، لرزش‌ها در سه بعد شعاعی، محوری و مماسی مستقل از یکدیگر نیستند. در نتیجه هر گونه تحریکی در یک بعد، سبب لرزش در هر سه بعد می‌گردد. این اثر در فرکانس‌های پایین‌تر بیش‌تر مشهود است. مسئله‌ی مذکور، حل مستقیم معادلات را بسیار مشکل می‌کند و تقریب‌ها و ساده‌سازی‌های بسیاری باید در حل تحلیلی مسئله اعمال شود [۱۷] و بنابراین از دقت روابط تحلیلی کاسته می‌شود. در نتیجه برای بررسی اثر تغییرات ساختمانی مورد نظر در این مطالعه، دقت پایین روابط تحلیلی مانع از استفاده از آن‌ها می‌شود و بنابراین برای آنالیزهای این مسئله از روش عددی المان-محدود در نرم‌افزار SolidWorks استفاده شده است.

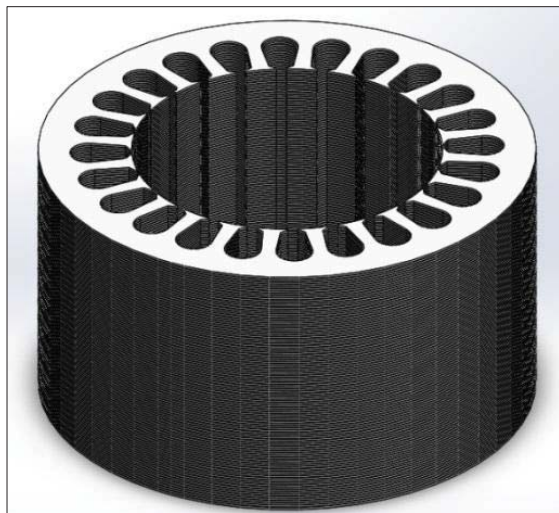
### ۳-۲- معرفی روش پیشنهادی جهت انتقال فرکانس‌های طبیعی ساختار استاتور به مقادیر بالاتر

در این قسمت روش جدید مبتنی بر تغییرات ساختاری استاتور جهت انتقال فرکانس‌های طبیعی آن به سطوح بالاتر با هدف افزایش استقامت مکانیکی معرفی می‌گردد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد در این روش از جایگذاری حفره‌هایی با قطر و موقعیت معین، در سطح مقطع عرضی استاتور استفاده می‌شود؛ جهت تعیین مناسب‌ترین قطر و موقعیت حفره‌ها از روش سطح پاسخ استفاده شده و تحلیل فرکانسی در هر حالت در محیط نرم‌افزار SolidWorks انجام گرفته است. لازم به ذکر است که استفاده از روش سطح پاسخ به همراه یک روش آنالیز فرکانسی مبتنی بر تحلیل المان محدود، جهت مشخص نمودن بهترین حالت ساختار بهبودیافته، که در آن میزان انتقال فرکانس‌های طبیعی به مقادیر بالاتر بهینه می‌باشد، یک روند متعارف در زمینه مطالعاتی مورد نظر است. در این روند به متغیرهای ساختاری، مقادیر گسسته‌ای در سناریوهای مختلف تخصیص داده می‌شود و در هر سناریو، آنالیز فرکانسی با روش المان محدود انجام می‌گردد. در پایان مقادیر فرکانس‌های طبیعی در سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده و بهترین ساختار معرفی می‌گردد. لازم به ذکر است

همان‌طور که قبلاً ذکر شد یکی از ویژگی‌های خاص این مطالعه، مدل‌سازی بسیار دقیق ساختار مورق استاتور در محیط نرم‌افزار Solidworks است. برای مثال در [۵] برای مدل‌سازی ساختار مورق استاتور از یک ماده با ویژگی‌های متغیر در طول یک محور<sup>۹</sup> استفاده شده است، در حالی که در این مطالعه، ساختار مورق استاتور به طور مستقیم در نرم‌افزار اعمال گردیده است. همچنین در این مدل‌سازی، مشخصات دقیق فیزیکی هسته و ضخامت استاندارد ورقه‌ها لحاظ شده است.

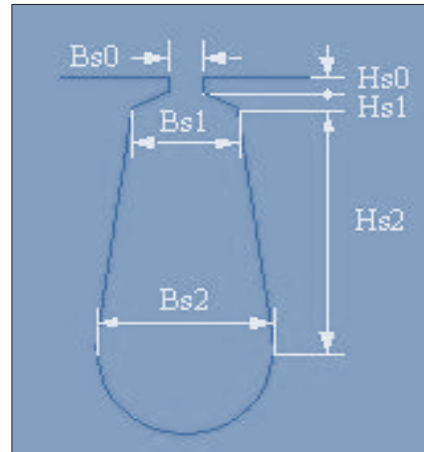
ساختار استاتور مدل‌شده در Solidworks در شکل (۲) نشان داده شده است. این ساختار به عنوان نمونه‌ی اولیه در این مطالعه در نظر گرفته شده است و تغییرات مورد نظر بر روی این مدل اعمال می‌گردد.

با انجام تحلیل فرکانسی در نرم‌افزار، لیست فرکانس‌های طبیعی استاتور در جدول (۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که حداکثر فرکانس طبیعی لحاظ شده در این مطالعه در محدوده‌ی بین ۹ تا ۱۰ KHz در نظر گرفته شده است که ۱۹ مد لرزشی را برای استاتور مورد نظر در بر می‌گیرد.



شکل (۲): مدل استاتور با هسته مورق در نرم‌افزار Solidworks

دلیل این مسئله این است که در عمل، نیروهای تحریک الکترومغناطیسی در موتورهای BLDC، در محدوده فرکانسی بالاتر از ۱۰ KHz، محتوای فرکانسی قابل توجهی ندارند و مطالعات مربوط به تشدید در سطوح فرکانسی بالاتر از حد مذکور، کاربرد چندانی ندارد.



شکل (۱): طرح شکاف استاتور به همراه پارامترها [۱۸]

مقادیر پارامترها برای شکاف‌های استاتور مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای شکاف‌های استاتور مورد مطالعه

نام پارامتر	مقدار (mm)	نام پارامتر	مقدار (mm)
Bs0	۲/۵	Hs0	۰/۵
Bs1	۵/۶	Hs1	۱
Bs2	۷/۶	Hs2	۸/۲

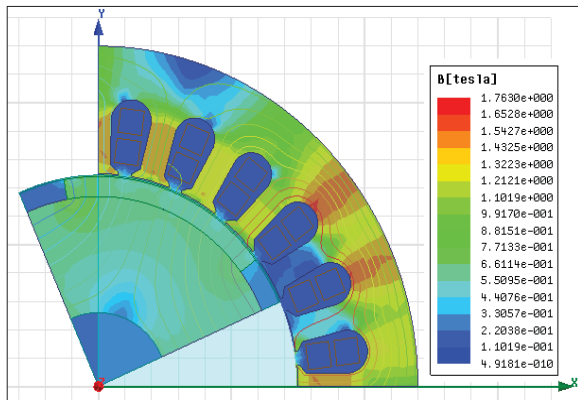
همان‌طور که در جدول (۱) نمایش داده شده است، مدل فولاد هسته ASTM-A677-64F200 بوده و محصول شرکت Cogent است. ضخامت استاندارد ورقه برای این مدل برابر ۰/۰۲۵۰ اینچ است. مشخصات فیزیکی فولاد هسته که در مدل‌سازی در نرم‌افزار Solidworks مورد استفاده قرار گرفته است در جدول (۳) ارائه شده است [۱۹]:

جدول (۳): مشخصات فیزیکی فولاد هسته [۱۹]

واحد	مقدار		مشخصه
psi	۲۶۸۰۰۰۰۰	جهت نورد <sup>۱</sup>	ضریب یانگ <sup>۲</sup>
	۲۹۷۰۰۰۰۰	عمود بر جهت نورد <sup>۳</sup>	
بدون واحد	۰/۲۹		نسبت پواسون <sup>۴</sup>
psi	۱۱۵۰۱۴۹۲/۶		ضریب برشی <sup>۴</sup>
Kg/m <sup>۳</sup>	۷۶۰۰		چگالی جرمی <sup>۵</sup>
psi	۷۱۰۰۰		استحکام کششی <sup>۶</sup>
psi	۵۴۳۰۰		استحکام ارتجاعی <sup>۷</sup>

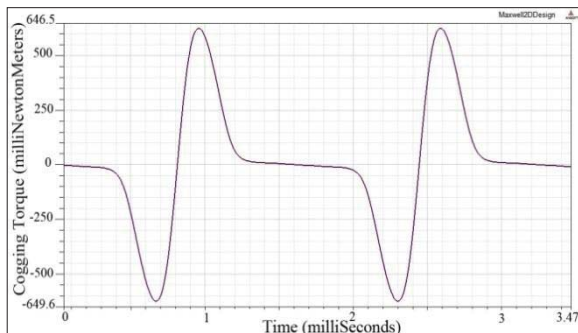
1. Rolling Direction
2. Young Modulus
3. Transverse Direction
4. Poisson's Ratio
4. Shear Modulus
5. Mass Density
6. Tensile Strength
8. Yield Strength





شکل (۴): توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در مقطع استاتور نمونه اولیه موتور BLDC

با توجه به شکل فوق مشاهده می‌شود که حداکثر میزان چگالی شار مغناطیسی در مقطع استاتور برابر با حدود ۱/۷۶ تسلا (T) است که با توجه به جنس ورقه فولاد به کار رفته و سطح فرکانس، مشکلی از لحاظ ورود به اشباع ندارد. گشتاور دندانه‌ای نمونه اولیه موتور BLDC مورد مطالعه، در شکل (۵) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد حداکثر میزان گشتاور دندانه‌ای تولیدشده در موتور برابر با حدود ۶۲۲ mN.m است. نسبت به گشتاور نامی موتور (۳/۵ N.m)، در موتور اولیه، گشتاور دندانه‌ای به میزان ۱۷/۸ درصد می‌باشد.



شکل (۵): گشتاور دندانه‌ای تولیدی در نمونه اولیه موتور BLDC

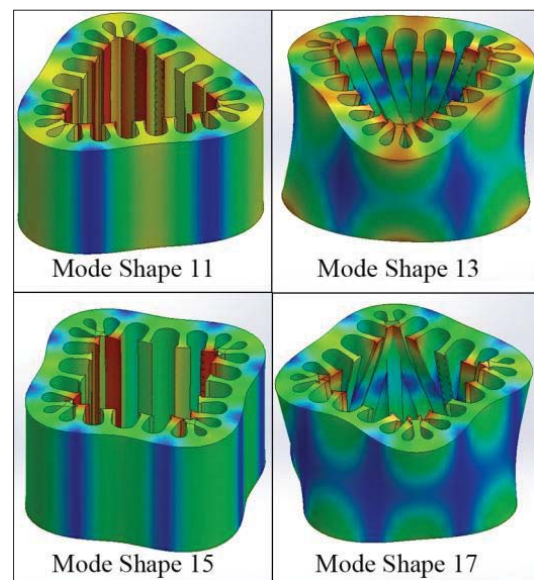
### ۳-۲- جایگذاری حفره بر روی سطح مقطع عرضی استاتور

در این قسمت تأثیر جایگذاری تک حفره را در نواحی مختلف از مقطع استاتور بررسی می‌نماییم. برای این منظور، سطح مقطع عرضی استاتور را به ناحیه‌هایی تقسیم‌بندی می‌نماییم که هر ناحیه شامل یک دندانه و قسمت فوقانی آن در یوغ استاتور است. توسط روش سطح پاسخ و تحلیل المان محدود ساختار استاتور، بهترین موقعیت و قطر حفره را در هر ناحیه مشخص می‌کنیم. تصویر نواحی مورد نظر در شکل (۶) نمایش داده شده است.

جدول (۴): فرکانس‌های طبیعی نمونه اولیه استاتور

شماره مد	فرکانس طبیعی (هرتز)
۱	۰
۲	۰
۳	۰
۴	۰/۰۰۴۱۲۱
۵	۰/۰۰۴۴۲۹۲
۶	۰/۰۰۷۱۲۵۶
۷	۱۳۹۹/۶
۸	۱۴۰۱/۳
۹	۲۵۲۷/۸
۱۰	۲۵۳۰/۱
۱۱	۳۷۲۵/۳
۱۲	۳۷۵۱/۸
۱۳	۵۶۳۴/۴
۱۴	۵۶۳۷/۴
۱۵	۶۶۳۷/۹
۱۶	۶۶۴۳/۴
۱۷	۸۷۱۱/۸
۱۸	۸۷۱۵/۶
۱۹	۹۳۰۵/۵

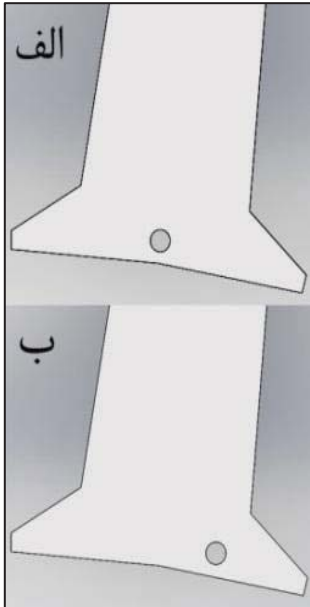
جهت رعایت اختصار تنها به ارائه چند شکل مد بسنده می‌نماییم. برای مثال شکل مدهای لرزشی یازدهم، سیزدهم، پانزدهم و هفدهم استاتور در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): شکل مدهای لرزشی یازدهم، سیزدهم، پانزدهم و هفدهم استاتور

با توجه به قیود ذکر شده برای مسئله، توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در سطح مقطع موتور اولیه و مشخصه‌ی گشتاور دندانه‌ای موتور آن در شکل‌های (۴ و ۵) ارائه شده است. این اطلاعات برای مقایسه با اطلاعات متناظر در موتورها با استاتورهای بهبودیافته مورد کاربرد قرار می‌گیرند.

به عنوان مثال دو نمونه استاتور را در نظر می‌گیریم که در یکی از آن‌ها بر روی هر دندانه یک حفره بر روی خط مرکزی قرار داده شده است و در دیگری همان حفره بر روی دندانه‌ها به سمت راست خط مرکزی منحرف شده است. این دو ساختار در شکل (۸) نمایش داده شده‌اند.

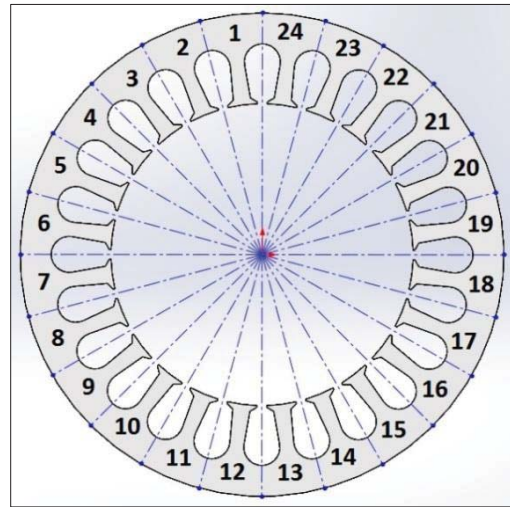


شکل (۸): الف) استاتور با تک‌حفره در خط مرکزی، ب) استاتور با تک‌حفره خارج از خط مرکزی

فرکانس‌های طبیعی مدل‌های ارائه‌شده در شکل (۸)، در جدول (۵) درج شده است. مقایسه نتایج در این جدول به‌عنوان یک نمونه مؤید این است که قرارگیری حفره بر روی خط مرکزی افزایش بیشتری را در فرکانس‌های طبیعی مدهای مختلف نسبت به حالتی که حفره در خارج از خط مرکزی قرار داده شود، ایجاد می‌کند. علاوه بر این قرار دادن حفره بر روی خط مرکزی به دلیل وجود تقارن، در استقامت مکانیکی استاتور ایجاد مشکل نمی‌کند، در حالی که قرار گرفتن حفره خارج از خط مرکزی می‌تواند به دلیل عدم تقارن بر روی استقامت مکانیکی اثر سوء بگذارد.

مکان هندسی مراکز حفره‌ها تا اینجا مشخص گردید. در ادامه قصد تعیین مناسب‌ترین موقعیت حفره بر روی خط مرکزی دندانه استاتور در نواحی مختلف و مناسب‌ترین قطر آن را داریم.

در این مرحله دو پارامتر را تعریف می‌نماییم. همان‌طور که در شکل (۹) نمایش داده شده است یک از پارامترها معرف قطر حفره به نام  $a$  است و دیگری فاصله بین مرکز حفره و مرکز لبه دندانه استاتور (در امتداد شعاع استاتور) به نام  $b$  است.

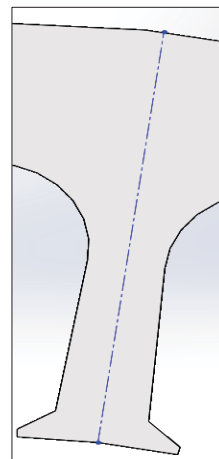


شکل (۶): نواحی تعریف‌شده برای روش سطح پاسخ

همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، به ازای هر دندانه استاتور و قسمت فوقانی آن در یوغ استاتور، یک ناحیه تعریف گردید. با توجه به این‌که نمونه استاتور مورد مطالعه، ۲۴ شیار دارد، ۲۴ ناحیه برای مسئله تعریف شد.

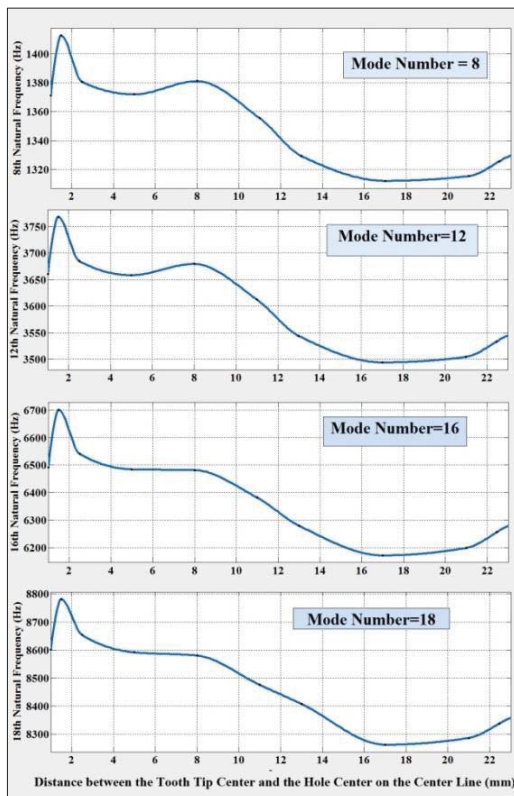
برای یافتن بهترین موقعیت تک‌حفره، شکل (۷) را که در آن یک دندانه استاتور نمایش داده شده است، در نظر می‌گیریم. در این شکل یک خط‌چین مرکزی که امتداد شعاع دایره استاتور است و از مرکز لبه دندانه می‌گذرد، نشان داده شده است.

حفره مورد نظر را می‌توان بر روی خط‌چین مرکزی و یا در هر مکانی روی سطح دندانه یا یوغ، در نواحی مشخص‌شده، قرار داد. بررسی سناریوهای مختلف روش سطح پاسخ و نتایج آنالیزهای فرکانسی المان محدود نشان می‌دهد که قرار دادن حفره به نحوی که مرکز آن بر روی خط‌چین مرکزی قرار بگیرد، پاسخ‌های بهتری را نسبت به درج حفره در همسایگی چپ و راست این امتداد، ایجاد می‌کند و افزایش فرکانس‌های طبیعی در این حالات بیشتر از سایر حالات است.



شکل (۷): دندانه استاتور به همراه خط‌چین مرکزی

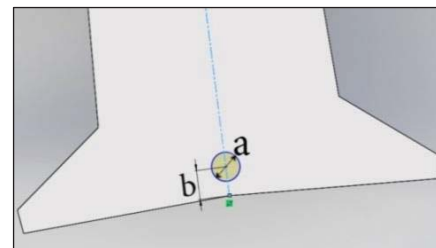
دندان استاتور جابه‌جا می‌شود، تغییرات فرکانس طبیعی در چند مد (۸، ۱۲، ۱۶ و ۱۸) در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. با مشاهده شکل (۱۰)، ثابت می‌شود برای مقایسه مشخصه‌های مربوط به تغییرات فرکانس‌های طبیعی نسبت به تغییر پارامتر b، تغییرات فرکانس صرفاً در یک مد می‌تواند برای مقایسه به ازای قطرهای مختلف حفره کافی باشد. بنابراین برای مقایسه در این قسمت، مد طبیعی دهم در نظر گرفته می‌شود. تغییرات فرکانس طبیعی در مد دهم نسبت به تغییرات پارامتر b برای قطرهای مختلف حفره‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، چهار قطر مختلف ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ mm برای حفره‌ها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود مشخصه‌های مربوط به فرکانس‌های طبیعی با افزایش قطر حفره از ۰/۵ به ۱/۵ mm با یک سیر مشخص و قابل پیش‌بینی تغییر می‌کنند. مقایسه مشخصه‌ها در شکل (۱۱) نشان می‌دهد که برای قطرهای مختلف، بهترین موقعیت حفره جهت داشتن بیشترین میزان انتقال فرکانس‌های طبیعی مدهای مختلف به مقادیر بالاتر، متفاوت است. برای قطرهای حفره تا حدود ۰/۵ mm، بهترین موقعیت مربوط به مکانی در نزدیکی انتهای یوغ می‌شود. برای قطرهای بزرگ‌تر از ۰/۵ mm بهترین موقعیت در محدوده‌هایی است که در آن پارامتر b مقداری در حدود ۲ mm دارد (برای استاتور مورد مطالعه در این مقاله).



شکل (۱۰): تغییرات فرکانس‌های طبیعی در مدهای مختلف (قطر حفره = ۱ mm)

جدول (۵): فرکانس‌های طبیعی مدل‌های ارائه‌شده در شکل (۸)

شماره مد	فرکانس‌های طبیعی مدل شکل (الف-۸)	فرکانس‌های طبیعی مدل شکل (ب-۸)
۱	۰	۰
۲	۰	۰
۳	۴/۱۱e-۹	۰/۰۰۱۳۹۲
۴	۰/۰۰۲۳۶۸۷	۰/۰۰۲۷۶۵
۵	۰/۰۰۳۴۸۵۸	۰/۰۰۴۴۷۹
۶	۰/۰۰۳۸۰۵۲	۰/۰۰۸۴۷۴
۷	۱۴۰۰۱/۲	۱۳۹۶
۸	۱۴۰۲/۹	۱۳۹۶/۵
۹	۲۵۲۸	۲۵۲۵/۵
۱۰	۲۵۳۰/۴	۲۵۲۵/۷
۱۱	۳۷۳۳/۳	۳۷۲۷/۶
۱۲	۳۷۵۶	۳۷۲۸/۴
۱۳	۵۶۳۸/۸	۵۶۲۷/۶
۱۴	۵۶۴۳/۱	۵۶۲۸/۸
۱۵	۶۶۵۱/۲	۶۶۲۲/۳
۱۶	۶۶۵۸/۵	۶۶۲۴/۷
۱۷	۸۷۲۵/۴	۸۷۰۰/۹
۱۸	۸۷۲۷/۳	۸۷۰۳/۵
۱۹	۹۳۲۶	۹۳۰۰/۱



شکل (۹): پارامترها و متغیرهای مربوط به آن‌ها

در این قسمت از مقاله قصد بر این است که تأثیرات جابه‌جایی مرکز حفره بر روی مکان هندسی مذکور بررسی شود. چهار قطر مختلف ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ mm برای حفره‌ها در این قسمت در نظر گرفته می‌شود. تحلیل‌های فرکانسی انجام‌شده، نشان می‌دهد که ایجاد حفره با قطر کم‌تر از ۰/۵ mm تأثیر مثبت خاصی بر روی فرکانس‌های طبیعی نمی‌گذارد؛ همچنین اگر قطر حفره بیش‌تر از ۱/۵ mm باشد، در سطح مقطع عرضی استاتور مورد مطالعه در این مقاله، اشباع مغناطیسی شدید رخ می‌دهد. بنابراین قطر حداقل حفره برابر ۰/۵ و قطر حداکثر آن برابر ۱/۵ mm نظر گرفته شد.

تغییرات فرکانس‌های طبیعی در مدهای مختلف نسبت به تغییرات پارامتر b برای قطرهای مختلف حفره‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات فرکانس‌های طبیعی در مدهای مختلف (نسبت به b) مشخصه‌های مشابهی برای یک حفره با قطر معین دارد. برای مثال وقتی که یک حفره با قطر ۱ mm بر روی خط مرکزی



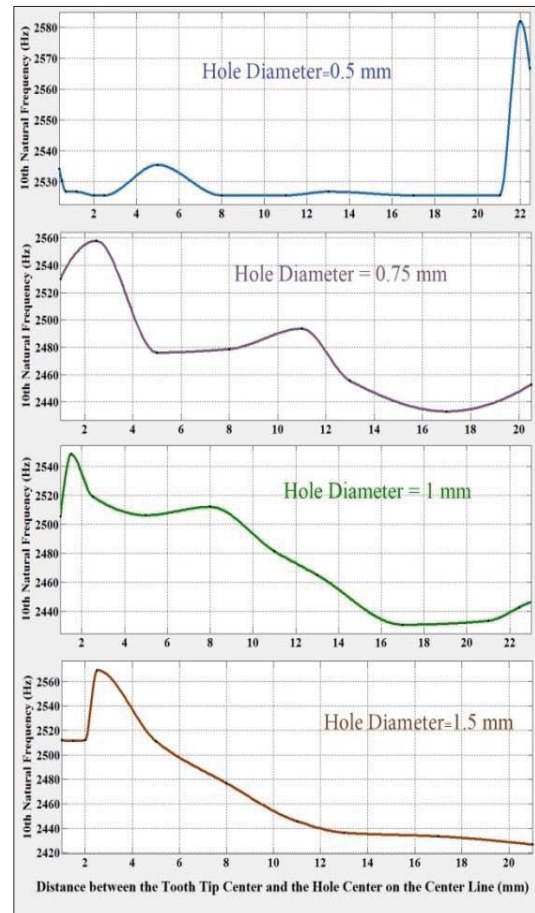
دادن تک‌حفره در نواحی مختلف تعریف شده باشد. برای استاتور مورد مطالعه، مناسب‌ترین مقادیر پارامترها در شرایطی به دست آمد که  $a$  و  $b$  هر دو برابر با  $2/5$  mm باشند. برای این حالت لیست فرکانس‌های طبیعی در جدول (۶) ارائه شده است. لازم به ذکر است که جهت دسترسی آسان‌تر، فرکانس‌های طبیعی نمونه اولیه استاتور نیز در جدول (۶) و سایر جداول مربوط به مدل‌های جدید ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، با جایگذاری حفره‌ها با قطر و موقعیت معین، در تمامی مدهای آلستیک، فرکانس‌های طبیعی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

**جدول (۶):** لیست فرکانس‌های طبیعی استاتور با ساختار بهبودیافته ( $a=b=2.5$  mm) و فرکانس‌های نمونه اولیه استاتور

شماره مد	فرکانس‌های طبیعی نمونه اولیه استاتور (هرتز)	فرکانس‌های طبیعی استاتور بهبودیافته (هرتز)
۱	۰	۰
۲	۰	۰
۳	۰	$5/3e-9$
۴	$0/004121$	$0/0022252$
۵	$0/0044292$	$0/0032785$
۶	$0/0071256$	$0/0036608$
۷	$1399/6$	$1427$
۸	$1401/3$	$1429/7$
۹	$2527/8$	$2562/2$
۱۰	$2530/1$	$2566/1$
۱۱	$3725/3$	$3815/3$
۱۲	$3751/8$	$3844/8$
۱۳	$5634/4$	$5761/4$
۱۴	$5637/4$	$5770/1$
۱۵	$6637/9$	$6843/3$
۱۶	$6643/4$	$6847/3$
۱۷	$8711/8$	$8986/5$
۱۸	$8715/6$	$8993/2$
۱۹	$9305/5$	$9559/2$

با توجه به قطر بزرگ حفره و فاصله کم محیط آن با مرز جانبی دندانه استاتور، چنین ساختاری در حین عملکرد موتور الکتریکی سبب اشباع هسته استاتور می‌گردد. با توجه به این مسئله می‌توان با روش سطح پاسخ و در نظر گرفتن قید عدم ورود استاتور به اشباع، نقاط مناسب دیگری را یافت. برای این منظور نقطه دیگری که پیشنهاد می‌شود درحالتی است که پارامترهای  $a$  و  $b$  به ترتیب برابر  $1/5$  و  $2/5$  mm هستند. لیست فرکانس‌های طبیعی در این حالت به همراه لیست فرکانس‌های نمونه اولیه استاتور در جدول (۷) ارائه شده است.



شکل (۱۱): تغییرات فرکانس طبیعی مد دهم به ازای قطرهای مختلف حفره

محدوده‌های مربوط به دو پارامتر  $a$  و  $b$  به وسیله ابعاد استاتور تعیین می‌شود. اگر فاصله مستقیم بین مرکز لبه دندانه و نقطه انتهایی یوغ در امتداد شعاع دایره استاتور را  $h$  بنامیم، محدوده پارامترهای  $a$  و  $b$  به صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$0.5 \text{ mm} \leq a \leq 2.5 \text{ mm} \quad (8)$$

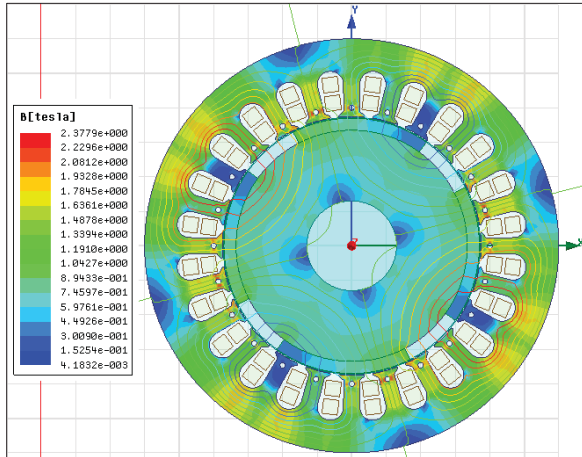
$$0.5 \text{ mm} \leq b \leq h - \frac{a}{2} \text{ mm} \quad (9)$$

برای استاتور مورد مطالعه در این تحقیق،  $h$  برابر با  $22/3$  mm است.

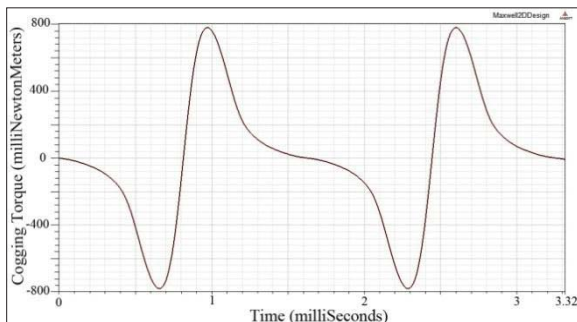
در روش سطح پاسخ مورد استفاده در این مطالعه، مقادیر مشخص در گام‌های اجرایی متعدد برای پارامترهای  $a$  و  $b$  تعریف گردید و برای ترکیب‌های مختلف و معتبر مقادیر این پارامترها با توجه به قیود موجود، آنالیز فرکانسی در سناریوهای متعدد توسط نرم‌افزار انجام شد.

مناسب‌ترین ترکیب برای این پارامترها، به نحوی تعیین شد که در آن، میزان انتقال فرکانس‌های طبیعی استاتور به مقادیر بالاتر در هر مد، بیش‌تر از میزان افزایش در سایر حالات قرار

چگالی شار مغناطیسی در غالب نقاط مقطع استاتور برابر با حدود  $1/7 T$  است و مشکلی از نظر اشباع وجود ندارد. مشخصه گشتاور دندانه‌ای موتور BLDC با استاتور بهبودیافته در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.



شکل (۱۳): توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در مقطع موتور BLDC با استاتور بهبودیافته (a=1.5 mm, b=2.5 mm)



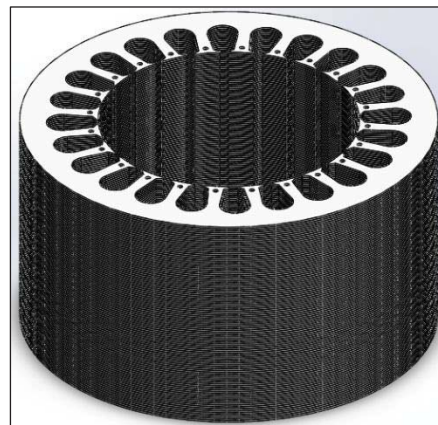
شکل (۱۴): مشخصه گشتاور دندانه‌ای موتور BLDC با استاتور بهبودیافته (a=1.5 mm, b=2.5 mm)

میزان حداکثر گشتاور دندانه‌ای در این حالت برابر با ۷۵۱ mN.m است که در مقایسه با موتور اولیه به میزان ۱۲۹ mN.m افزایش یافته است. گشتاور دندانه‌ای در این حالت به میزان ۲۱/۵ درصد گشتاور نامی است و حدود ۳/۷ درصد بیشتر از موتور اولیه است. البته این مقدار افزایش گشتاور دندانه‌ای می‌تواند در مصالحه با کاهش صدا و لرزش ناشی از تشدید و یا حذف آن، به عنوان یک عیب بازدارنده لحاظ نشود. با این وجود بر اساس روش سطح پاسخ می‌توان در نواحی مختلف، مکان دیگری را برای حفره پیشنهاد نمود که در آن مشکلی از نظر اشباع مغناطیسی و هم‌چنین افزایش گشتاور دندانه‌ای وجود نداشته باشد. در صورتی که پارامترهای a و b به ترتیب برابر ۰/۵ mm و ۲۲ mm باشد، لیست فرکانس‌های طبیعی مطابق جدول (۸) است. در این حالت حفره‌ها مطابق شکل (۱۵) در انتهای یوغ استاتور واقع می‌شوند.

جدول (۷): لیست فرکانس‌های طبیعی استاتور با ساختار بهبودیافته (a=1.5 mm, b=2.5 mm) و فرکانس‌های نمونه اولیه استاتور

شماره مد	فرکانس‌های طبیعی نمونه اولیه استاتور (هرتز)	فرکانس‌های طبیعی استاتور بهبودیافته (هرتز)
۱	۰	۰
۲	۰	۰
۳	۰	۳/۳۵e-۹
۴	۰/۰۰۴۱۲۱	۰/۰۰۳۳۹۵۷
۵	۰/۰۰۴۴۲۹۲	۰/۰۰۳۶۵۲۱
۶	۰/۰۰۷۱۲۵۶	۰/۰۰۳۸۶۸۹
۷	۱۳۹۹/۶	۱۴۱۷/۹
۸	۱۴۰۱/۳	۱۴۲۳/۲
۹	۲۵۲۷/۸	۲۵۵۸/۵
۱۰	۲۵۳۰/۱	۲۵۶۹/۴
۱۱	۳۷۲۵/۳	۳۷۸۹/۶
۱۲	۳۷۵۱/۸	۳۸۰۷/۲
۱۳	۵۶۳۴/۴	۵۷۲۵/۹
۱۴	۵۶۳۷/۴	۵۷۳۵/۵
۱۵	۶۶۳۷/۹	۶۷۴۰/۶
۱۶	۶۶۴۳/۴	۶۷۸۱/۷
۱۷	۸۷۱۱/۸	۸۸۶۹/۹
۱۸	۸۷۱۵/۶	۸۸۹۳/۸
۱۹	۹۳۰۵/۵	۹۴۱۵/۶

در این حالت، ساختار استاتور به همراه حفره‌ها در محیط نرم‌افزار Solidworks در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

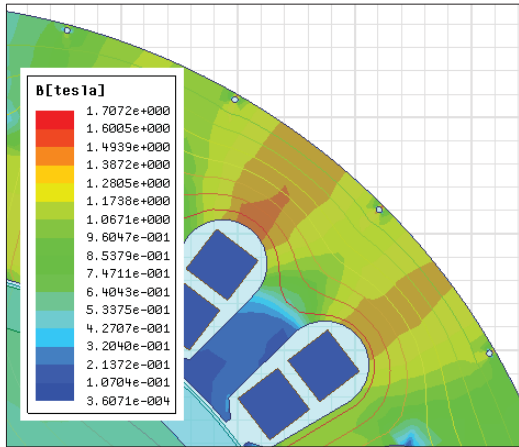


شکل (۱۲): ساختار استاتور به همراه حفره‌ها در محیط نرم‌افزار Solidworks

توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در مقطع موتور در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.

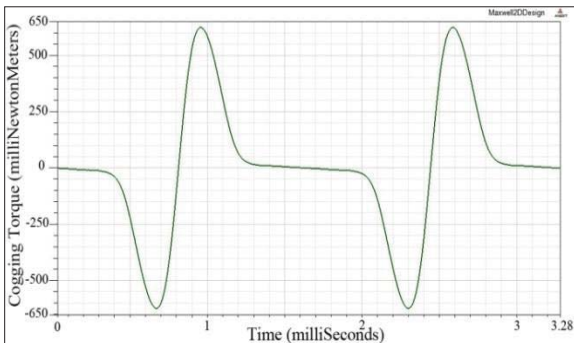
باتوجه به شکل (۱۳)، در نقاط محدودی از مقطع استاتور و در نزدیکی حفره‌ها، اشباع جزئی رخ می‌دهد که البته حتی با وجود اشباع جزئی هم در بعضی کاربردهای خاص مشکلی ایجاد نخواهد شد. به جز نقاط محدودی که اشباع جزئی دارند، میزان حداکثر

توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی از نمای نزدیک به محل حفره‌ها در شکل (۱۷) نمایش داده شده است.



شکل (۱۷): توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در نمای نزدیک به حفره‌ها (a=0.5 mm, b=22 mm)

حداکثر میزان چگالی شار مغناطیسی در این حالت برابر ۱/۷۱ است و مشکلی از نظر اشباع وجود ندارد. در نتیجه قید اول مسئله رعایت شده است. مشخصه گشتاور دندانه‌ای موتور BLDC در این حالت در شکل (۱۸) نمایش داده شده است.



شکل (۱۸): مشخصه گشتاور دندانه‌ای در موتور BLDC با استاتور بهبودیافته (a=0.5 mm, b=22 mm)

مقدار حداکثر گشتاور دندانه‌ای در این حالت برابر ۶۲۲ mN.m است و نسبت به موتور اولیه تغییری نداشته است و در نتیجه قید دوم مسئله نیز رعایت شده است. ایجاد چنین حفره‌ای در فاصله بسیار کم از انتهای یوغ استاتور، ممکن است مشکلاتی را در هنگام ساخت ایجاد کند. با ایجاد تغییراتی اندک در پارامترها می‌توان به جای ایجاد حفره در مکان مذکور، شیارهایی را در دیواره جانبی استاتور ایجاد کرد و از دیدگاه فرکانس‌های طبیعی، به بهبودی با میزان نزدیک به حالت قبل دست یافت. در این شرایط پارامترهای a و b به ترتیب برابر ۰/۵ و ۲۲/۵ mm هستند. مدل استاتور با شیار در نرم‌افزار SolidWorks در شکل (۱۹) نمایش داده شده است. لیست فرکانس‌های طبیعی در این حالت در جدول (۹) ارائه گردیده است.

جدول (۸): لیست فرکانس‌های طبیعی استاتور با ساختار

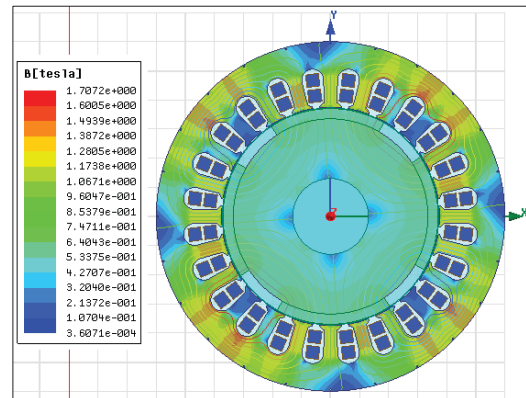
بهبودیافته (a=0.5 mm, b=22 mm) و فرکانس‌های نمونه اولیه استاتور

شماره مد	فرکانس‌های طبیعی نمونه اولیه استاتور (هرتز)	فرکانس‌های طبیعی استاتور بهبودیافته (هرتز)
۱	.	.
۲	.	.
۳	.	.
۴	۰/۰۰۴۱۲۱	.
۵	۰/۰۰۴۴۲۹۲	۰/۰۰۶۸۲۵۱
۶	۰/۰۰۷۱۲۵۶	۰/۰۰۸۲۷۴۲
۷	۱۳۹۹/۶	۱۴۲۲/۱
۸	۱۴۰۱/۳	۱۴۲۶/۳
۹	۲۵۲۷/۸	۲۵۷۶/۳
۱۰	۲۵۳۰/۱	۲۵۸۲/۱
۱۱	۳۷۲۵/۳	۳۷۹۹/۹
۱۲	۳۷۵۱/۸	۳۸۰۶/۹
۱۳	۵۶۳۴/۴	۵۷۴۴/۱
۱۴	۵۶۳۷/۴	۵۷۴۷/۹
۱۵	۶۶۳۷/۹	۶۷۵۷/۵
۱۶	۶۶۴۳/۴	۶۷۶۵/۲
۱۷	۸۷۱۱/۸	۸۸۷۸/۳
۱۸	۸۷۱۵/۶	۸۸۸۲/۱
۱۹	۹۳۰۵/۵	۹۳۶۳/۶

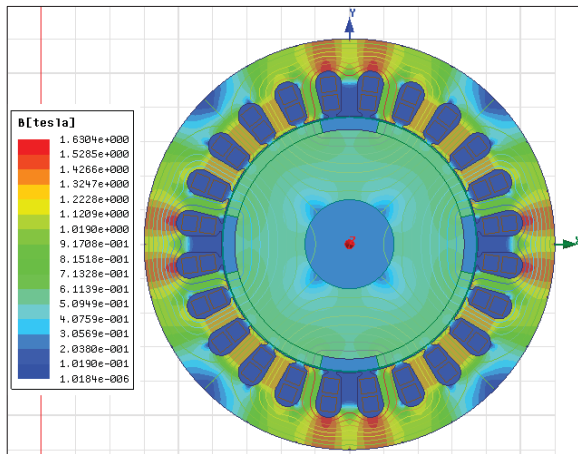


شکل (۱۵): مدل استاتور با حفره در انتهای یوغ

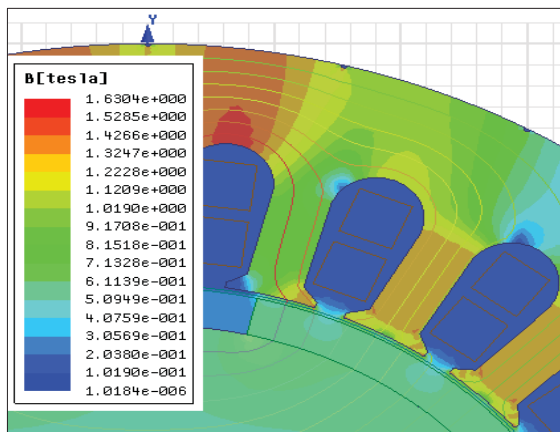
در شکل (۱۶)، توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در مقطع موتور با استاتور بهبودیافته برای این حالت، ارائه گردیده است.



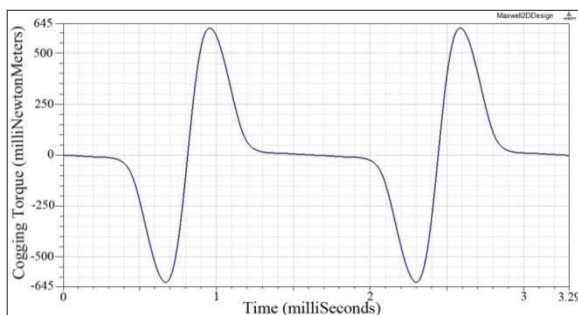
شکل (۱۶): توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در مقطع موتور BLDC با استاتور بهبودیافته (a=0.5 mm, b=22 mm)



شکل (۲۰): توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در مقطع موتور BLDC با استاتور بهبودیافته (a=0.5 mm, b=22.5 mm)

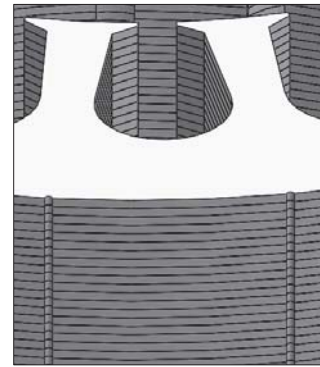


شکل (۲۱): توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در نمای نزدیک به حفره‌ها (a=0.5 mm, b=22.5 mm)



شکل (۲۲): مشخصه گشتاور دندانه‌ای در موتور BLDC با استاتور بهبودیافته (a=0.5 mm, b=22.5 mm)

میزان حداکثر گشتاور دندانه‌ای در این حالت نیز برابر با ۶۲۲ mN.m است و نسبت به موتور اولیه تغییری نداشته است. در نتیجه هر قید دوم مسئله نیز در این حالت رعایت شده است. در نتیجه سه راه حل پیشنهادی مؤثر برای بهبود ساختار استاتور و انتقال فرکانس‌های طبیعی آن به مقادیر بالاتر در این قسمت معرفی شد که با استفاده از آنها، استقامت مکانیکی استاتور بهبود می‌یابد. انتخاب بین این سه روش بستگی به نوع



شکل (۱۹): مدل استاتور با شیارهایی روی دیواره جانبی استاتور

جدول (۹): لیست فرکانس‌های طبیعی استاتور بهبودیافته با شیارهایی روی دیواره جانبی استاتور (a=0.5 mm, b=22.5 mm)

شماره مد	فرکانس‌های طبیعی استاتور اولیه (هرتز)	فرکانس‌های طبیعی استاتور بهبودیافته (هرتز)
۱	۰	۰
۲	۰	۰
۳	۰	۰
۴	۰/۰۰۰۷۲۵۶۱	۰/۰۰۴۱۲۱
۵	۰/۰۰۱۹۳۵۷	۰/۰۰۴۴۲۹۲
۶	۰/۰۰۳۸۴۰۸	۰/۰۰۷۱۲۵۶
۷	۱۴۱۳/۷	۱۳۹۹/۶
۸	۱۴۱۶/۹	۱۴۰۱/۳
۹	۲۵۵۷/۶	۲۵۲۷/۸
۱۰	۲۵۶۶/۹	۲۵۳۰/۱
۱۱	۳۷۷۵/۵	۳۷۲۵/۳
۱۲	۳۷۸۲/۹	۳۷۵۱/۸
۱۳	۵۷۰۵/۳	۵۶۴۴/۴
۱۴	۵۷۱۰/۹	۵۶۳۷/۴
۱۵	۶۷۱۴/۶	۶۶۳۷/۹
۱۶	۶۷۲۱/۵	۶۶۴۳/۴
۱۷	۸۸۲۰/۹	۸۷۱۱/۸
۱۸	۸۸۲۶/۲	۸۷۱۵/۶
۱۹	۹۳۴۸/۸	۹۳۰۵/۵

همان‌طور که در جدول (۹) مشاهده می‌شود، فرکانس‌های طبیعی در مدهای مختلف بهبود یافته‌اند. در شکل (۲۰)، توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی در مقطع موتور در این حالت، نمایش داده شده است. توزیع چگالی شار و خطوط شار مغناطیسی از نمای نزدیک به محل شیارها در شکل (۲۱) نمایش داده شده است. میزان حداکثر چگالی شار مغناطیسی در مقطع استاتور برابر با حدود ۱/۶۳ T است و مشکلی از نظر ورود به اشباع مغناطیسی در این حالت وجود ندارد و بنابراین قید اول مسئله رعایت شده است. مشخصه گشتاور دندانه‌ای در این حالت، در شکل (۲۲) ارائه شده است.



## ۵- مراجع

- [1] R. Krishnan, "Acoustic noise and its control in SRMs," In *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*, 1st ed. Boca Raton, Florida, CRC Press LLC, ch. 7, sec. 2, 2001.
- [2] H. S. Ko and K. J. Kim, "characterization of noise and vibration sources in interior permanent-magnet brushless DC motors," *IEEE T MAGN*, vol. 40, no. 6, pp. 3482-3489, Nov. 2004.
- [3] S. H. Lee, J. P. Hong, S. M. Hwang, W. T. Lee, J. Y. Lee, and Y. K. Kim, "Optimal design for noise reduction in interior permanent-magnet motor," *IEEE T IND APPL*, vol. 45, no. 6, pp. 1954-1960, Nov./Dec. 2009.
- [4] D. Y. Kim, J. K. Nam, and G. H. Jang, "Reduction of magnetically induced vibration of a spoke-type IPM motor using magneto mechanical coupled analysis and optimization," *IEEE T MAGN*, vol. 49, no. 9, pp. 5097-5105, Sep. 2013.
- [5] K. H. Yim, J. W. Jang, G. H. Jang, M. G. Kim, and K. N. Kim, "Forced vibration analysis of an IPM motor for electrical vehicles due to magnetic force," *IEEE T MAGN*, vol. 48, no. 11, pp. 2981-2984, Nov. 2012.
- [6] D. Y. Kim, G. H. Jang and J. K. Nam, "Magnetically induced vibrations in an IPM motor due to distorted magnetic forces arising from flux weakening control," *IEEE T MAGN*, vol. 49, no. 7, pp. 3929-3932, Jul. 2013.
- [7] J. M. Kim, T. Sun, S. H. Lee, D. J. Kim, and J. P. Hong, "Evaluation and improved design about acoustic noise and vibration in IPMSM," *IEEE Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Incheon, pp. 1256-1259, 2010.
- [8] W. Fei and P. C. Luk, "Investigation of radial electromagnetic force density and vibration in a fractional-Slot interior permanent magnet synchronous machine," *IEEE Energy Conversion Congr. and Exposition (ECCE)*, Denver, pp. 2998-3005, 2013.
- [9] H. J. Kim, T. G. Lee, S. O. Kwon, and J. P. Hong, "Vibration analysis according to stator shape design in a PMSM," *IEEE Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Incheon, pp. 1235-1238, 2010.
- [10] J. D. Ede, Z. Q. Zhu, and D. Howe, "Rotor resonances of high-speed permanent-magnet brushless machines," *IEEE T IND APP.*, vol. 38, no. 6, pp. 1542-1548, Nov. /Dec. 2002.
- [11] Z. Q. Zhu, K. Ng, and D. Howe, "Design and analysis of high-speed brushless permanent magnet motors," *8th Int. Conf. Electrical Machines and Drives*, Cambridge, pp. 381-385, 1997.
- [12] T. J. Kim, S. M. Hwang, K. T. Kim, W. B. Jung, and C. U. Kim, "Comparison of dynamic responses for IPM and SPM motors by considering mechanical and magnetic coupling," *IEEE T MAGN*, vol. 37, no.4, pp. 3448-3451, Jul. 2001.
- [13] D. Kim, J. Song, and G. Jang, "Magnetic and structural finite element analysis of rotor vibrations due to magnetic force in IPM motor," *IEEE T MAGN*, vol. 50, no. 2, Feb. 2014.
- [14] P. Vijayraghavan and R. Krishnan, "Noise in electric machines: a review," *IEEE T IND APP.*, vol. 35, no. 5, pp. 251-258, Sep. /Oct. 1999.
- [15] J. F. Gieras, C. Wang, and J. C. Lai, "Stator system vibration analysis," In *Noise of polyphase electric motors*, 1st ed. Boca Raton, Florida, CRC Press LLC, ch. 5, sec. 2&3, 2006.
- [16] A. Leissa, "Vibration of shells," *Acoustic Society of America*, American Ins. of Physics, 1993.

کاربرد موتور و دقت تجهیزات ساخت دارد. روش مورد نظر برای استاتورهای موتورهای BLDC مختلف قابل اعمال می‌باشد. هم‌چنین این روش برای استاتور سایر ماشین‌های الکتریکی نیز قابل پیاده‌سازی است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف افزایش استقامت مکانیکی استاتور موتور BLDC و کاهش صدا و لرزش شدید ناشی از بروز تشدید در آن، یک روش جدید پیشنهاد شده است. در این روش از جایگذاری یک حفره در نواحی مشخصی از مقطع استاتور استفاده شده که هر ناحیه شامل یک دندانه و قسمت فوقانی آن در یوغ استاتور است. موقعیت دقیق و قطر حفره‌ها از طریق روش سطح پاسخ و با استفاده از تحلیل‌های فرکانسی انجام شده در محیط نرم‌افزار SolidWorks تعیین گردیده است. استاتور موتور با ویژگی‌های دقیق آن شامل ابعاد، ساختار مورق و جنس ورقه‌ها، با لحاظ ویژگی‌های ماده به کار رفته در آن‌ها بر اساس اطلاعات شرکت سازنده، در محیط نرم‌افزار مدل‌سازی گردید. آنالیز فرکانسی در این نرم‌افزار بر اساس روش المان محدود است و حل معادلات مربوط به تعیین مدهای طبیعی با روش مقادیر ویژه در سه بعد انجام می‌شود. بر اساس روش سطح پاسخ و تحلیل‌های فرکانسی نشان داده شد که بهترین نتایج در شرایطی به دست می‌آیند که مرکز حفره بر روی شعاع استاتور، که از مرکز لبه دندانه عبور می‌کند، واقع شود. تأثیر جابه‌جایی حفره‌ها در امتداد شعاع‌های مذکور بر تغییرات فرکانس‌های طبیعی ساختار استاتور در مدهای مختلف و به ازای قطرهای مختلف حفره بررسی شد و بهترین محدوده‌های قرارگیری حفره‌ها با قطرهای مختلف برای استاتور مورد مطالعه، معرفی گردید. برای استاتور با ابعاد و ویژگی‌های فیزیکی توصیف شده در این مقاله، مناسب‌ترین موقعیت و قطر حفره برای هر ناحیه مشخص گردید و تحلیل المان محدود عملکرد موتور BLDC با استاتور بهبودیافته جهت صحت‌سنجی مدل جدید انجام شد. با توجه به قیود مربوط به عدم اشباع مغناطیسی هسته‌ی استاتور و عدم افزایش گشتاور دندانه‌ای موتور در اثر ایجاد حفره‌ها، گزینه‌های مناسب دیگری نیز معرفی گردیدند و صحت‌سنجی آن‌ها با تحلیل المان محدود عملکرد موتور انجام شد. با جایگذاری حفره مطابق روش ذکر شده، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که فرکانس‌های طبیعی در مدهای مختلف به میزان حداکثر ۲۷۰ هرتز افزایش می‌یابند. بر این اساس و با توجه به کاهش دامنه محتوای فرکانسی نیروهای تحریک الکترومغناطیسی موتورهای BLDC در فرکانس‌های بالاتر، بر میزان استقامت مکانیکی استاتور افزوده می‌گردد و صدا و لرزش شدید ناشی از بروز احتمالی تشدید کاهش می‌یابد. روش معرفی شده در این مقاله برای استاتورهای انواع دیگر ماشین‌های الکتریکی نیز قابل کاربرد است.



- [17] W. Soedel, "Vibrations of shells and plates," 2nd ed. New York, Marcel Dekker, 1993.
- [18] Ansoft Maxwell 14.0 software package help file.
- [19] Cogent Co., "Electrical steel non oriented fully processed ASTM grades," datasheet, Jan. 2003.

---

**Reducing the Noise and Vibration of the BLDC Motors' Stator  
by Shifting its Natural Frequencies to Higher Values**

**M. Jafarboland\*, H. Bagherian Farahabadi**

**Malek Ashtar University of Technology**

(Received: 21/03/2015, Accepted: 08/12/2015)

**Abstract**

*Regarding the necessity of low noise and low vibration operation of the BLDC motors in some especial applications, a novel method is proposed in this paper in order to shift the natural frequencies of a BLDC motor's stator to higher values. Therefore the noise and vibration of the structural resonances can be reduced since the electromagnetic excitation forces in the BLDC motor have lower magnitudes at higher frequency components. The proposed method is based on placing a single hole, with definite diameter and location, on definite regions of the stator cross sectional area (each region contains one stator tooth and its upper parts in the stator's yoke). The frequency analyses have been done in the SolidWorks software environment and the best diameter and location of each hole is extracted by the Response Surface Methodology (RSM). Preventing the magnetic saturation of the stator structure and the motor cogging torque enhancement prevention are considered as constraints for the problem. The new method also can be used for other types of electrical machines' stator.*

**Keywords:** Stator, Resonance, Noise and Vibration, Hole, SolidWorks

---

\* Corresponding author E-mail: J\_mehrdad405@hotmail.com