



تخمین میدان مغناطیسی دامپ ولو توربوشارژر از طریق اندازه گیری آکوستیک

امیرحسین رضائیان^۱، زهرا پولایی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: poolaei.zahra@iau-tnb.com

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۱ خرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

توربوشارژر

شیربرقی توربو

تخمین سرعت توربو

آکوستیک

چکیده

دستیابی به اندازه‌گیری‌های دقیق سرعت چرخش توربوشارژر یک وظیفه کلیدی برای دست‌یابی به عملکرد خوب کنترل پیش‌رانه در موتورهای احتراقی توربوشارژر است. با این حال، دسترسی مستقیم به قسمت‌های چرخان توربوشارژر نیاز به سنسورهای گران قیمتی دارد که مشکلات قابل اطمینان طولانی‌مدت را ارائه می‌کنند. این تجزیه و تحلیل شامل شبیه سازی‌های عددی همراه با آزمایش‌های تجربی، اثرات متقابل بین پارامترهای کلیدی بر روی نیروی الکترومغناطیسی بر اساس روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی و بهبود طراحی شیربرقی سرعت بالا طراحی شده است. مدل شبیه سازی عددی شیربرقی سرعت بالا در محیط Ansoft Maxwell توسعه یافته است و صحت آن با آزمایش‌های تجربی تأیید شده است. مدل سطح پاسخ نیروی الکترومغناطیسی به منظور تجزیه و تحلیل اثر متقابل بین پارامترهای اصلی استفاده شده است. نتیجه گرفته شد که شش فاکتور متقابل شامل فاصله هوایی با شعاع آرمیچر، جریان محرک با ضخامت آرمیچر، دور سیم پیچ با شعاع قطب جانبی، ضخامت آرمیچر با شعاع آن، ضخامت آرمیچر با شعاع قطب جانبی و شعاع آرمیچر با شعاع قطب جانبی دارای تأثیر قابل توجهی بر نیروی الکترومغناطیسی دارد. علاوه بر این، این بار محاسباتی متوسطی را نشان می‌دهد که به طور مستقیم در واحدهای کنترل موتور تجاری (ECU) بدون نیاز به سخت افزار محاسباتی اضافی قابل پیاده سازی است. ارزیابی‌های تجربی گزارش شده نشان می‌دهد که دقت برآورد در تمام رژیم‌های سرعت چرخشی مجاز عالی است.

Estimating the magnetic field of dump valve turbocharger through acoustic measurement

Amirhossein Rezaeian¹, Zahra Poolaei^{2*}

1- PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: poolaei.zahra@iau-tnb.com

Article Information

Original Research Paper

Received: 31 May 2024

Accepted: 18 August 2024

Keywords:

Turbocharger

Dump Valve

Turbo Speed Estimator

Acoustic

Abstract

Achieving accurate measurements of turbocharger rotation speed is a key task to achieve good propulsion control performance in turbocharged combustion engines. However, direct access to turbocharged rotating parts requires expensive sensors that present reliable long-term problems. This analysis includes numerical simulations with laboratory experiments, interactions between key parameters on the electromagnetic force based on the response surface methodology designed to optimize and improve the design of high-speed solenoid valve (HSV). The effect of change in core structure, coil structure, armature structure, air gap and actuator current on HSV electromagnetic force has been analyzed through a simulation model. Optimal matching values between coil and side pole radius, armature thickness and side pole radius; The armature radius and the lateral pole radius are also determined. The design core is shown with an adaptive discrete-time frequency (FLL) non-linear frequency lock loop filter, which is properly designed to extract the useful frequency content from the obtained audio signal. In addition, it shows a moderate computational load that can be implemented directly in commercial engine control units (ECUs) without the need for additional computing hardware. Reported experimental evaluations show that the estimation accuracy is excellent in all permissible rotational speed regimes.

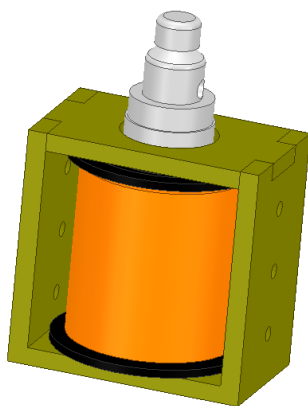
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Rezaeian A, Poolaei Z. Estimating the magnetic field of dump valve turbocharger through acoustic measurement. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jul 22;11(5):49-68. doi: 10.22034/IJME.2024.457398.1959 [In Persian]

۱- مقدمه

شیربرقی سرعت بالا (HSV)^۱ یکی از مهمترین اجزای سیستم توربوشارژر (پرخوران) است که نیروی الکترومغناطیسی قوی و ویژگی‌های واکنش سریع، تأثیر زیادی بر واکنش توربو دارد. نیاز به یک شیر برقی با سرعت بالا به منظور رعایت مقررات فزاینده انتشار و افزایش مصرف سوخت افزایش یافته است. بنابراین انجام تحقیقات در مورد HSV اهمیت زیادی دارد. با وجود این که گزارش‌های تحقیقاتی زیادی در این زمینه وجود دارد، اکثر آن‌ها بر مدل‌سازی، آزمایش پاسخ پویا و روش کنترل HSV تمرکز می‌کنند. مولمان و همکاران [۱]، روش‌های مختلف اجزای محدود برای دینامیک الکترومکانیکی را ارائه و مقایسه کردند. کیو و همکاران [۲]، یک مدل شبیه‌سازی برقی که شامل یک زیر مدل مکانیکی و یک زیر مدل مغناطیسی بود را توسعه دادند. در مراجع [۳، ۴]، مدل نظری جامع فیزیکی یک شیر برقی با استفاده از روش اجزای محدود ساخته شد که می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد توزیع دما، تغییرشکل‌های مکانیکی، حرارتی و تنش‌ها ارائه دهد. در مراجع [۵، ۶]، یک تجهیزات آزمایشی از ویژگی‌های پاسخ دینامیکی برای شیر برقی طراحی شد و تأثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ دینامیکی از طریق آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. انجیدی و همکاران [۷]، نوع جدیدی از ماژول راه‌اندازی برقی را ارائه کردند که می‌تواند زمان پاسخگویی به شیر برقی را کوتاه کرده، مصرف انرژی را کاهش داده و پیچیدگی نرم‌افزار را کاهش دهد. انجیدی و همکاران [۸]، روش کنترل حلقه بسته تطبیقی غیر مستقیم را توصیف کردند. این روش می‌تواند تشخیص قوی و کنترل زمان بسته شدن و نگه داشتن جریان را فعال کند. ژانگ و همکاران [۹]، تأثیر استراتژی‌های مختلف کنترل اعمال شده در راه‌اندازی انژکتور برقی را مورد بررسی قرار دادند و ارتباط زیادی بین تأخیر باز شدن و جریان برقی یافت شد. زمان سوئیچ را می‌توان از طریق مدارهای پیشنهادی و استراتژی‌های کنترل بهینه کرد. از سوی دیگر، تخمین و محاسبه میدان مغناطیسی، به دلیل کاربردهای مختلف آن در صنایع و قطعات مختلف؛ همواره مورد توجه محققان و مهندسان بوده است [۱۰-۱۳] مقدار سلونوئید به منظور توسعه یک سیستم مقایسه‌ای HSV باید در مراحل اولیه توسعه سیستم مورد مطالعه قرار گیرد. تحقیق در مورد پارامترهای کلیدی نیروی الکترومغناطیسی HSV برای طراحی و بهینه‌سازی آن اهمیت زیادی دارد که به ندرت گزارش شده است. علاوه بر این، اثر متقابل بین این پارامترهای مختلف و اثر ترکیبی آن‌ها بر نیروی الکترومغناطیسی نیز تحقیقات بیشتری را ضروری می‌سازد. شکل شماره ۱ شماتیک HSV در یونیت دامپ ولو را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیک HSV در واحد دامپ ولو

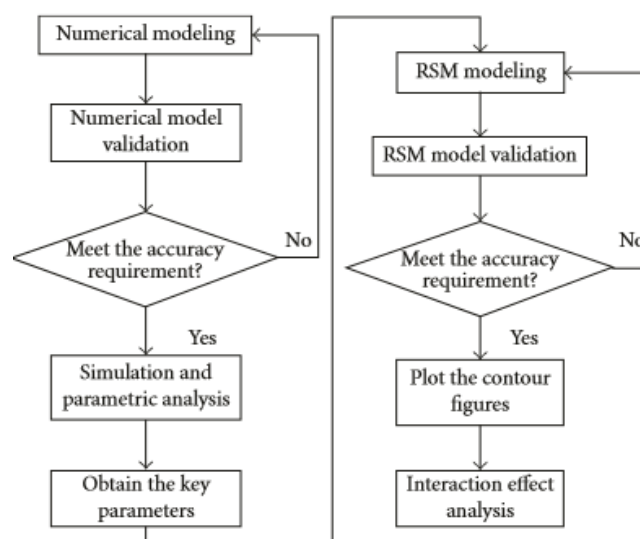
این مقاله بر HSV دامپ ولو متمرکز بوده که در شکل ۱ نشان داده شده است. HSV عمدتاً شامل آرمیچر، هسته آهنی، سیم پیچ، سوپاپ، فنر تنظیم مجدد، ترمینال و دوشاخه است. پس از روشن شدن برق، هسته آرمیچر را جذب می‌کند. سوپاپ را می‌کشد؛ مخروط را می‌بندد؛ حلقه سوخت را قطع می‌کند و بنابراین فشار زیادی را در محفظه پمپ ایجاد می‌کند که برای تزریق سوخت مورد نیاز است. بازنشانی فنر، آرمیچر را مجبور به تنظیم مجدد سوپاپ می‌کند، سوخت فشار بالا را در داخل محفظه پمپ کاهش می‌دهد و تزریق سوخت را متوقف می‌کند. کنترل زمان تزریق و مقدار تزریق را می‌توان با تنظیم دقیق زمان بسته شدن و مدت زمان شیر کنترل به دست آورد [۱۴].

¹ High-Speed Solenoid Valve

بنابراین در این مقاله، شبیه سازی‌های عددی همراه با آزمایش‌های تجربی انجام شده است و روش تجزیه و تحلیل مبتنی بر روش سطح پاسخ برای بررسی اثرات متقابل بین پارامترهای کلیدی بر نیروی الکترومغناطیسی HSV پیشنهاد شده است. اثر پارامترهای فردی HSV به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است که با توجه به اثر متقابل بین دو پارامتر، تحقیقات بیشتری دنبال می‌شود. پاسخ سطح^۱ پاسخ نیروی الکترومغناطیسی در این بررسی به دست آمده است و عوامل متقابل قابل توجهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. کار تحقیقاتی انجام شده در این مقاله به طور قاطع راهنمایی‌های نظری خاصی را برای طراحی و بهینه‌سازی HSV ارائه می‌دهد.

۲- روش شناسی

در این مقاله کار تحقیقاتی خود را از دیدگاه ویژگی‌های مغناطیسی HSV انجام شده است که عمدتاً به ویژگی‌های نیروی الکترومغناطیسی اشاره دارد به شرطی که سیستم مکانیکی و سیستم الکترومغناطیسی HSV هر دو در حالت پایدار باشند. برای محاسبه نیروی الکترومغناطیسی نیازی به در نظر گرفتن انواع حالت‌های گذرا نیست. نیروی الکترومغناطیسی به وسیله جریان ثابت سیم پیچ و طراحی خود HSV تعیین می‌شود. شکل ۲ روش و فرایند تحقیق را نشان می‌دهد. در ابتدا، مدل عددی HSV توسعه داده شد و اعتبار یافت. در مرحله دوم، پارامترهای ویژگی‌های الکترومغناطیسی با استفاده از مدل عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پارامترهای تأثیرگذار کلیدی به دست آمد. ثالثاً، مدل سطح پاسخ پارامترهای کلیدی توسعه داده و تأیید شد و در نهایت، اثر متقابل با ترسیم نقشه کانتور مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۲ فلوجارت تحقیق

۲-۱- مدل سازی عددی

۲-۱-۱- تئوری محاسبه نیروی الکترومغناطیسی

مدل شبیه سازی عددی HSV در Ansoft Maxwell توسعه یافته است. آرمیچر عملاً توسط "s" جابه‌جا می‌شود و نیروی الکترومغناطیسی روی آرمیچر در جهت جابجایی "s" با رابطه زیر داده می‌شود:

$$F = \frac{dW(s, i)}{ds} \quad (1)$$

در معادله فوق $W(s, i)$ کوانرژی مغناطیسی سیستم و i جریان ثابت سیم‌پیچ است. $W(s, i)$ توسط رابطه بدست می‌آید:

$$W(s, i) = \int_v^V \left(\int_0^H B - dH \right) dV \quad (2)$$

¹ Response Level

که V منطقه خالی تقریباً مخدوش در اطراف آرمیچر است، H میدان مغناطیسی و B شدت القای مغناطیسی می باشد. بعد از ترکیب رابطه ۱ و ۲، رابطه زیر بدست می آید:

$$F = \frac{\partial}{\partial s} \left[\int_V \left(\int_0^H B \cdot dH \right) dV \right] \quad (3)$$

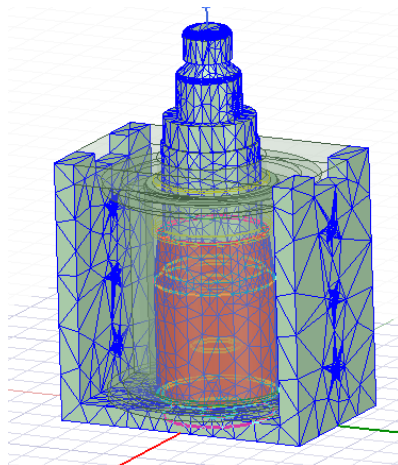
معادلات ماکسول برای میدان مغناطیسی فوق را می توان به صورت زیر ساده کرد:

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= J \\ \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

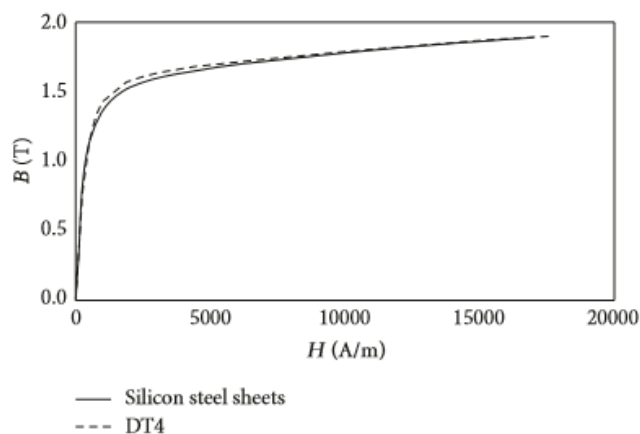
برای حل رابطه ۴ از روش اجزای محدود استفاده می شود و سپس H و B به دست می آید. در نهایت، نیروی الکترومغناطیسی در رابطه ۳ محاسبه می گردد.

۲-۱-۲- مدل عددی در ماکسول

HSV یک ساختار غیر نامتقارن است، بنابراین مدل سه بعدی در محیط Ansoft Maxwell توسعه یافته است تا نتایج دقیق را به دست آورد. سوپاپ، فنر تنظیم مجدد آرمیچر، دوشاخه، فنر، پوسته و حلقه مواد غیر مغناطیسی هستند که نفوذپذیری مغناطیسی آنها شبیه هوا است. بنابراین، آنها در طول مدل سازی نادیده گرفته شده اند در حالی که هسته آهن و آرمیچر در نظر گرفته شده است. این امر نه تنها می تواند کارایی محاسبات را افزایش دهد، بلکه دقت محاسباتی را نیز تضمین می کند. مدل هسته آهنی در شکل ۳ نشان داده شده است که از ورق های فولادی سیلیکون با ضریب لمینیت ۰٫۹۵ ساخته شده است. منحنی B-H مواد هسته آهنی در شکل ۴ نشان داده شده است. بخش طولی حلقه برای پایانه های ورودی تحریک ساخته شده است. نوع تحریک بر روی جریان تنظیم شده است. مدل آرمیچر نوع DT4 (آهن خالص) در نظر گرفته شده است. سرانجام با استفاده از هوا در اطراف کل مدل، شرایط نامحدود میدان دور ایجاد شده است، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است.

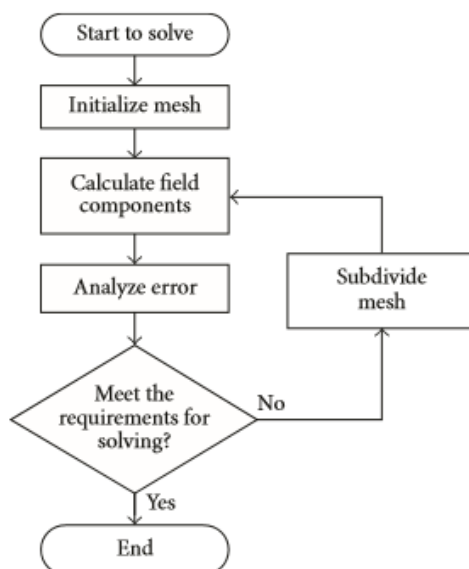


شکل ۳ مدل شبیه سازی دامپ ولو در نرم افزار Ansys



شکل ۴ منحنی های B-H مواد

پس از توسعه مدل و تنظیم نیروی الکترومغناطیسی، آرمیچر به عنوان پارامتر، با مش بندی در یک روش تطبیقی (مطابق با شکل ۵) با بررسی تدریجی برای رفع خطای انرژی یا دستیابی به حداکثر زمان تکرار حل می کند.



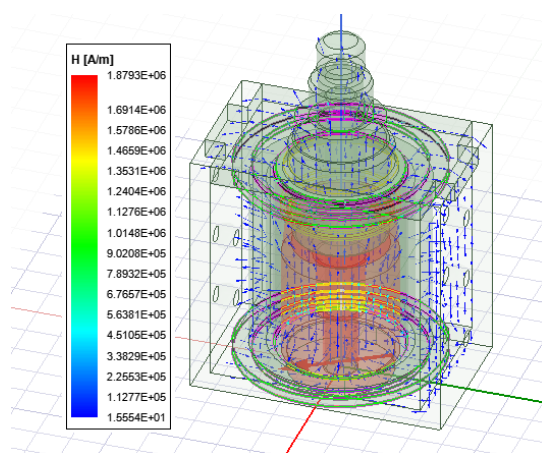
شکل ۵ روش مش تطبیقی

۲-۲- اعتبار سنجی مدل عددی

مقدار نیروی الکترومغناطیسی که آرمیچر را در جهت محوری هدایت می کند، توانایی HSV را کنترل می کند. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نیروی الکترومغناطیسی در آزمایش شار مغناطیسی دامپ ولو اندازه گیری می شود. جدول ۱ دقت اندازه گیری تجهیزات اصلی را نشان می دهد.

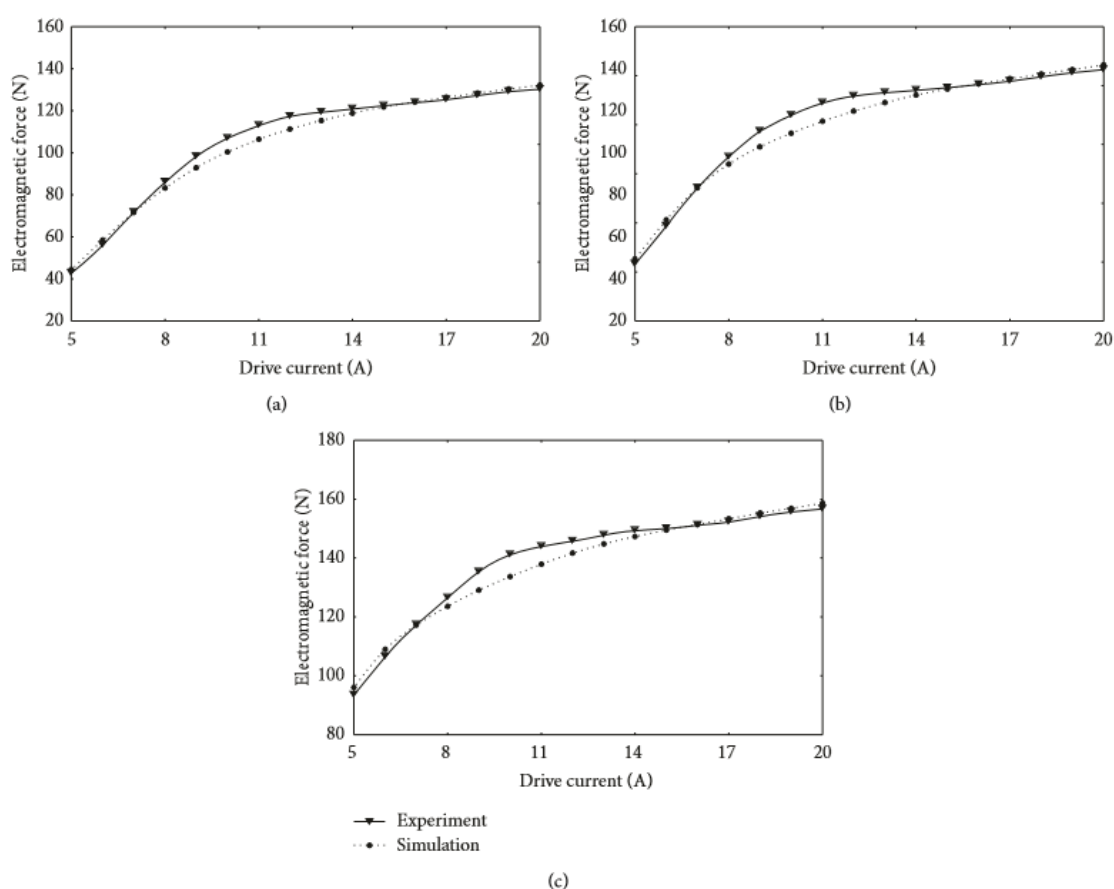
جدول ۱ دقت اندازه گیری تجهیزات اصلی

تجهیزات	سنسور نیرو	جریان سنج
نوع	CZLYB-3	1146
تولیدکننده	Changdu Xingpu Transducer	Agilent technology
محدوده کاری	0-700 N	1-100 A
دقت	$\leq \pm 0.05\%$	$\leq \pm 4\%$



شکل ۶ شار مغناطیسی دامپ ولو

هسته آهنی در انتهای آزاد قرار دارد، در حالی که آرمیچر و سنسور نیروی کرنش مقاومتی که آرمیچر را متصل می کند در انتهای ثابت قرار گرفته اند. ارتفاع انتهای آزاد به گونه ای تنظیم می شود که محور هسته آهنی و محور آرمیچر در یک خط افقی قرار بگیرند. فاصله هوایی (فاصله بین هسته آهنی و آرمیچر) با تنظیم فاصله بین انتهای آزاد و انتهای ثابت تغییر می کند. آرمیچر پس از جریان ثابت به سمت هسته آهنی جذب می شود و در نتیجه توسط سنسور یک سیگنال ولتاژ ضعیف ایجاد می گردد. این سیگنال ولتاژ اندازه نیروی الکترومغناطیسی را در جهت محوری پس از عبور از تقویت کننده با دقت بالا فراهم می کند. در این پژوهش گروه های متعددی از نتایج تجربی با تغییر فاصله هوایی و اندازه جریان ثابت به حالت آزمایشی به دست آمده اند. شکل های ۷-الف و ۷-ج مقایسه هایی را بین نتایج شبیه سازی شده و تجربی نیروی الکترومغناطیسی در جریان های مختلف محرک و شکاف های هوای کار نشان می دهد. به آسانی می توان استنباط کرد که نتایج شبیه سازی شده و تجربی تحت جریان های مختلف درایو با حداکثر انحراف ۰.۶٪ که در محدوده قابل قبول است، تطابق دارد. به طور خلاصه، مدل عددی توسعه یافته، با نتایج تجربی منسجم است و بنابراین می تواند نیروی الکترومغناطیسی شیر برقی را به طور دقیق پیش بینی کند.



شکل ۷ مقایسه آزمایشی و نیروی الکترومغناطیسی شبیه سازی شده روی شکاف هوای الف (۰.۲ mm، ب) ۰.۱۵ mm، و ج) ۰.۱ mm

RSM-۳-۲

RSM ۱-۳-۲ تئوری

این شیوه از روش ریاضی، تجزیه و تحلیل آماری و روش طراحی تجربی ناشی می شود و اغلب برای کشف مدل ریاضی بین خروجی پاسخ و عوامل تأثیرگذار سیستم یا فرآیند ناشناخته استفاده می شود [۱۵]. مدل سطح پاسخ برای تحقیقات حاضر به شرح زیر است. فرض می شود که پارامتر یا نقطه طراحی بردار ابعادی ($x \in R^n$) است و رابطه زیر را با پاسخ دارد:

$$y(x) = f(x) + \varepsilon \quad (5)$$

اما رابطه تابع واقعی ناشناخته است و می تواند بسیار پیچیده باشد و ϵ_0 عبارت خطا است. طبق تجربه مهندسی، معمولاً استفاده از یک مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم، عملکرد واقعی را در یک منطقه نسبتاً کوچک جایگزین می کند. شکل کلی مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم به شرح زیر است [۱۵]:

$$y(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \epsilon = \sum_{i=0}^k \alpha_i \varphi_i(x) + \epsilon \quad (6)$$

در معادله فوق ρ_i تابع اساسی و k تعداد توابع اساسی است که برابر $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$ ضرایب ناشناخته $A = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k]$ را با حداقل مربع خطا حل می گردد.

$$E(\epsilon) = \sum_{j=1}^q \epsilon^2 = \sum_{j=1}^q \left[y(x_j) - \sum_{i=0}^k \alpha_i \varphi_i(x_j) \right]^2 \quad (7)$$

از معادلات فوق می توان به دست آورد:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (8)$$

در معادله بالا Y بردار پاسخ در q نقاط طراحی آزمایشی و X ماتریس تابع پایه است. نقاط طراحی آزمایشی با بهینه سازی ابر مکعب لاتین (OLHD) و مقادیر پاسخ با مدل عددی HSV به دست می آید.

۲-۳-۲- OLHD

طراحی ابر مکعب لاتین (LHD) یکی از طرح های پرکننده فضا است که در آن فضای طراحی هر عامل به طور مساوی تقسیم شده است. این سطوح از عوامل به طور تصادفی برای تعیین n نقاط برای تعیین ماتریس طراحی ترکیب می شوند. نقاط طراحی ممکن است به دلیل ویژگی های ترکیب تصادفی توسط LHD به طور نامساوی برای فضای طراحی با ابعاد بالا توزیع شود؛ اما OLHD دارای فضای بهتر و یکنواختی است زیرا بر اساس LHD است و از الگوریتم بهینه سازی خاصی استفاده می کند تا نقاط طراحی تا حد ممکن در کل فضای طراحی توزیع شود. معیار فاصله حداکثر φ_p در این مقاله اتخاذ شده است [۱۶].

۲-۳-۳- ارزیابی مدل سطح پاسخ

مدل سطح پاسخ چند جمله ای معمولاً توسط Q^2 . R^2 ارزیابی می شود. R^2 نشان دهنده میزان سازگاری بین مدل رگرسیون و نتایج تجربی برای به دست آوردن مدل رگرسیون است. Q^2 نشان دهنده توانایی پیش بینی مدل رگرسیون است. هر دو مقادیر R^2 , Q^2 بین صفر و یک است. به طور معمول اگر این مقادیر نزدیک به یک باشند، مدل دقیق تر است. مورد دیگری را در نظر گرفته شود که R^2 بیش از ۰٫۹ و Q^2 بیش از ۰٫۵ است. تفاوت بین R^2 و Q^2 کمتر از ۰٫۳ است که به این معنی است که مدل دارای قابلیت پیش بینی خوبی است. اگر تفاوت بیش از ۰٫۳ باشد، مدل چندان ایده آل نیست [۱۷]. در نظر گرفته شود:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{residual}} (df_{\text{residual}} + df_{\text{model}})}{(SS_{\text{residual}} + SS_{\text{model}}) df_{\text{residual}}} \quad (9)$$

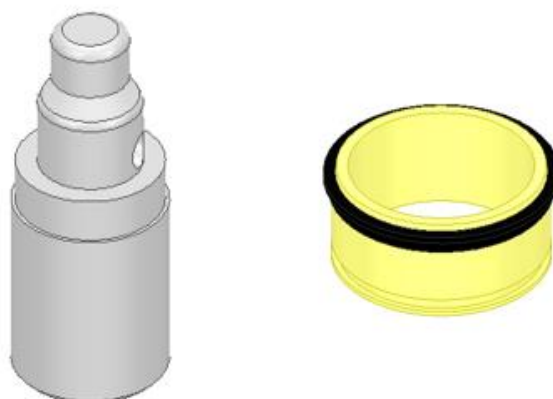
$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{\text{residual}} + SS_{\text{model}}} \quad (10)$$

در معادلات فوق $SS_{\text{residual}} \cdot df_{\text{residual}}$ و $SS_{\text{model}} \cdot df_{\text{model}}$ و $PRESS$ به ترتیب مربع مجموع باقی مانده، درجه باقیمانده و مجموع رگرسیون مربعات، درجه رگرسیون و مجموع باقی مانده پیش بینی شده است.

۳- نتیجه و تجزیه و تحلیل

۳-۱- تجزیه و تحلیل پارامترهای واحد

پارامترهای HSV عمدتاً شامل هسته آهن، سیم پیچ، آرمیچر، کنترل و مونتاژ است. این بخش تجزیه و تحلیل بسیاری از پارامترهای آن را ارائه می دهد که برخی از آن ها در شکل ۸ نشان داده شده است. هنگام انجام تجزیه و تحلیل تک پارامتری، همه پارامترهای دیگر با مقادیر مرجع خود در نظر گرفته شده اند. جدول ۲ مقادیر مرجع و محدوده این پارامترها را خلاصه می کند.



شکل ۸ شماتیک قسمت بوشینگ و هسته متحرک

جدول ۲ پارامترهای مهم مدل

پارمتر	مقدار مرجع	دامنه
	هسته آهنی	
طول قطب (mm)	۶/۸	۶ ~ ۹/۲
ضخامت یوغ مغناطیسی (mm)	۲/۵	۱ ~ ۵
شعاع قطب کناری (mm)	۸/۲۵	۷/۶ ~ ۹/۶
	سیم پیچ	
چرخش	۶۰	۲ ~ ۱۰۰
مکان (mm)	۰/۳	۰ ~ ۱/۲
	آرمیچر	
شعاع (mm)	۱۰/۲	۷/۶ ~ ۱۰/۸
ضخامت (mm)	۳/۱	۲/۱ ~ ۴/۱
	مجموعه کامل	
شکاف هوایی مورد استفاده (mm)	۰/۲۵	۰/۰۵ ~ ۰/۳
	کنترل	
جریان درایو (A)	۱۶	۵ ~ ۲۵

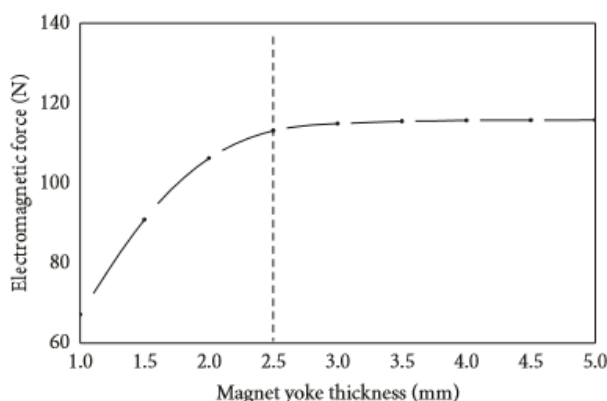
۳-۱-۱- تجزیه و تحلیل پارامترهای هسته آهن

الف. طول قطب

هنگامی که طول قطب از ۶ به ۹٫۲ میلی متر تغییر می‌کند، حداکثر تغییر نیروی الکترومغناطیسی با مقدار ۰٫۳۷ نیوتن نامحسوس است. این رفتار را می‌توان به شرح زیر توضیح داد. از یک سو، نشت شار مغناطیسی در منطقه A (از سیم پیچ به سمت یوغ آهنربایی) همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش طول قطب، افزایش می‌یابد که باعث کاهش مقاومت مغناطیسی کل مدار مغناطیسی می‌شود. در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش طول قطب، مقاومت هسته آهن افزایش می‌یابد که نیروی الکترومغناطیسی را کاهش می‌دهد. با این حال، درصد نشت شار مغناطیسی در کل شار مغناطیسی بسیار ناچیز است. علاوه بر این، مقاومت مغناطیسی مدار مغناطیسی عمدتاً در فاصله‌هوایی است زیرا نفوذپذیری مغناطیسی هوا بسیار کمتر از مواد هسته آهن و آرمیچر است. بنابراین، تغییر نیروی الکترومغناطیسی ناشی از طول قطب اندک است. بنابراین طول قطب فقط باید بیشتر از ارتفاع سیم پیچ باشد.

ب. ضخامت طوقه مگنت

همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، نیروی الکترومغناطیسی با افزایش ضخامت یوغ آهنربایی از ۱,۰ میلی متر به ۲,۵ میلی متر به سرعت افزایش می یابد، در حالی که هنگامی که ضخامت یوغ مگنت بیش از ۲,۵ میلی متر افزایش می یابد، نیروی الکترومغناطیسی به طور نامحسوس افزایش می یابد.



شکل ۹ تاثیر ضخامت یوغ آهنربا بر نیروی الکترومغناطیسی

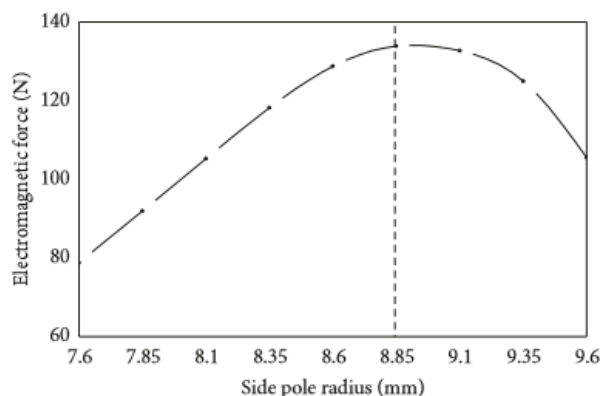
این رفتار را می توان به شرح زیر توضیح داد. نیروی الکترومغناطیسی را می توان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (11)$$

F نیروی الکترومغناطیس برحسب نیوتن، B شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی و S سطح موثر برحسب مترمربع می باشد. وقتی ضخامت یوغ آهنربایی کوچک است، مساحت شار مغناطیسی یوغ آهنربایی نیز کوچک است که باعث اشباع مغناطیسی زودرس می شود. این مورد، افزایش شار مغناطیسی اصلی را محدود می کند، که شدت القای مغناطیسی فاصله هوا را تضعیف می کند. با افزایش ضخامت یوغ آهنربایی، اشباع مغناطیسی ضعیف می شود و شار مغناطیسی اصلی به سرعت افزایش می یابد. در نتیجه، شدت القای مغناطیسی فاصله هوا قوی می شود. بنابراین، نیروی الکترومغناطیسی به سرعت افزایش می یابد. با این حال، مساحت شار مغناطیسی یوغ آهنربایی وقتی ضخامت یوغ آهنربای بیش از ۲,۵ میلی متر است به اندازه کافی بزرگ است که شار مغناطیسی اصلی را محدود نمی کند. در نتیجه، شدت القایی مغناطیسی فاصله هوا تغییر نمی کند و بنابراین تغییر نیروی الکترومغناطیسی دیگر مشخص نیست. مشخص شده است که کوچکترین ناحیه شار مغناطیسی یوغ آهنربایی نزدیک به قطب اصلی است. کوچکترین مساحت شار مغناطیسی یوغ آهنربایی تقریباً سطح جانبی "S" استوانه است که در شکل ۸ نشان داده شده است. بنابراین، ضخامت یوغ آهنربایی می تواند نیمی از شعاع قطب اصلی باشد. این مورد می تواند اطمینان حاصل کند که یوغ آهنربا دارای مقدار کافی شار مغناطیسی است تا از اشباع زود هنگام مغناطیسی جلوگیری کند.

پ. شعاع قطب جانبی

همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، شعاع قطب جانبی تأثیر آشکاری بر نیروی الکترومغناطیسی دارد. نیروی الکترومغناطیسی ابتدا افزایش می یابد و سپس با افزایش شعاع قطب جانبی به تدریج کاهش می یابد. دلایل این امر را می توان به شرح زیر توضیح داد. با ثابت نگه داشتن عرض سیم پیچ، یعنی w ، همان طور که در شکل ۸ ثابت است، شعاع قطب جانبی مساحت قطب اصلی را مشخص می کند. بنابراین برای شعاع قطب جانبی کوچکتر قطب اصلی سریعتر اشباع می شود که افزایش شار مغناطیسی اصلی را محدود می کند. به طور مشابه، با افزایش شعاع قطب جانبی، قطب اصلی موثر بزرگ می شود. در نتیجه اشباع مغناطیسی ضعیف شده و نیروی الکترومغناطیسی افزایش می یابد. با این حال، هنگامی که شعاع قطب جانبی بیش از ۸,۸۵ میلی متر باشد، مساحت شار مغناطیسی قطب جانبی بسیار کوچک است و در نتیجه از نظر مغناطیسی اشباع می شود. هرچه شعاع قطب جانبی بیشتر از ۸,۸۵ میلی متر باشد، اشباع و نیروی الکترومغناطیسی بدتر خواهد بود. بنابراین، هنگامی که پارامترهای دیگر ثابت می مانند، شعاع قطب جانبی اندازه بهینه دارد.

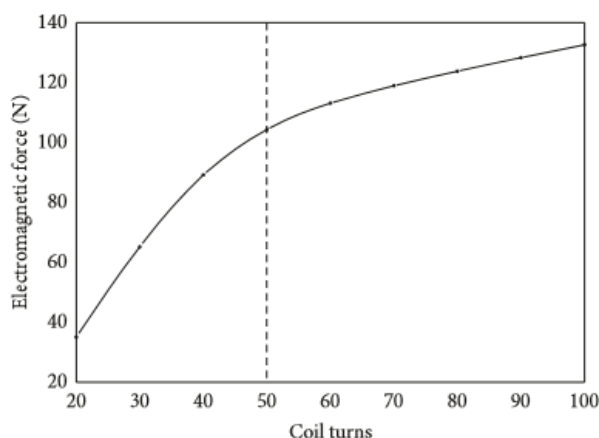


شکل ۱۰ تأثیر شعاع قطب جانبی نیروی الکترومغناطیسی

۳-۱-۲- تجزیه و تحلیل پارامترهای سیم پیچ

الف. تعداد دور

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نیروی الکترومغناطیسی ابتدا به سرعت افزایش می‌یابد و سپس با افزایش چرخش سیم پیچ سرعت آن کاهش می‌یابد. می‌توان آن را به شرح زیر توضیح داد. نیروی الکترومغناطیسی توسط جزء محوری شدت القای مغناطیسی، در فاصله هوایی تعیین می‌گردد. زمانی که جریان درایو بدون تغییر باقی بماند، افزایش دور، پتانسیل مغناطیسی را افزایش می‌دهد. این مورد منجر به افزایش شدت القای مغناطیسی در فاصله هوای کار می‌شود و در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی را افزایش می‌دهد. با این حال، هنگامی که تعداد دورهای سیم‌پیچ بیش از ۵۰ می‌شوند، میدان مغناطیسی به تدریج به اشباع می‌رود. در نتیجه، شار مغناطیسی مدار مغناطیسی و شدت القای مغناطیسی در فاصله هوایی دیگر افزایش نمی‌یابد. بنابراین سرعت افزایش نیروی الکترومغناطیسی کند می‌شود. هرگونه افزایش دور کویل اتلاف مواد بوده و منجر به افزایش مقاومت سیم پیچ می‌شود. این امر باعث افزایش تلفات و بهره‌وری حرارتی سیم پیچ می‌شود که عمر مفید شیر برقی را کوتاه می‌کند. علاوه بر این، باعث افزایش اندوکتانس سیم پیچ می‌شود که به نوبه خود سرعت افزایش جریان در روند بسته شدن شیر برقی را کاهش داده و سرعت جریان محرک را در روند باز شدن شیر برقی کاهش می‌دهد. بنابراین افزایش دورسیم پیچ منجر به واکنش دینامیکی بدتر HSV می‌شود.

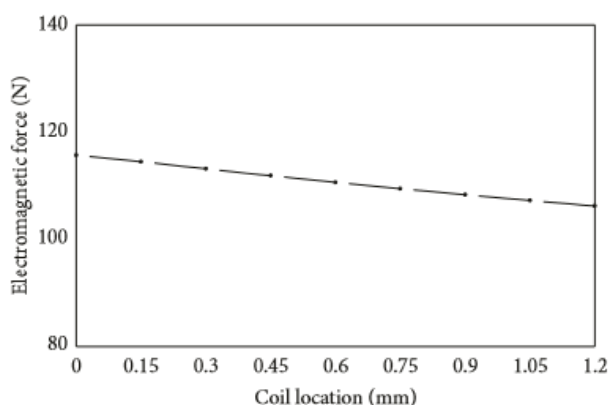


شکل ۱۱ تأثیر سیم پیچ نیروی الکترومغناطیسی

ب. محل سیم پیچ

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، نیروی الکترومغناطیسی با افزایش فاصله محل سیم پیچ از فاصله هوای کار کمی کاهش می‌یابد. تغییر محل سیم پیچ بر شار نشت مغناطیسی دو فضا تأثیر می‌گذارد. یک فضا ناحیه A است، و دیگری ناحیه B است

(از سیم پیچ به سمت پایین تا آرمیچر) همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است. اثر شار نشت مغناطیسی در ناحیه A قبلاً در تجزیه و تحلیل طول قطب ذکر شده است، می تواند مقاومت مغناطیسی کل مدار مغناطیسی را کاهش دهد. شار نشت مغناطیسی در ناحیه B نمی تواند از طریق آرمیچر عبور کند. این بدان معناست که در افزایش نیروی الکترومغناطیسی سهم نیست و بنابراین بی فایده است؛ اما هنگامی که سیم پیچ به آرمیچر نزدیک می شود، شار نشت مغناطیسی در ناحیه A افزایش می یابد و شار نشت مغناطیسی در ناحیه B کاهش می یابد. بنابراین منجر به نیروی الکترومغناطیسی قوی تری می شود؛ اما شار نشت مغناطیسی در مقایسه با شار مغناطیسی کار بسیار کوچک است، بنابراین تأثیر محدودی بر موقعیت سیم پیچ بر نیروی الکترومغناطیسی دارد. سیم پیچ اغلب با رزین فنولیک آب بندی می شود تا از خوردگی ناشی از سوخت جلوگیری شود. بنابراین، همیشه فاصله خاصی از سیم پیچ تا فاصله هوایی وجود خواهد داشت.

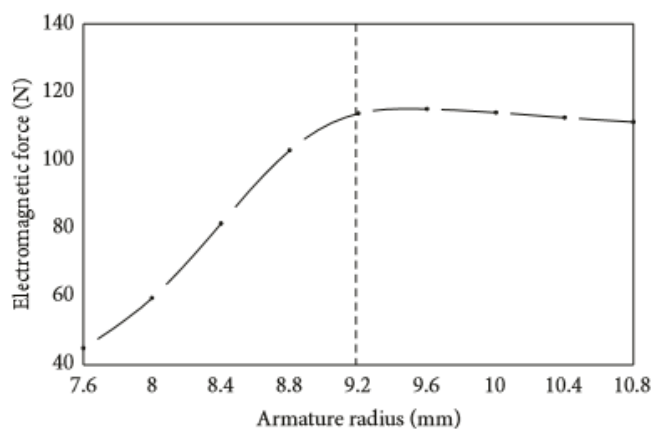


شکل ۱۲ تأثیر مکان سیم پیچ بر نیروی الکترومغناطیسی

۳-۱-۳- تجزیه و تحلیل پارامترهای آرمیچر

الف. شعاع آرمیچر

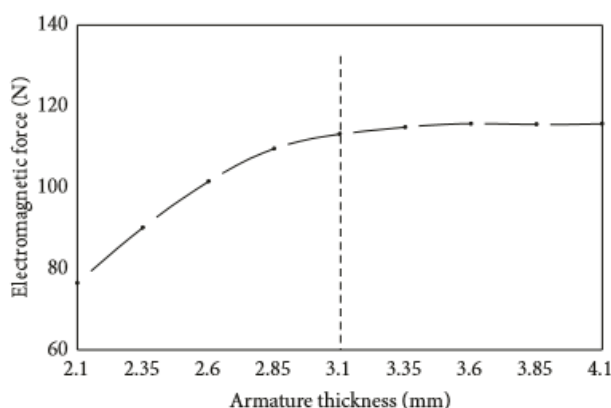
همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، نیروی الکترومغناطیسی با افزایش شعاع آرمیچر از ۷٫۶ میلی متر به ۹٫۲ میلی متر تقریباً خطی افزایش می یابد در حالی که با افزایش بیشتر شعاع آرمیچر تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. افزایش شعاع آرمیچر باعث افزایش ناحیه جذب موثر و در نتیجه افزایش نیروی الکترومغناطیسی می شود. با این حال، هنگامی که شعاع آرمیچر بیش از ۹٫۲ میلی متر است، منطقه جذب موثر تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. بنابراین، تغییر نیروی الکترومغناطیسی دیگر مشخص نیست.



شکل ۱۳ تأثیر شعاع آرمیچر بر نیروی الکترومغناطیسی

ب. ضخامت آرمیچر

همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، تأثیر ضخامت آرمیچر مشابه شعاع آرمیچر بر نیروی الکترومغناطیسی است. نیروی الکترومغناطیسی با افزایش ضخامت آرمیچر از ۲٫۱ میلی متر به ۳٫۱ میلی متر تقریباً خطی افزایش می یابد در حالی که با افزایش بیشتر ضخامت آرمیچر تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. یکی از اثرات افزایش ضخامت آرمیچر، کاهش رلوکتانس مغناطیسی آرمیچر است. این مورد منجر به افزایش شار مغناطیسی مدار شده و در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی قوی می شود. از طرف دیگر، با افزایش ضخامت آرمیچر، مساحت شار مغناطیسی در امتداد شعاعی آرمیچر افزایش می یابد. در نتیجه شدت القایی مغناطیسی آرمیچر کاهش می یابد و اشباع زودرس میدان مغناطیسی در آرمیچر مشکل می شود. با این حال، مساحت شار مغناطیسی آرمیچر به اندازه کافی بزرگ است وقتی ضخامت یوغ آهنربا بیش از ۳٫۱ میلی متر است و ضخامت آرمیچر در این شرایط بر میدان مغناطیسی تأثیر مشخصی ندارد. بنابراین، تغییر نیروی الکترومغناطیسی همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، مشهود نیست.

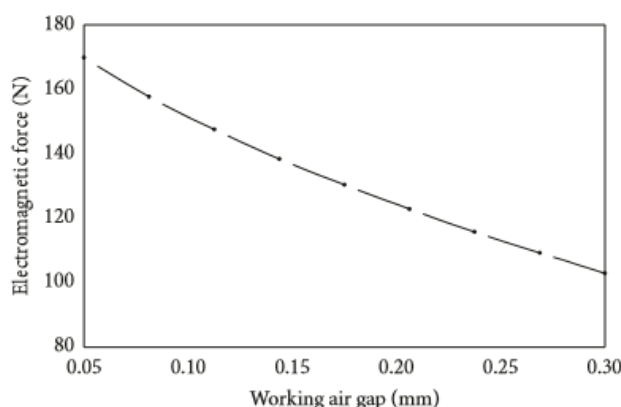


شکل ۱۴ تأثیر ضخامت آرمیچر بر نیروی الکترومغناطیسی

۳-۱-۴- تجزیه و تحلیل پارامترهای مونتاژ

الف. فاصله هوایی

همان طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، نیروی الکترومغناطیسی با افزایش فاصله هوای کار تقریباً خطی کاهش می یابد. نفوذپذیری مغناطیسی هوا بسیار کمتر از مواد هسته آهن و آرمیچر است. بنابراین رلوکتانس کلی مغناطیسی عمدتاً بر روی محل شکاف هوای کار متمرکز است. علاوه بر این، رلوکتانس مغناطیسی متناسب با عرض شکاف هوا است. بنابراین با افزایش فاصله هوایی، رلوکتانس مغناطیسی افزایش می یابد و نیروی الکترومغناطیسی کاهش می یابد.

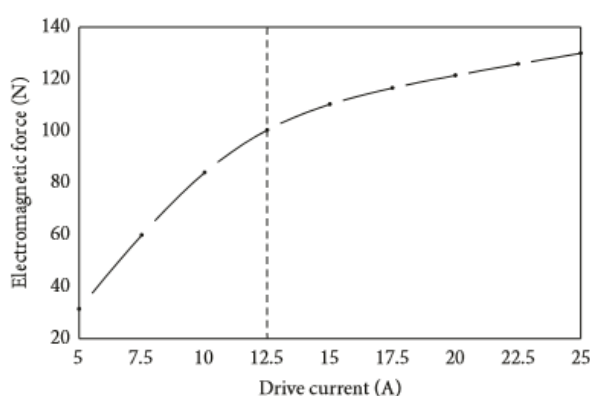


شکل ۱۵ تأثیر شکاف هوای کار بر نیروی الکترومغناطیسی

۳-۱-۵- تجزیه و تحلیل پارامترهای کنترل

الف. جریان راه اندازی

همان طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، قانون تأثیر جریان راه انداز مشابه تعداد دور سیم پیچ بر نیروی الکترومغناطیسی است. نیروی الکترومغناطیسی ابتدا به سرعت افزایش و سپس با افزایش دور درایو به آرامی افزایش می یابد. می توان آن را به شرح زیر توضیح داد. هنگامی که پیچ های سیم پیچ بدون تغییر باقی می ماند، افزایش جریان محرک پتانسیل مغناطیسی را افزایش می دهد. این امر باعث افزایش شدت القای مغناطیسی در فاصله هوایی کار می شود و در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی را افزایش می دهد؛ اما زمانی که جریان درایو بیش از ۱۲٫۵ آمپر باشد، میدان مغناطیسی به تدریج اشباع می شود. شار مغناطیسی مدار و شدت القای مغناطیسی در فاصله هوایی دیگر افزایش نمی یابد. بنابراین سرعت افزایش نیروی الکترومغناطیسی کند می شود. علاوه بر این، هرچه جریان درایو بیشتر باشد، تلفات و بازده حرارتی سیم پیچ بیشتر است. افزایش جریان درایو، عمر مفید شیر برقی را کوتاه می کند. بنابراین می توان ادعا کرد که جریان درایو باید به اندازه کافی برای برآوردن الزامات کاری باشد.



شکل ۱۶ تأثیر نیروی الکترومغناطیسی جریان درایو

۳-۲- تجزیه و تحلیل اثر متقابل دو پارامتر

از طریق تجزیه و تحلیل پارامترهای تک می توان طول قطب مناسب، محل سیم پیچ و ضخامت یوغ آهنربا را تعیین کرد. از آن جا که طول قطب و محل سیم پیچ تأثیر مشخصی بر نیروی الکترومغناطیسی ندارند، بنابراین طول قطب برای ۱ میلی متر بیشتر از فاصله از پایین سیم پیچ تنظیم می شود. فضا برای اسکلت سیم پیچ و بستن استفاده می گردد. محل سیم پیچ با حفظ ۰٫۳ میلی متر بین سیم پیچ و فاصله هوایی تعیین می شود ($d = 0.3$ میلی متر، ضخامت آب بندی واقعی) علاوه بر این، ضخامت یوغ آهنربایی نصف شعاع قطب آهنربا داده می شود. بنابراین اثر متقابل فقط بین شش پارامتر باقی مانده تجزیه و تحلیل شده است. $k=26$ برای شش پارامتر سیستم است. با توجه به مقیاس و پیچیدگی سیستم، تعداد نقاط طراحی باید به درستی افزایش یابد. این مورد توسط Sacks و همکاران پیشنهاد شده است. [۱۸] که برای سیستم پارامترهای ۱۰-۱۰، عدد $k=1.5$ و برای سیستم پارامترهای ۲۰-۳۰ عدد $k=4.5$ است. در این مقاله اعداد $k=1.5$ ، $k=2$ و $k=2.5$ نقاط طراحی به ترتیب توسط OLHD طراحی شده و مقادیر پاسخ آن ها با شبیه سازی عددی محاسبه می شود. ضرایب ناشناخته (۶) با روش حداقل مربعات به دست می آید. جدول ۳ به دقت مدل نقاط مختلف طراحی را خلاصه می کند. می توان از جدول ۳ ادعا کرد که مدل عددی با تعداد نقاط طراحی $k=2.5$ درجه بالاترین دقت را دارد و بنابراین ضرایب و مقادیر قابل توجه آن در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳ دقت مدل های مختلف

	۱/۵ K	۲ K	۲/۵ K
adj R ²	۰/۹۱۸۵	۰/۹۱۵۰	۰/۹۲۱۹
Q ²	۰/۷۵۳۵	۰/۸۰۱۳	۰/۸۶۳۴

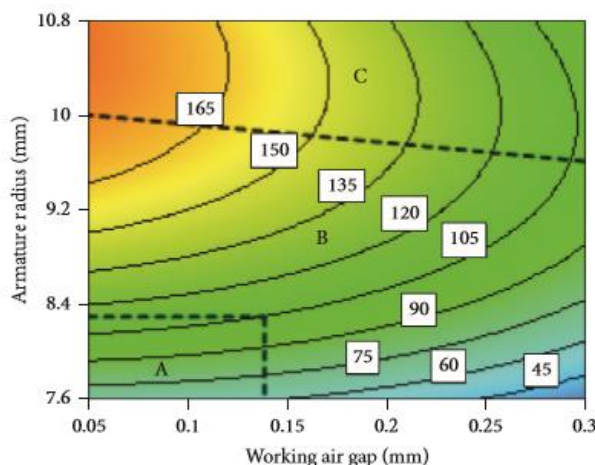
جدول ۴ ضریب و مقادیر معنی دار آن‌ها مدل

آیتم معادله	ثابت	g	I	N	T	R	r
ضریب	-۱۴۱۰	۴۵۶/۴۴	۲/۹۱۲۸	-۰/۴۰۳۰۲	-۱۰۵/۲۹	۴۴۳۴۳	۳۰۱/۷۰
P		< ۰/۰۱	< ۰/۰۱	< ۰/۰۱	< ۰/۰۱	< ۰/۰۱	< ۰/۰۱
آیتم معادله	g * I	g * N	g * T	g * R	g * r	I * N	I * T
ضریب	-۰/۳۹۵۱۸	۰/۳۱۰۴۷	-۴۲/۸۷۲	-۷۱/۳۴۵	۲۷/۴۶۵	۰/۰۲۴۱۸۳	۱/۰۷۲۰
P	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۵۳	۰/۸۶	۰/۰۶
آیتم معادله	I * R	I * r	N * T	N * R	N * r	T * R	T * r
ضریب	۰/۰۴۸۲۷۰	۰/۴۷۸۶۹	۰/۱۶۸۳۸	۰/۰۶۱۰۸۴	۰/۲۲۹۸۴	۱۳/۳۰۹	۹/۱۴۵۸
P	۰/۸۹	۰/۳۸	۰/۲۲	۰/۴۸	۰/۱۰	< ۰/۰۱	۰/۱۰
آیتم معادله	R * r	g ²	I ²	N ²	T ²	R ²	r ²
ضریب	۲۲/۲۵۸	-۴۵۶/۴۸	-۰/۲۲۶۲۲	-۰/۰۱۴۵۰۸	-۱۶/۰۷۸	-۱۳/۱۰۴	-۳۳/۰۵۱
P	< ۰/۰۱	۰/۳۷	< ۰/۰۱	< ۰/۰۱	۰/۰۵	< ۰/۰۱	< ۰/۰۱

اگر ضریب P مورد بیشتر از ۰,۱ باشد، به عنوان یک عامل ناچیز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، این بخش فقط تجزیه و تحلیل تعامل بین عوامل مهم را ارائه می‌دهد در حالی که تجزیه و تحلیل عوامل ناچیز نادیده گرفته می‌شود. به عنوان مثال تعامل بین شکاف هوایی و شعاع آرمیچر، ضخامت و شعاع آرمیچر، جریان و ضخامت آرمیچر، دور سیم پیچ و شعاع قطب جانبی، ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی و سرانجام شعاع آرمیچر و شعاع قطب جانبی عوامل مهمی هستند که مورد بحث قرار می‌گیرند. تجزیه و تحلیل محدود به تعامل بین دو پارامتر است. بنابراین، مقادیر پارامترهای دیگر مقادیر متوسط مناسب خود را تعیین کرده اند. نقشه مربوط به نیروی الکترومغناطیسی مربوطه نیز ساخته و تجزیه و تحلیل شده است.

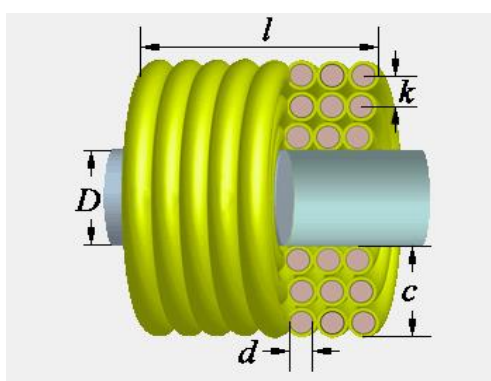
۳-۲-۱- تعامل بین شکاف هوایی و شعاع آرمیچر

شکل ۱۷ نقشه کانتور نیروی الکترومغناطیسی تعامل بین شکاف هوایی و شعاع آرمیچر را نشان می‌دهد. پس از تجزیه و تحلیل شکل ۱۷، می‌توان تعامل بین شکاف هوایی و شعاع آرمیچر را تقریباً به سه ناحیه از روابط، A، B و C تقسیم کرد. در منطقه A، نقشه خطوط نیروی الکترومغناطیسی تقریباً افقی است و شعاع آرمیچر تقریباً با افزایش فاصله هوا تغییر نمی‌کند. در منطقه B، در حالی که نیروی الکترومغناطیسی ثابت است، می‌توان یک رابطه خطی تقریبی بین فاصله هوای و شعاع آرمیچر مشاهده کرد. در منطقه C، نقشه خطوط نیروی الکترومغناطیسی تقریباً عمودی است، در حالی که فاصله هوایی تقریباً با افزایش شعاع آرمیچر تغییر نمی‌کند.



شکل ۱۷ برهمکنش شکاف هوای کاری و شعاع آرمیچر

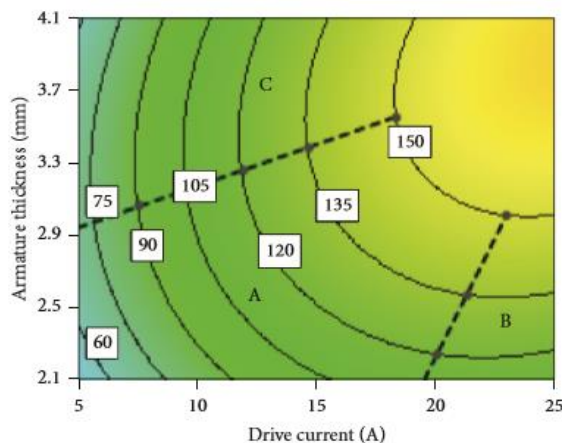
روابط را می توان به شرح زیر توضیح داد. منطقه A جایی است که هم فاصله هوایی و هم شعاع آرمیچر نسبتاً کوچک است. همان طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده، شعاع آرمیچر کمتر از شعاع قطب جانبی است. خطوط مغناطیسی به دلیل جاذبه کمتر بین آرمیچر و قطب جانبی در ناحیه قرمز جمع می شوند، در نتیجه اشباع مغناطیسی در این مکان زمان می برد. فاصله هوایی نسبت به تغییر شعاع آرمیچر در منطقه A حساس نیست. بنابراین نقشه کانتور تقریباً یک خط افقی است همان طور که در منطقه A نشان داده شده است. با افزایش بیشتر فاصله هوایی، رلوکتانس مغناطیسی بسیار افزایش می یابد و سپس اشباع مغناطیسی از بین می رود. این امر منجر به کاهش شدت القای مغناطیسی در نتیجه کاهش نیروی الکترومغناطیسی می شود. با این حال، با افزایش شعاع آرمیچر، منطقه موثر جذب افزایش می یابد. این منجر به افزایش دوباره نیروی الکترومغناطیسی می شود. به همین دلیل است که افزایش خطی در منطقه B حاصل می شود. هنگامی که شعاع آرمیچر به مقدار معینی افزایش می یابد، ناحیه جذب موثر تقریباً دیگر تغییر نمی کند. بنابراین شعاع آرمیچر تأثیر واضحی بر فاصله هوایی ندارد. بنابراین، نقشه کانتور تقریباً خط عمودی است (همان طور که در منطقه C شکل ۱۷ نشان داده شده است).



شکل ۱۸ رابطه اندازه بین شعاع آرمیچر و شعاع قطب جانبی

۳-۲-۲- برهم کنش بین درایو و ضخامت آرمیچر

شکل ۱۹ نقشه کانتور نیروی الکترومغناطیسی از تعامل بین جریان درایو و ضخامت آرمیچر را نشان می دهد؛ همچنین می توان تعامل جریان درایو و ضخامت آرمیچر را تقریباً به سه ناحیه از روابط یعنی A، B و C تقسیم کرد. در منطقه A، یک همبستگی منفی بین جریان محرک و ضخامت آرمیچر مشاهده می شود. یعنی یکی افزایش و دیگری کاهش می یابد. در منطقه B، خطوط کانتور نیروی الکترومغناطیسی خطوط افقی تقریبی هستند، به این معنی که جریان محرک تأثیر مشخصی بر ضخامت آرمیچر ندارد. در ناحیه C، خطوط کانتور نیروی الکترومغناطیسی خطوط عمودی تقریبی هستند، به این معنی که ضخامت آرمیچر تأثیر مشخصی بر جریان محرک ندارد.

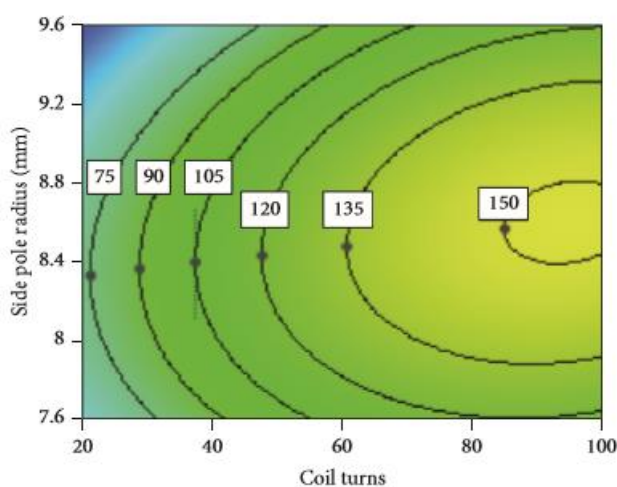


شکل ۱۹ برهم کنش ضخامت جریان و ضخامت درایو

این روابط را می‌توان به شرح زیر توضیح داد. منطقه A جایی است که هم جریان درایو و هم ضخامت آرمیچر نسبتاً کم است. نیروی الکترومغناطیسی با افزایش جریان محرک یا ضخامت آرمیچر در این منطقه افزایش می‌یابد. بنابراین، جریان محرک و ضخامت آرمیچر در این منطقه با هم رابطه منفی دارند. با این حال، هنگامی که ضخامت آرمیچر ثابت است، ناحیه شعاعی موثر شار مغناطیسی آن نیز ثابت است. علاوه بر این، افزایش جریان درایو منجر به افزایش شار مغناطیسی می‌شود. بنابراین با افزایش جریان درایو به مقدار معینی، آرمیچر از نظر مغناطیسی اشباع می‌شود. بنابراین نیروی الکترومغناطیسی با افزایش جریان درایو تغییر نخواهد کرد. بنابراین نقشه کانتور تقریباً یک خط افقی است همانطور که در منطقه B نشان داده شده است. به طور مشابه، هنگامی که ضخامت آرمیچر به مقدار معینی افزایش می‌یابد، ناحیه موثر شعاعی شار مغناطیسی آن به اندازه کافی بزرگ می‌شود. ضخامت آرمیچر افزایش شار مغناطیسی را در شرایط دیگر محدود نمی‌کند. با این حال، جریان محرک و پتانسیل مغناطیسی ثابت هستند. شار مغناطیسی مدار مغناطیسی تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند و بنابراین نیروی الکترومغناطیسی با افزایش ضخامت آرمیچر آشکارا تغییر نخواهد کرد. نقشه کانتور در این وضعیت تقریباً یک خط عمودی است، همانطور که در منطقه C نشان داده شده است. در نهایت، ما می‌توانیم دریابیم که جریان محرک اشباع و ضخامت آرمیچر (نمادهای سیاه) با افزایش نیروی الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود که جریان محرک و ضخامت آرمیچر باید در منطقه A انتخاب شود. انتخاب این پارامترها در منطقه A می‌تواند دو مزیت داشته باشد. در مرحله اول، می‌تواند منجر به انتخاب قسمتهای متحرک از HSV شود که منجر به بهبود سرعت پاسخ دینامیکی HSV می‌شود. ثانیاً، می‌تواند در انتخاب قدرت ورودی کم و به حداقل رساندن تلفات و تولید حرارت سیم پیچ کمک کند.

۳-۲-۳- تعامل بین تعداد دور و شعاع قطبی جانبی

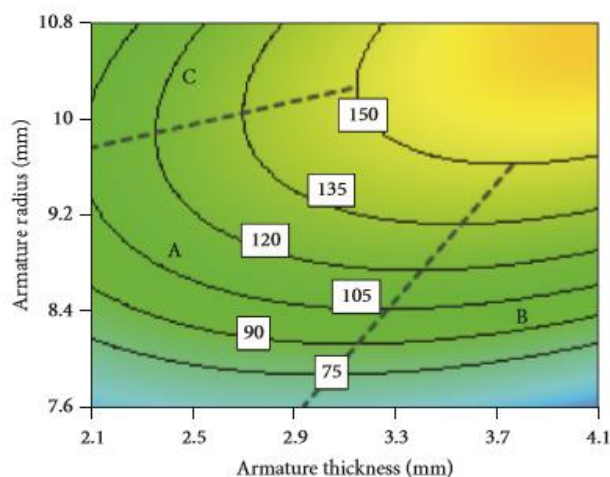
مجموعه‌ای از نقاط عطف (نمادهای سیاه) در شکل ۲۰ نشان داده شده که نشان دهنده نقشه خطوط نیروی الکترومغناطیسی تعامل بین تعداد دور سیم پیچ و شعاع قطب جانبی است. همبستگی منفی را می‌توان بین تعداد دور سیم پیچ و شعاع قطب جانبی مشاهده کرد که مقادیر آن‌ها کمتر از نقاط عطف است. این بدان معناست که تعداد دورهای سیم پیچ با وجود کاهش شعاع قطب جانبی افزایش می‌یابد. یک همبستگی مثبت را می‌توان بین تعداد دورهای سیم پیچ و شعاع قطب جانبی مشاهده کرد، جایی که مقادیر آن‌ها بیشتر از نقاط عطف است. این بدان معناست که دورهای سیم پیچ با افزایش شعاع قطب جانبی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، منحنی‌های خطوط نیروی الکترومغناطیسی بالا و پایین نقاط عطف با افزایش نیروی الکترومغناطیسی صاف تر می‌شوند. از آنجا که نیروی الکترومغناطیسی قوی‌تر است، تعداد دور بیشتر است و میدان مغناطیسی به اشباع نزدیک‌تر است، بنابراین شعاع قطب جانبی نسبت به تغییر دور سیم پیچ حساس‌تر نیست. در نتیجه منحنی‌ها صاف تر می‌شوند. پیشنهاد می‌شود که تعداد دورهای سیم پیچ و شعاع قطب جانبی باید در نقاط عطف انتخاب شوند تا حداقل تعداد دور سیم پیچ برای نیروی الکترومغناطیسی معین انتخاب شود.



شکل ۲۰ تعامل چرخش سیم پیچ و شعاع قطب جانبی

۳-۲-۴- تعامل بین ضخامت آرمیچر و شعاع آرمیچر

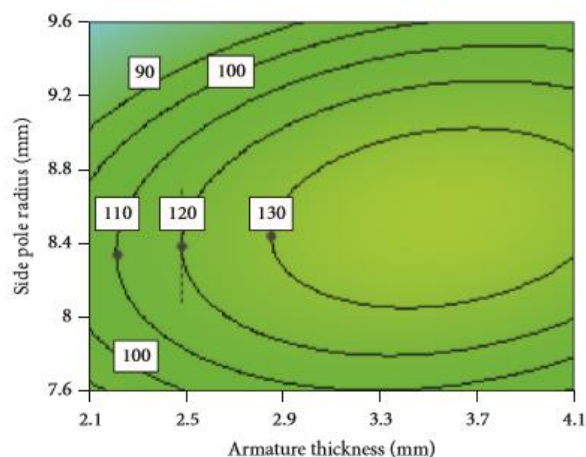
شکل ۲۱ نقشه کانتور نیروی الکترومغناطیسی تعامل بین ضخامت آرماتور و شعاع آرمیچر را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان این رابطه متقابل را تقریباً به سه ناحیه از روابط یعنی A، B و C تقسیم کرد؛ همان‌طور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در منطقه A، رابطه خطی تقریباً منفی بین دو پارامتر مشاهده می‌شود. در مناطق B و C خطوط کانتور نیروی الکترومغناطیسی به ترتیب تقریباً افقی و عمودی هستند. این مورد نشان می‌دهد که تعامل بین دو پارامتر ضعیف است. این روابط را می‌توان به شرح زیر توضیح داد. منطقه A جایی است که هم ضخامت و هم شعاع آرمیچر نسبتاً کوچک است. نیروی الکترومغناطیسی با افزایش ضخامت آرمیچر بنابراین، رابطه بین ضخامت آرماتور و شعاع آرمیچر در این منطقه تقریباً منفی خطی است و شعاع آرمیچر افزایش می‌یابد. با این حال، در مناطق B و C ضخامت و شعاع آرمیچر نسبتاً بزرگ است. در این شرایط، ناحیه موثر شعاعی شار مغناطیسی به اندازه کافی بزرگ خواهد بود و منطقه جذب موثر آن تقریباً دیگر تغییر نمی‌کند. بنابراین آن‌ها تأثیر آشکاری بر نیروی الکترومغناطیسی ندارند در نتیجه تعامل بین این دو پارامتر ضعیف می‌گردد. پیشنهاد می‌شود که ضخامت و شعاع آرمیچر باید در ناحیه A انتخاب شوند تا مقادیر آن‌ها تا حد ممکن کوچک باشد. این مورد باعث می‌شود که جرم قسمت‌های متحرک HSV سرعت پاسخ دینامیکی HSV را بهبود بخشد.



شکل ۲۱ برهمکنش ضخامت آرمیچر و شعاع آرمیچر

۳-۲-۵- تعامل بین ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی

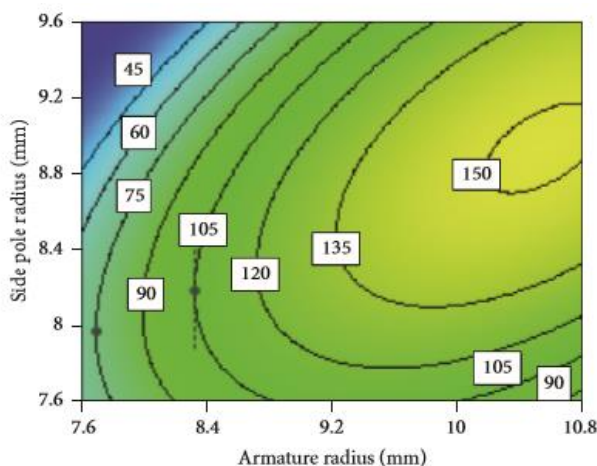
همان‌طور که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، تعامل بین ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی مشابه تعامل بین تعداد دور سیم پیچ و شعاع قطب جانبی است. مجموعه‌ای از نقاط عطف (نمادهای سیاه) در نقشه خطوط نیروی الکترومغناطیسی وجود دارد. همبستگی منفی را می‌توان بین ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی در قلمروهای خاصی مشاهده کرد، جایی که آن‌ها در زیر یک نقطه عطف قرار دارند. همبستگی مثبت را می‌توان بین ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی در قلمروهای خاصی که بالاتر از نقطه عطف قرار دارند مشاهده کرد. علاوه بر این با افزایش ضخامت آرمیچر به مقدار معینی، خطوط کانتور نیروی الکترومغناطیسی صاف می‌شوند. این مورد نشان می‌دهد که تأثیر ضخامت آرمیچر بر شعاع قطب جانبی به تدریج ضعیف می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، هنگامی که ضخامت آرمیچر به مقدار معینی افزایش می‌یابد، ناحیه موثر شعاعی شار مغناطیسی آن به اندازه کافی بزرگ می‌شود. بنابراین ضخامت آرمیچر افزایش شار مغناطیسی را در شرایط دیگر محدود نمی‌کند. در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی با افزایش ضخامت آرمیچر آشکارا تغییر نخواهد کرد و بنابراین تأثیر ضخامت آرمیچر بر شعاع قطب جانبی به تدریج ضعیف می‌گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود که ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی باید در نقطه انحراف انتخاب شوند تا حداقل مقدار ضخامت آرمیچر با نیروی الکترومغناطیسی مشخص انتخاب شود. این مورد باعث می‌شود که جرم قطعات متحرک سبک شود و به بهبود سرعت پاسخ دینامیکی HSV کمک کند.



شکل ۲۲ برهمکنش ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی

۳-۲-۶- برهمکنش بین شعاع آرمیچر و شعاع قطب جانبی

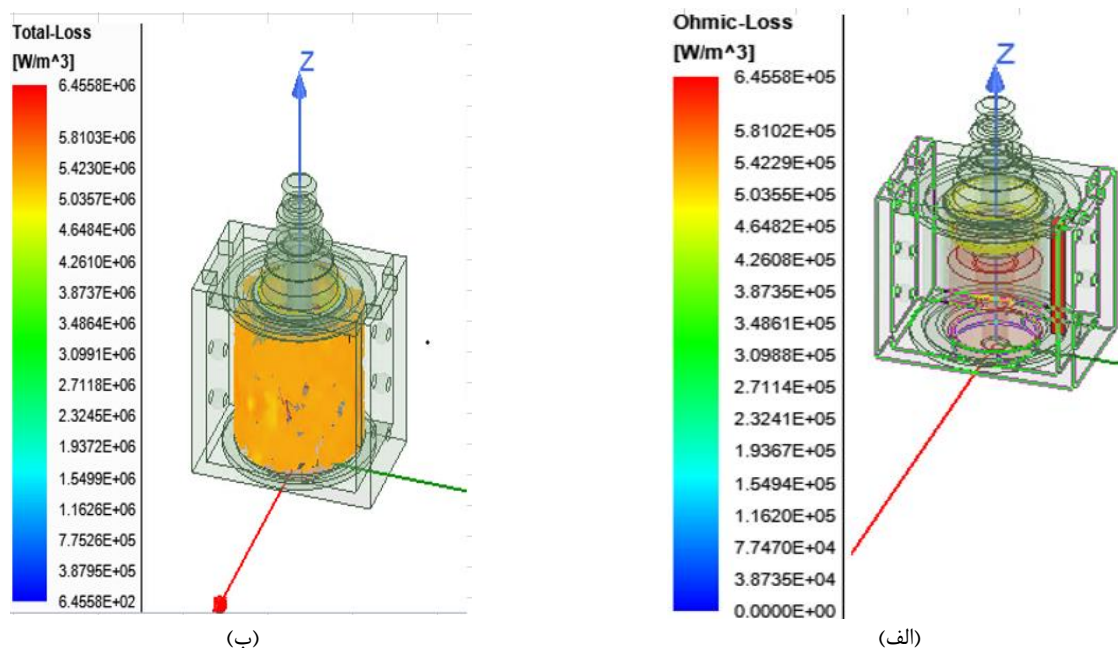
مجموعه‌ای از نقاط عطف (نمادهای سیاه) نیز در نقشه کانتور نیروی الکترومغناطیسی بین شعاع آرمیچر و شعاع قطب جانبی وجود دارد که در شکل ۲۳ نشان داده شده است. در زیر نقاط عطف، شعاع قطب کناری ابتدا کاهش و سپس با افزایش شعاع آرمیچر به تدریج افزایش می‌یابد، در حالی که در بالای نقاط خمشی، شعاع آرمیچر به تدریج با افزایش شعاع قطب کناری افزایش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به شرح زیر توضیح داد. مقدار مطلوب شعاع قطب جانبی مطابق با شعاع آرمیچر وجود دارد، که نیروی الکترومغناطیسی را بزرگترین می‌کند. این مقدار در نقطه عطف قرار دارد. از یک سو، وقتی شعاع قطب جانبی کمتر از نقطه عطف باشد، نیروی الکترومغناطیسی با افزایش شعاع قطب کناری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، وقتی شعاع قطب کناری بیشتر از نقطه عطف باشد، نیروی الکترومغناطیسی با وجود افزایش شعاع قطب جانبی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نیروی الکترومغناطیسی ابتدا افزایش و با افزایش شعاع آرمیچر همان‌طور که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، کمی کاهش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود که شعاع آرمیچر و شعاع قطب جانبی باید در نقطه عطف انتخاب شوند تا شعاع آرمیچر با نیروی الکترومغناطیسی داده شده حداقل باشد. این مورد به انتخاب قطعات متحرک سبک تر و بهبود سرعت پاسخ دینامیکی HSV کمک می‌کند.



شکل ۲۳ برهمکنش شعاع آرمیچر و شعاع قطب جانبی

۳-۲-۷- تلفات آرمیچر دامپ ولو

در شکل ۲۴ نیز به ترتیب تلفات اهمی و تلفات کلی سیم پیچ دامپ ولو توربوشارژر نشان داده شده است.



شکل ۲۴ تلفات سیم پیچ دامپ ولو: (الف) تلفات اهمی، (ب) تلفات کلی

۴- نتیجه گیری

یک مدل عددی از HSV در محیط Ansoft Maxwell با دقت خوب توسعه داده شده است. این یک بستر موثر برای تحقیقات در مورد نیروی الکترومغناطیسی مشخصه HSV برای دامپ ولو فراهم می‌کند. قوانین تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی الکترومغناطیسی به دست آمده است. مشخص شد که طول قطب و محل سیم پیچ تأثیر مشخصی بر نیروی الکترومغناطیسی ندارند در حالی که پارامترهای دیگر مانند ضخامت طوقه مگنت، شعاع قطب جانبی، دور سیم پیچ، شعاع آرمیچر، ضخامت آرمیچر و فاصله هوایی تأثیر زیادی بر نیروی الکترومغناطیسی دارد. پیشنهاد می‌شود که طول قطب باید تا حد ممکن کوچک باشد. سیم پیچ باید تا حد ممکن به فاصله هوایی نزدیک باشد. و ضخامت یوغ آهنربایی باید نیمی از شعاع قطب اصلی باشد. نتیجه گرفته شد که عوامل متقابل مانند فاصله هوایی با شعاع آرمیچر، جریان محرک با ضخامت آرمیچر، دور سیم پیچ با شعاع قطب جانبی، ضخامت آرمیچر با شعاع آن، ضخامت آرمیچر با شعاع قطب جانبی و شعاع آرمیچر با شعاع قطب جانبی تأثیرات قابل توجهی بر نیروی الکترومغناطیسی دارند. مشخص شد که بهترین مقدار تطابق بین دوره‌های سیم پیچ و شعاع قطب جانبی، ضخامت آرمیچر و شعاع قطب جانبی و شعاع آرمیچر و شعاع قطب جانبی وجود دارد. این مقاله طرح برآورد کلی شامل سه وظیفه اصلی است. اولین مورد مربوط به تخمین سریع و تقریبی سرعت چرخش توربوشارژر است که توسط یک مدل ساده جعبه سیاه ثابت رفتار کمپرسور تنظیم شده بر اساس سیگنال‌های موتور موجود در ECU موتور ارائه شده است. تخمین اخیر سپس برای تنظیم فرکانس مرکزی یک فیلتر تشدید مرتبه دوم باند عبور برای استخراج محتوای طیفی مفید سیگنال صوتی به دست آمده استفاده می‌شود. وظایف نهایی تخمین سرعت چرخشی توربوشارژر را با استفاده از فیلتر FLL که قادر به تشخیص فرکانس اساسی سیگنال صوتی دوره‌ای از پیش پردازش شده است، در نظر می‌گیرد. روش ارائه شده بر مبنای موتورهای بنزینی بسیار مؤثر است. هنگامی که طول قطب از ۶ به ۹٫۲ میلی‌متر تغییر می‌کند، حداکثر تغییر نیروی الکترومغناطیسی با مقدار ۰٫۳۷ نیوتن نامحسوس است. نتایج نشان داد که نیروی الکترومغناطیسی با افزایش ضخامت یوغ آهنربایی از ۱٫۰ میلی‌متر به ۲٫۵ میلی‌متر به سرعت افزایش می‌یابد، در حالی که هنگامی که ضخامت یوغ مگنت بیش از ۲٫۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد، نیروی الکترومغناطیسی به طور نامحسوس افزایش می‌یابد؛ همچنین، با افزایش ضخامت یوغ آهنربا از ۲٫۵ میلی‌متر، نیروی الکترومغناطیسی به مقدار ثابتی میل می‌کند. بیشینه نیروی الکترومغناطیسی در شعاع قطب جانبی ۸٫۸۵ میلی‌متر ایجاد می‌شود. با افزایش شعاع آرمیچر از ۹٫۲ تغییر محسوس در نیروی الکترومغناطیسی مشاهده نمی‌شود. همچنین با افزایش ضخامت آرمیچر از ۳٫۱ مقدار نیروی الکترومغناطیسی ثابت می‌شود.

References

- [1] Mulemane A, Han JS, Lu PH, Yoon SJ, Lai MC. Modeling dynamic behavior of diesel fuel injection systems. SAE Technical Paper; 2004 Mar 8. doi: [10.4271/2004-01-0536](https://doi.org/10.4271/2004-01-0536)
- [2] Qiu T, Liu XH, Liu FS, Yu L. The study for cam profile design of EUP. Transactions of CSICE. 2008;26(5):476-9.
- [3] Cantore G, Mattarelli E, Boretti AA. Experimental and theoretical analysis of a diesel fuel injection system. SAE transactions. 1999 Jan 1:232-42. doi: [10.4271/1999-01-0199](https://doi.org/10.4271/1999-01-0199)
- [4] Liyun F, Yuanxian Z, Xiuzhen M, Bingqi T, Enzhe S, Wenhui L. Quantitative analysis on cycle fuel injection quantity fluctuation of diesel engine electronic in-line pump system. SAE Technical Paper; 2010 Apr 12. doi: [10.4271/2010-01-0875](https://doi.org/10.4271/2010-01-0875)
- [5] Bottauscio O, Chiampi M, Manzin A. Different finite-element approaches for electromechanical dynamics. IEEE Transactions on Magnetics. 2004 Mar;40(2):541-4. doi: [10.1109/TMAG.2004.825332](https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.825332)
- [6] Huber B, Ulbrich H. Modeling and experimental validation of the solenoid valve of a common rail diesel injector. SAE Technical Paper; 2014 Apr 1. doi: [10.4271/2014-01-0195](https://doi.org/10.4271/2014-01-0195)
- [7] Angadi SV, Jackson RL, Choe SY, Flowers GT, Suhling JC, Chang YK, Ham JK. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 1: A multi-physics finite element model. Engineering Failure Analysis. 2009 Apr 1;16(3):874-87. doi: [10.1016/j.engfailanal.2008.08.011](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.011)
- [8] Angadi SV, Jackson RL, Choe SY, Flowers GT, Suhling JC, Chang YK, Ham JK, Bae JI. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 2: Experimental study. Engineering Failure Analysis. 2009 Apr 1;16(3):944-63. doi: [10.1016/j.engfailanal.2008.08.012](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.012)
- [9] Zhang JG, Chen B, Wang ZG, Cui KR. Experimental research on performance of great flow rate and high speed solenoid valve used for electronically controlled diesel engine. Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines. 2003 May;21(3):252-6. doi: [10.1016/j.enconman.2010.12.032](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.032)
- [10] Eidi H, Zohourkari I. The use of magnetic field to reduce the spring back in bending of aluminum sheet 1050. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 21. doi: [10.22034/ijme.2024.434812.1912](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.434812.1912)
- [11] Rezaee V, Sadeghi MH, Hashemi SP. Optimization of the Lorentz force in an electromagnetic pump by the surface response method with numerical solution of Maxwell equations in three dimensions and comparison with experimental results. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Nov 22;8(9):14-22. [In Persian]
- [12] Norouzi Sahraei H, Karami Nezhad K, Kahrobaee S, Kashefi M, Ahadi Akhlaghi I, Ahadi Akhlaghi E. Nondestructive detection of Microstructural Changes due to the Grinding Burn Using Electromagnetic Probes. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 May 22;8(3):9-19. [In Persian]
- [13] Hashemi P, Sadeghi MH, Rezaee V. Design and fabrication of electromagnetic arrayed flow meter to measure velocity profiles in a rectangular channel. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 Mar 16;8(12):21-33. [In Persian]
- [14] Fan L, Long W, Zhu Y, Xue Y. A characteristic study of electronic in-line pump system for diesel engines. SAE Technical Paper; 2008 Apr 14. doi: [10.4271/2008-01-0943](https://doi.org/10.4271/2008-01-0943)
- [15] Box GE, Wilson KB. On the experimental attainment of optimum conditions. In Breakthroughs in statistics: methodology and distribution 1992 (pp. 270-310). New York, NY: Springer New York. doi: [10.1007/978-1-4612-4380-9_23](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_23)
- [16] Jin R, Chen W, Sudjianto A. An efficient algorithm for constructing optimal design of computer experiments. Journal of statistical planning and inference. 2005 Sep 1;134(1):268-87. doi: [10.1016/j.jspi.2004.02.014](https://doi.org/10.1016/j.jspi.2004.02.014)
- [17] Eriksson L, Andersson PL, Johansson E, Tysklind M. Megavariate analysis of environmental QSAR data. Part I—A basic framework founded on principal component analysis (PCA), partial least squares (PLS), and statistical molecular design (SMD). Molecular diversity. 2006 May;10:169-86. doi: [10.1007/s11030-006-9024-6](https://doi.org/10.1007/s11030-006-9024-6)
- [18] Sacks J, Welch WJ, Mitchell TJ, Wynn HP. Design and analysis of computer experiments. Statistical Science. 1989 Nov;4(4):409-35. doi: [10.1214/ss/1177012413](https://doi.org/10.1214/ss/1177012413)