

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

## بهینه‌سازی طراحی، بهبود کیفیت ولتاژ و نوسانات گشتاور یک ژنراتور آهنربای دائم سطحی با رتور خارجی به منظور کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

علی‌اکبر عبدوس<sup>۱\*</sup>، محمدابراهیم مؤذن<sup>۲</sup>، سید اصغر غلامیان<sup>۳</sup>، سید مهدی حسینی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

a.abdoos@nit.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

m.moazzen@stu.nit.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

gholamian@nit.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

mehdi.hosseini@nit.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله طراحی بهینه یک ژنراتور سنکرون آهنربای دائم سطحی با رتور خارجی به منظور کاهش هزینه ساخت ارائه شده است. نوآوری این پژوهش ارائه ابعاد جدید برای آهنربای دائم سطحی است که منجر به سینوسی شدن منحنی چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی و بهبود کیفیت ولتاژ القایی، کاهش گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور خواهد شد. همچنین به منظور مطالعه بیشتر، چهار طرح به صورت ترکیبی از سیم‌پیچی توزیع شده و سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول و آهنربای سطحی پیشنهادی برای ژنراتور در نظر گرفته شده است. به همین منظور یک مدل طراحی دقیق برای ژنراتور استخراج شده است. سپس متغیرهای طراحی بر اساس این مدل و با توجه به تابع هدف مورد نظر توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بهینه‌یابی شده‌اند. در ادامه از تحلیل اجزای محدود برای اعتبارسنجی طراحی‌های بهینه استفاده می‌شود. با مقایسه نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی چهار طرح بهینه مشاهده می‌شود که ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی دارای راندمان بیشتر است در حالی که دارای حجم کلی، هزینه ساخت، گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور کمتری در مقایسه با طرح‌های دیگر است. بنابراین این طرح گزینه مناسبی برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده است.

**واژه‌های کلیدی:** ژنراتور آهنربای دائم، توربین بادی، طراحی بهینه، هزینه ساخت، گشتاور.

## ۱. مقدمه

طی دو دهه اخیر به دلیل افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی با رشد بسیار زیادی همراه بوده است. توربین‌های بادی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و ساده‌ترین روش‌های بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر از زمان‌های گذشته در کانون توجهات بوده‌اند. از میان ژنراتورهای مختلف برای استفاده در توربین بادی، ژنراتورهای آهنربای دائم به دلیل ویژگی‌های بسیار خوب از قبیل ساختمان ساده، راندمان، انرژی تحویلی سالیانه به شبکه و چگالی توان بالا، گزینه بسیار مناسبی برای این نوع کاربرد خواهند بود [۱]. ساختارهای متفاوتی از ماشین‌های آهنربای دائم برای به‌کارگیری در توربین‌های بادی معرفی شده‌اند ولی ماشین آهنربای دائم شار شعاعی با آهنربای سطحی به دلیل ساختمان و طراحی ساده و قابلیت اطمینان مناسب همواره مورد توجه طراحان این حوزه بوده است [۲]. ساختار ماشین آهنربای دائم شار شعاعی به‌طور کلی به دو دسته رتور داخلی و رتور خارجی تقسیم‌بندی می‌شود. از جمله مزایای نوع رتور خارجی در مقایسه با رتور داخلی شامل راندمان و چگالی توان بالا و امکان تعبیه تعداد قطب بیشتر بوده که منجر به این شده تا گزینه مناسب‌تری برای استفاده در توربین‌های بادی باشد [۳].

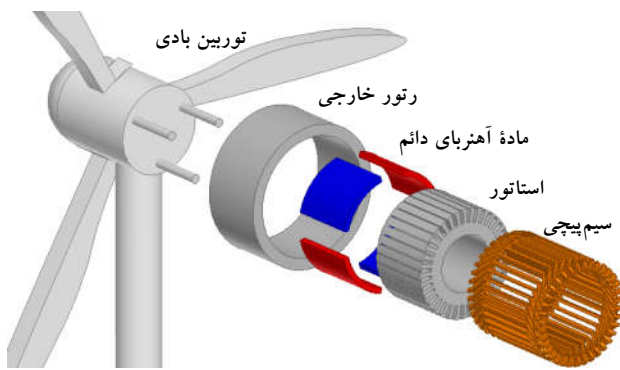
همواره مطالعه‌های فراوانی از جانب محققان برای بهبود عملکرد ژنراتورهای آهنربای دائم در حال انجام بوده که برای نمونه می‌توان به موارد پیش رو اشاره داشت. در مرجع [۴]، طراحی بهینه سه ژنراتور (ژنراتور القایی دوسو تغذیه، ژنراتور سنکرون با رتور سیم‌پیچی شده و ژنراتور آهنربای دائم) به‌منظور کاهش هزینه ساخت انجام شده است. سپس ژنراتورها بر اساس هزینه ساخت و انرژی تحویلی سالیانه به شبکه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داده است که ژنراتور آهنربای دائم دارای انرژی تحویلی سالیانه بیشتری نسبت به سایر ژنراتورهاست؛ اما هزینه ساخت آن به دلیل هزینه مواد آهنربای دائم بیشتر بوده که پیش‌بینی شده است با افزایش سطح تکنولوژی ساخت در آینده هزینه ساخت آن کاهش یابد. در مرجع [۵]، بهینه‌سازی طراحی یک ژنراتور آهنربای دائم شار شعاعی رتور خارجی برای استفاده در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده بر اساس کاهش گشتاور دندانه‌ای ارائه شده است. با بررسی پارامترهای مؤثر بر گشتاور دندانه‌ای و اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ القایی از قبیل قوس قطب، ارتفاع یوغ استاتور و رتور و گام شیار و همچنین با اعمال یکسری محدودیت‌ها شامل ساخت، وزن ژنراتور، نوسانات

گشتاور و کیفیت ولتاژ القایی، نتایج مطلوب به دست آمده است. طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی متصل به توربین بادی برای کاهش گشتاور دندانه‌ای و اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ القایی در مرجع [۶] ارائه شده است. در فرایند بهینه‌سازی، توان خروجی بالا نیز مدنظر قرار گرفته است. متغیرهای طراحی قوس قطب، ضخامت ماده آهنربای دائم و میزان قوس دندانه انتخاب شده و از توابع هدف مختلف به‌منظور رسیدن به طراحی بهینه استفاده شده است. یک نمونه بهینه‌سازی طراحی ژنراتور سنکرون آهنربای دائم برای استفاده در توربین بادی بدون جعبه‌دنده بر اساس کاهش هزینه تولید انرژی در مرجع [۷] انجام شده است. طراحی بهینه برای دو رتور با ساختار متفاوت و دو ماده آهنربای خاک کمیاب و آهنربای فریت و بر اساس توابع هدف مختلف انجام شده است. نتایج طراحی نشان می‌دهد که هزینه تولید انرژی و همچنین هزینه مواد مصرفی ژنراتور با آهنربای خاک کمیاب بسیار کمتر از آهنربای فریت است. در مرجع [۸] بهینه‌سازی طراحی ژنراتور آهنربای دائم شار شعاعی برای کاربرد در توربین‌های بادی و به‌منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای انجام شده است. در این مقاله با مورب کردن قطب و تغییر گام و قوس قطب، کاهش گشتاور دندانه‌ای صورت گرفته است. طراحی بهینه و مقایسه عملکرد دو نوع ژنراتور آهنربای دائم شار شعاعی رتور داخلی و رتور خارجی برای استفاده در توربین‌های بادی در مرجع [۹] انجام شده است. هدف از بهینه‌سازی طراحی کاهش وزن ژنراتور است. نتایج حاصل از طراحی نشان می‌دهد که ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی داری وزن کمتر و راندمان بیشتری در مقایسه با نوع رتور داخلی است. در مرجع [۱۰]، بهینه‌سازی طراحی ژنراتور سنکرون آهنربای دائم برای استفاده در توربین‌های بادی و با هدف کاهش هزینه کلی سیستم ارائه شده است. در این مقاله علاوه بر هزینه ساخت ژنراتور، هزینه تلفات و مدل الکترونیک قدرت نیز در نظر گرفته شده است. همچنین مطالعه و بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که با کاهش زاویه فاز جریان استاتور، هزینه ساخت کلی سیستم نیز کاهش می‌یابد. در مرجع [۱۱] طراحی بهینه چندهدفه یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار شعاعی با آهنربای سطحی با استفاده از روش پاسخ سطحی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه برای افزایش توان خروجی و نیروی محرکه مغناطیسی استفاده شده است. در مرجع [۱۲] طراحی بهینه چندهدفه ژنراتور سنکرون آهنربای دائم با استفاده از ترکیب روش پاسخ سطحی و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه بهبود یافته انجام شده است. هدف از طراحی بهینه افزایش

ارائه شده، مشخص شده است که ژنراتور با سیم پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی دارای راندمان بالاتر، هزینه ساخت کمتر، کیفیت ولتاژ القایی بهتر، گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور کمتر نسبت به طرح‌های دیگر است. همچنین به منظور تأیید روند طراحی، ژنراتور بهینه شده با یک نمونه ژنراتور مشابه و واقعی معرفی شده در مرجع [۵] مقایسه شده که برتری ژنراتور بهینه شده از نظر معیارهای طراحی این مقاله مشهود است.

## ۲. مدل تحلیلی ژنراتور و توربین بادی

در این بخش ابتدا مدل سازی ژنراتور آهنربای دائم با رتور خارجی انجام شده که شامل محاسبه ابعاد هندسی و تلفات ژنراتور، محاسبه هزینه ساخت آن و... است. در ادامه نیز مدل سازی توربین بادی انجام شده است. نمای کلی ژنراتور آهنربای دائم با رتور خارجی و توربین بادی در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): ژنراتور آهنربای دائم با رتور خارجی متصل به توربین بادی بدون جعبه دنده

### ۱.۲. مدل سازی ژنراتور

محاسبه ابعاد اصلی و تلفات ژنراتور در این قسمت ارائه شده است. همچنین روش پیشنهادی برای محاسبه ابعاد ماده آهنربای دائم که منجر به سینیوس شدن چگالی شار فاصله هوایی می‌گردد، بررسی شده است. ابعاد بخش‌های مختلف ژنراتور مورد نظر در شکل (۲) دیده می‌شود.

#### ۱.۱.۲. محاسبه ابعاد اصلی ژنراتور

اولین قدم در طراحی ژنراتور، محاسبه ابعاد اصلی آن یعنی قطر استاتور ( $D$ ) و طول ( $L$ ) آن است. به همین منظور، باید رابطه توان الکتریکی خروجی به صورت تابعی از ابعاد اصلی ژنراتور استخراج شود. توان الکتریکی خروجی ژنراتور طبق رابطه (۱) است:

$$P_{out} = m k_e E_{ph} I_{ph} \cos \varphi \quad (1)$$

توان خروجی ژنراتور و متوسط نیروی تعلیق ژنراتور، کاهش نوسانات نیروی تعلیق و کاهش اعوجاج هارمونیک کل شکل موج نیروی محرکه القایی است که در مقایسه با ژنراتور نمونه نتایج مطلوب حاصل شده است. در مرجع [۱۳] طراحی ژنراتور آهنربای دائم برای استفاده در توربین بادی با هدف افزایش شار پیوندی و متقابل و همچنین کاهش شار نشستی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات انجام شده است. در واقع این کار با تعیین ابعاد بخش‌های مختلف ماده آهنربای دائم انجام شده است. در تمامی مطالعات فوق از روش‌های مختلف برای بهبود عملکرد ژنراتور آهنربای دائم شار شعاعی از قبیل راندمان، هزینه ساخت، کیفیت ولتاژ القایی، گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور و... استفاده شده است. اما این مقالات در بهبود تمامی این پارامترها به صورت همزمان موفق نبوده‌اند و همواره تلاش برای بهبود یک یا چند پارامتر منجر به اختلال در پارامتر دیگر شده است. اما در این مقاله با ارائه ابعاد پیشنهادی برای ماده آهنربای دائم و انجام بهینه سازی طبق یک مدل تحلیلی دقیق از ژنراتور و توربین بادی، سعی شده است که ژنراتور مناسبی از نظر راندمان، هزینه ساخت، کیفیت ولتاژ القایی، گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور طراحی و ارائه گردد.

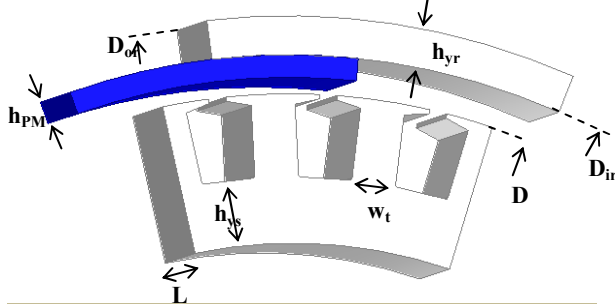
تلاش بسیاری از مهندسان در طراحی ماشین‌های الکتریکی همواره بر این بوده است که منحنی چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی به صورت سینوسی باشد تا طیف وسیعی از هارمونیک‌های فضایی حذف شود و نوسانات گشتاور و کیفیت ولتاژ القایی بهبود یابد. این امر در ماشین‌هایی که تحریک آن‌ها به واسطه سیم پیچ بوده همواره با چالش روبرو بوده است. اما طبق طرح پیشنهادی این مقاله، از آنجا که ماده آهنربای دائم یک جسم صلب بوده امکان تغییر شکل آن و سینیوس نمودن منحنی چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی فراهم است. همچنین به منظور مطالعه و بررسی بیشتر چهار طرح برای ژنراتور در نظر گرفته شده که به صورت ترکیبی از سیم پیچی متمرکز و توزیع شده و آهنربای سطحی متداول مکعب مستطیل و آهنربای سطحی پیشنهادی است. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک، بهینه سازی طرح‌های مورد نظر بر اساس کاهش هزینه ساخت انجام شده است. البته برای محاسبه ابعاد آهنربای سطحی پیشنهادی با یک معادله غیرخطی مواجه شده‌ایم که برای حل آن از روش حل عددی نیوتن-رافسون استفاده شده است. در ادامه از تحلیل اجزای محدود برای اعتبارسنجی طراحی‌های صورت گرفته و استخراج پارامترهای مورد نیاز ژنراتور استفاده شده است. در پایان با مقایسه نتایج بهینه سازی و شبیه سازی طرح‌های

کرد. این نسبت با توجه به کاربردهای مختلف ژنراتور متفاوت خواهد بود. برای ژنراتورهای آهنربای دائم متصل به توربین‌های بدون جعبه‌دنده به دلیل سرعت پایین و به منظور داشتن گشتاور مناسب، نسبت مناسب طول به قطر استاتور ( $k_{LD}$ ) بین ۰/۱۴ تا ۰/۵ گزارش شده است [۱۶]. با توجه به توضیحات فوق، ابعاد اصلی ژنراتور را می‌توان طبق روابط زیر محاسبه کرد:

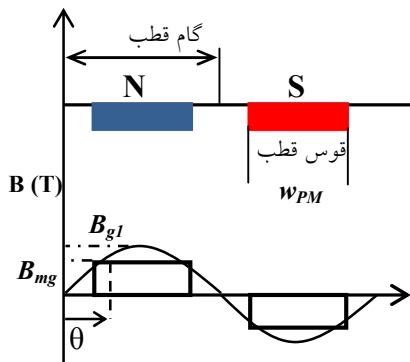
$$D = \sqrt[3]{\frac{P_{out}}{0.5 \pi^2 k_{w1} A_m B_{g1} k_{LD} n_s k_e \cos\varphi}} \quad (۸)$$

$$L = k_{LD} \cdot D \quad (۹)$$

حال می‌توان با مشخص کردن حداکثر چگالی شار مغناطیسی مجاز در یوغ استاتور و رتور و دندانه‌ها، ابعاد این بخش‌ها را نیز محاسبه کرد. در ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم شار شعاعی با آهنربای سطحی که از نوع قطب صاف محسوب می‌شوند، حداکثر چگالی شار یوغ استاتور ( $B_{sp}$ ) بین ۱/۱ تا ۱/۵ تسلا، حداکثر چگالی شار یوغ رتور ( $B_{rp}$ ) بین ۱/۳ تا ۱/۶ تسلا و حداکثر چگالی شار دندانه‌ها ( $B_t$ ) بین ۱/۵ تا ۲ تسلا می‌تواند انتخاب شود [۱۷].



شکل (۲): نمایش ابعاد بخش‌های مختلف ژنراتور آهنربای دائم با رتور خارجی



شکل (۳): چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی و مؤلفه اصلی آن

۲.۱.۲. محاسبه ابعاد ماده آهنربای دائم و ارائه روش پیشنهادی در این بخش محاسبه ابعاد ماده آهنربای دائم مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طور معمول شکل و فرم ماده آهنربای دائم در ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم با آهنربای سطحی به صورت یک مکعب مستطیل

که

$$k_e = \frac{V_{ph}}{E_{ph}} \quad (۲)$$

در این دو رابطه،  $m$  تعداد فاز،  $I_{ph}$  جریان مؤثر هر فاز،  $E_{ph}$  ولتاژ القایی فازی،  $V_{ph}$  ولتاژ ترمینال فازی در بار نامی و  $\cos\varphi$  ضریب توان بار متصل به ژنراتور است. از آنجا که ژنراتورهای متصل به توربین‌های بادی سرعت متغیر به‌واسطه یک مبدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند، در روند طراحی ضریب توان بار واحد در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ القایی فازی طبق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$E_{ph} = \pi\sqrt{2} f N_{ph} k_{w1} \Phi_{g1} \quad (۳)$$

که  $f$  فرکانس نامی و  $k_{w1}$  ضریب سیم‌بندی برای هارمونیک پایه یا مؤلفه اصلی است.  $\Phi_{g1}$  مقدار حداکثر مؤلفه اصلی فوران مغناطیسی فاصله هوایی است که طبق رابطه زیر قابل بیان است [۱۴]:

$$\Phi_{g1} = L \int_0^{\tau_p} B_{g1} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx = \frac{2}{\pi} \tau_p L B_{g1} \quad (۴)$$

در این رابطه  $\tau_p$  گام قطب برحسب متر و  $B_{g1}$  مقدار حداکثر مؤلفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی است که به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$B_{g1} = \frac{2}{\pi} \int_{-0.5\alpha_i\pi}^{0.5\alpha_i\pi} B_{mg} \cos(\alpha) d\alpha = \frac{4}{\pi} B_{mg} \sin\left(\frac{\pi}{2} \alpha_i\right) \quad (۵)$$

که  $\alpha_i$  نسبت قوس قطب به گام قطب و به مقدار ۱ در نظر گرفته شده است.  $B_{mg}$  نیز حداکثر چگالی شار فاصله هوایی است که شکل (۳) آن را قابل درک می‌کند. شکل موج مستطیلی در واقع حالت ایدئال چگالی شار فاصله هوایی بوده و شکل موج سینوسی، مؤلفه اصلی آن است. به منظور تعیین ابعاد ماده آهنربای دائم، حداکثر چگالی شار فاصله هوایی بین ۶۰ تا ۸۰٪ چگالی شار پس‌ماند ماده آهنربای دائم ( $B_r$ ) انتخاب می‌شود [۱۵]. جریان مؤثر هر فاز نیز برحسب ابعاد ماشین به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

$$I_{ph} = \frac{A_m \pi D}{2\sqrt{2} m N_{ph}} \quad (۶)$$

حال با جای‌گذاری فرمول‌های (۳) تا (۶) در (۱) می‌توان خروجی ژنراتور را به صورت تابعی از ابعاد ژنراتور بیان کرد:

$$P_{out} = 0.5\pi^2 k_{w1} A_m B_{g1} D^2 L n_s k_e \cos\varphi \quad (۷)$$

از رابطه (۷) این نتیجه حاصل می‌شود که با انتخاب نسبت مناسب بین طول و قطر استاتور می‌توان ابعاد اصلی ژنراتور را تعیین

ضریب بهره‌برداری از ماده آهنربای دائم بوده که بین ۰/۳ تا ۰/۷ است [۱۴]. حال با داشتن حجم کل ماده آهنربای دائم مورد نیاز و همچنین تعیین تعداد قطب می‌توان ابعاد ماده آهنربای دائم را تعیین کرد. تعیین ابعاد آهنربای سطحی معمولی یا متداول با مراجعه به شکل (۲) طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{PM} = P \cdot h_{PM} \cdot L \cdot w_{PM} \quad (13)$$

که  $P$  تعداد قطب و  $w_{PM}$  مطابق شکل (۳) عرض ماده آهنربای دائم است. اما برای محاسبه ابعاد ماده آهنربای دائم طبق طرح پیشنهادی باید روابط هندسی مورد نظر استخراج شود. ابعاد پیشنهادی برای ماده آهنربای دائم در شکل (۵) نمایش داده شده است. با داشتن طول ماشین می‌توان سطح مقطع آهنربا برای هر قطب  $A_{PM}$  را محاسبه کرد. مساحت آهنربا در هر قطب به صورت پیش فرض به دو قسمت  $A_{m1}$  و  $A_{m2}$  تقسیم می‌شود زیرا برای محاسبه ارتفاع آهنربا طبق شکل (۴) باید از محاسبات دایره و کمان استفاده کنیم. با مراجعه به شکل (۵) مساحت  $A_{m1}$  و  $A_{m2}$  طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$A_{m1} = \frac{1}{2} R_{ir}^2 (\alpha_1 - \sin(\alpha_1)) \quad (14)$$

$$A_{m2} = \frac{1}{2} R_m^2 (\alpha_2 - \sin(\alpha_2)) \quad (15)$$

$$= A_{PM} - A_{m1}$$

که  $R_{ir}$  شعاع داخلی یوغ رتور بوده و زوایای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  برحسب رادیان هستند. در فرمول (۱۴) تمامی پارامترها معلوم و قابل محاسبه‌اند. در فرمول (۱۵) زاویه  $\alpha_2$  مجهول بوده و هدف اصلی این است که یک تابع برحسب زاویه  $\alpha_2$  استخراج شده تا با حل آن تمامی ابعاد ماده آهنربای دائم تعیین گردد. شعاع  $R_m$  طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$R_m = \frac{L}{2\sin(\alpha_2)} \quad (16)$$

$$L = 2R_{ir}\sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \quad (17)$$

حال با جای‌گذاری فرمول‌های (۱۶) و (۱۷) در فرمول (۱۵)، تابعی برحسب  $\alpha_2$  حاصل می‌شود:

$$f(\alpha_2) = \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{L}{2\sin(\alpha_2)} \right)^2 \cdot (\alpha_2 - \sin(\alpha_2)) \right] - (A_{PM} - A_{m1}) \quad (18)$$

رابطه فوق در واقع یک معادله غیرخطی است. در روند طراحی ژنراتور برای حل این معادله از روش حل عددی نیوتون-رافسون استفاده می‌شود. روش عددی نیوتون رافسون یک الگوریتم ریشه‌یابی است که تقریب‌های خوبی در نزدیکی ریشه یک تابع پیدا می‌کند.

بوده که در تمام نقاط، یک ارتفاع خاص دارد؛ این نوع طرح در شکل (۲) نمایش داده شده است. این نوع شکل آهنربا در حالت ایدئال منجر به ایجاد توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی مطابق منحنی شکل (۳) با حداکثر مقدار  $B_{mg}$  می‌شود. همان طور که می‌دانید در ژنراتورها به منظور القای ولتاژ سینوسی بدون اعوجاج، تمایل به این است که منحنی توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی سینوسی کامل باشد یا به عبارت دیگر حالت ایدئال این است که بدون در نظر گرفتن اثر دندانه‌ها، هارمونیک فضایی وجود نداشته باشد. این نوع منحنی توزیع چگالی شار طبق شکل (۳) با حداکثر مقدار  $B_{gl}$  قابل مشاهده است. در ماشین‌هایی که از سیم‌پیچ تحریک برای تأمین چگالی شار مغناطیسی مورد نیاز در فاصله هوایی استفاده می‌شود، منحنی توزیع چگالی شار فاصله هوایی همراه با اعوجاج بسیار زیاد خواهد بود. مبنای روش پیشنهادی نویسندگان مقاله بر این است که منحنی توزیع چگالی شار در فاصله هوایی سینوسی کامل باشد تا ولتاژ القایی با کیفیت بیشتر و همچنین گشتاوری با دامنه نوسان پایین‌تر به دست آید. از آنجا که در یک ژنراتور آهنربای دائم، چگالی شار مورد نظر در فاصله هوایی برای القای ولتاژ در سیم‌پیچی استاتور توسط یک جسم صلب یعنی ماده آهنربای دائم تأمین می‌شود، امکان تغییر شکل ماده آهنربای دائم و در نهایت تغییر منحنی توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی وجود خواهد داشت. طرح پیشنهادی برای ماده آهنربای دائم برای سینوسی شدن منحنی توزیع چگالی شار فاصله هوایی مطابق شکل (۴) است. برای محاسبه ابعاد ماده آهنربای دائم از رابطه انرژی ماده آهنربای دائم استفاده می‌شود. توان خروجی یک ماشین سنکرون آهنربای دائم متناسب با انرژی ماده آهنربای دائم به کاررفته در آن یا به عبارت دیگر متناسب با کل حجم ماده آهنربای دائم است [۱۴ و ۱۷]:

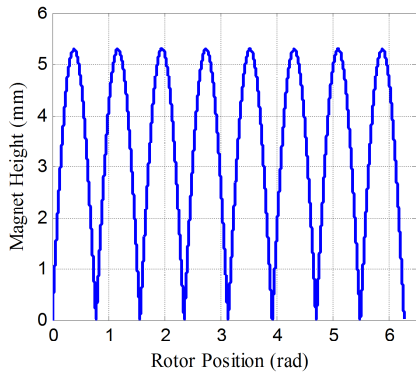
$$P_{out} \propto E_{PM} = \frac{1}{2} \int_{V_m} B_r H_c dv = \frac{1}{2} B_r H_c V_m \quad (10)$$

که  $E_{PM}$  و  $V_m$  به ترتیب انرژی و حجم کل ماده آهنربای دائم به کاررفته در ماشین هستند. طبق تعریف بالا می‌توان حجم کل ماده آهنربای دائم مورد نیاز را طبق رابطه زیر محاسبه کرد [۱۴]:

$$V_{PM} = C_v \frac{P_{out}}{f B_r H_c} \quad (11)$$

$$C_v = \frac{2k_{ov}k_{fd}(2 - k_e)}{\pi^2 \xi} \quad (12)$$

که  $k_{ov}$  ضریب تحمل اضافه‌بار ماشین است که مقدار آن می‌تواند ۲ انتخاب می‌شود.  $k_{fd}$  ضریب شکل ماده آهنربای دائم بوده که مقدار آن برای ماشین‌های آهنربای دائم سطحی یک انتخاب شود.  $\xi$  نیز



شکل (۶): تغییرات ارتفاع ماده آهنربای دائم برحسب زاویه موقعیت رتور

### ۳.۱.۲. محاسبه ضریب سیم‌پیچی

به منظور مطالعه بیشتر از روش‌های سیم‌پیچی مختلفی برای ژنراتور استفاده شده است تا از لحاظ راندمان، هزینه ساخت، گشتاور دندانه‌ای، نوسانات گشتاور<sup>۱</sup> و کیفیت ولتاژ القایی با یکدیگر مقایسه شده تا سیم‌پیچی مناسب برای این طرح آهنربای سطحی معرفی گردد. سیم‌پیچی‌های توزیع شده و متمرکز دو نوع روش شناخته شده به منظور سیم‌بندی ماشین‌های الکتریکی هستند.

از مزیت‌های مهم سیم‌پیچی توزیع شده داشتن ولتاژ القایی با اعوجاج کمتر نسبت به روش سیم‌پیچی متمرکز است [۱۸]. اما از معایب آن زیاد بودن طول انتهای کلاف و در نتیجه تلفات مسی بیشتر است. همچنین قابلیت اطمینان کمتر یا خطاپذیری<sup>۲</sup> بیشتری نسبت به نوع متمرکز دارد زیرا کلاف‌های فازهای مختلف روی هم قرار می‌گیرند [۱۸ و ۱۹]. سیم‌پیچی متمرکز به این صورت است که هر کلاف به دور یک دندانه پیچیده خواهد شد. همان طور که گفته شد، کیفیت ولتاژ القایی در سیم‌پیچی متمرکز کمتر از سیم‌پیچی توزیع شده است که از معایب آن می‌باشد. اما تلفات مسی کمتر به دلیل کوتاه شدن طول انتهای کلاف و خطاپذیری کمتر به دلیل روی هم قرار نگرفتن کلاف‌ها از مزایای اصلی آن خواهد بود. همچنین انتخاب مناسب ترکیب تعداد شیارها و قطب‌ها در این نوع سیم‌پیچی منجر به کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌شود. از آنجا که هدف نویسندگان بررسی ترکیب‌های مختلف و مطالعه گشتاور دندانه‌ای نیست، ترکیب تعداد شیار و قطب در این مطالعه ۳/۲ انتخاب شده است. در شکل (۷) سیم‌پیچی توزیع شده یک طبقه و سیم‌پیچی متمرکز دو لایه استفاده شده در این مقاله نمایش داده شده‌اند. هریک از روش‌های سیم‌پیچی نامبرده دارای ضریب سیم‌بندی متفاوتی هستند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

به طور کلی، از روش نیوتن رافسون به منظور حل یک معادله غیرخطی یا یک دستگاه معادلات غیرخطی استفاده می‌شود. الگوریتم در پایان فقط یک جواب ارائه می‌دهد، زیرا این روش حل، یک تابع غیرخطی را با یک معادله درجه اول تقریب می‌زند. روش نیوتن رافسون برای شروع مراحل تخمین ریشه از یک حدس اولیه استفاده می‌کند که به اندازه لازم به مقدار واقعی ریشه نزدیک است و در ادامه با استفاده از خط مماس طول از مبدأ را معین می‌سازد و الگوریتم به همین منوال می‌تواند تکرار شود. حال با داشتن مقدار زاویه  $\alpha$  می‌توان ارتفاع ماده آهنربای دائم را طبق روابط زیر محاسبه کرد:

$$h_{PM} = h_{m1} + h_{m2} \quad (19)$$

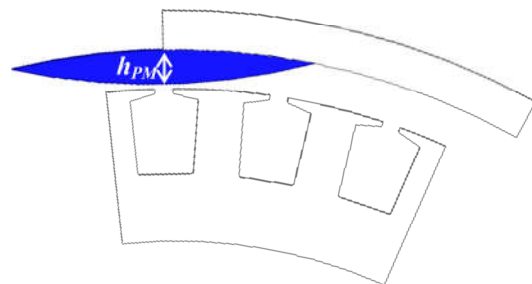
$$h_{m1} = R_{ir} \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)\right) \quad (20)$$

$$h_{m2} = R_m \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)\right) \quad (21)$$

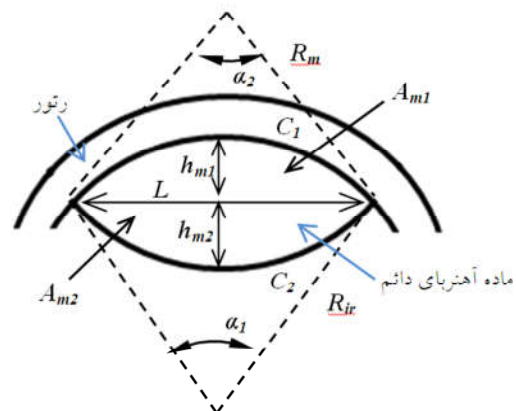
به طور کلی معادله تغییرات ارتفاع ماده آهنربای دائم طبق فرمول (۲۲) می‌باشد که در شکل (۶) نیز برای یک نمونه ماشین آهنربای دائم سطحی هشت قطب نمایش داده شده است.

$$h_{PM}(\theta) = h_{PM} \cdot \left| \sin\left(\frac{P}{2}\theta\right) \right| \quad (22)$$

که  $\theta$  طبق شکل (۳) زاویه موقعیت رتور برحسب رادیان است.



شکل (۴): طرح پیشنهادی برای ماده آهنربای دائم



شکل (۵): ابعاد ماده آهنربای دائم پیشنهادی

1. Torque Ripple
2. Fault Tolerance

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{q_{ph}}{2} \frac{\alpha_{ph}}{2}\right)}{\frac{q_{ph}}{2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{ph}}{2}\right)} \quad \text{هرگاه } q_{ph} \text{ زوج باشد} \quad (28)$$

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(q_{ph} \frac{\alpha_{ph}}{4}\right)}{q_{ph} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{ph}}{4}\right)} \quad \text{هرگاه } q_{ph} \text{ فرد باشد}$$

که

$$q_{ph} = \frac{Q}{m \cdot t} \quad (29)$$

$$\alpha_{ph} = \frac{2\pi}{Q} t \quad (30)$$

که  $t$  بزرگترین مضرب مشترک بین تعداد شیار و تعداد جفت قطب است.

#### ۴.۱.۲. محاسبه تلفات

تلفات ژنراتور آهنربای دائم متصل به توربین بادی بدون جعبه‌دنده شامل تلفات آهنی و مسی است. از آنجا که سرعت نامی ژنراتور پایین بوده و از طرف دیگر دائماً به دلیل تغییرات سرعت باد بین صفر تا مقدار نامی در حال تغییر است، ز تلفات اصطکاک و بادخوری صرف نظر شده است. تلفات آهنی در ماشین‌های آهنربای دائم با آهنربای سطحی تلفات هسته ژنراتور قابل صرف نظر بوده، لذا تلفات هسته در یوغ و دندانه استاتور مطابق رابطه زیر خواهد بود [۴]:

$$P_{Fe} = 2m_{Fe}\rho_h \frac{f}{50} \left(\frac{B_{Fe}}{1.5}\right)^2 + 2m_{Fe}\rho_e \left(\frac{f}{50}\right)^2 \left(\frac{B_{Fe}}{1.5}\right)^2 \quad (31)$$

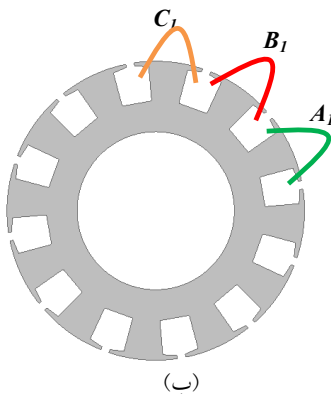
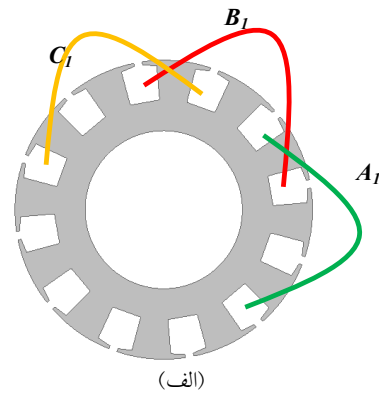
که  $\rho_e$  و  $\rho_h$  به ترتیب تلفات مخصوص هیستریزس و جریان گردابی (وات بر کیلوگرم) در فرکانس ۵۰ هرتز و چگالی شار ۱/۵ تسلا هستند.  $f$  فرکانس نامی ماشین،  $B_{Fe}$  حداکثر چگالی شار در دندانه یا یوغ استاتور و  $m_{Fe}$  وزن دندانه‌ها یا یوغ استاتور است. نوع ورق مورد استفاده M-19 بوده که تلفات هیستریزس و جریان گردابی مخصوص آن به ترتیب ۲ و ۰/۵ وات بر کیلوگرم است. تلفات مسی نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{Cu} = mR_{ph}I_{ph}^2 \quad (32)$$

که  $R_{ph}$  مقاومت اهمی هر فاز استاتور است.

#### ۵.۱.۲. محاسبه گشتاور دندانه‌ای

گشتاور دندانه‌ای<sup>۱</sup> در واقع گشتاوری مزاحم بوده که با صرف نظر از اشباع مغناطیسی و عکس‌العمل آرمیچر، مستقل از جریان آرمیچر بوده و از اثر متقابل بین ماده آهنربای دائم و دندانه‌های استاتور ایجاد می‌شود. این گشتاور منجر به لرزش و نویز صوتی در ماشین آهنربای دائم می‌شود. گشتاور دندانه‌ای به واسطه نرخ تغییرات کل انرژی



شکل (۷): سیم‌پیچی‌های مورد استفاده برای ژنراتور؛ الف. توزیع شده یک طبقه، ب. متمرکز دولایه

ضریب سیم‌بندی برای هارمونیک اول به طور کلی طبق رابطه زیر است [۱۹ و ۲۰]:

$$k_{w1} = k_{d1} \cdot k_p \quad (23)$$

که  $k_d$  ضریب توزیع و  $k_p$  ضریب گام است. ضریب گام برای سیم‌پیچی توزیع شده با گام کامل همواره برابر یک است. ضریب گام برای سیم‌پیچی متمرکز طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷ و ۲۰]:

$$k_p = \sin\left(\frac{\pi \cdot P \cdot y}{2Q}\right) \quad (24)$$

$$y = \text{Int}\left(\frac{Q}{p}\right) \quad (25)$$

که  $Q$  تعداد شیار و  $y$  گام کلاف بر حسب تعداد شیار است.  $\text{Int}$  به معنی نزدیک‌ترین عدد صحیح است. ضریب توزیع برای سیم‌پیچی توزیع شده از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۹ و ۲۰]:

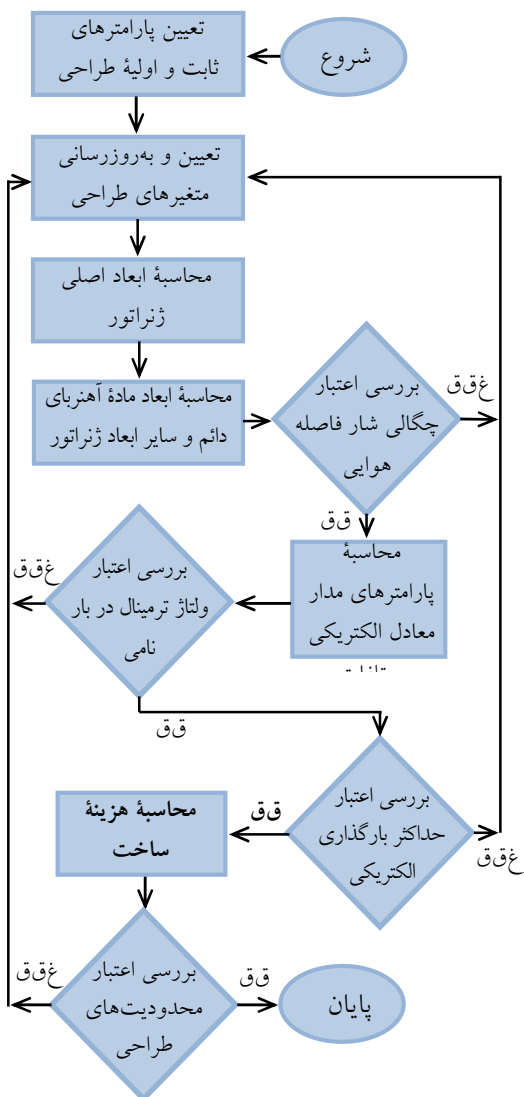
$$k_{d1} = \frac{\sin\left(q \cdot \frac{\alpha_u}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha_u}{2}\right)} \quad (26)$$

$$\alpha_u = \frac{P \cdot \pi}{Q} \quad (27)$$

که  $q$  شیار بر قطب بر فاز است. محاسبه ضریب توزیع برای سیم‌پیچی متمرکز دولایه به صورت رابطه (۲۸) است [۱۹ و ۲۰]:

### ۳.۲. روندنمایی طراحی ژنراتور

به منظور شروع طراحی یک ژنراتور باید پارامترهای مهم و ثابت آن را تعیین کرد. این پارامترها شامل توان الکتریکی، سرعت و ولتاژ نامی، مشخصه ماده آهنربای دائم، ضریب پرشدگی شیار و... است. ابتدا متغیرهای طراحی باید مقداردهی اولیه شوند. در ادامه ابعاد تمامی بخش‌های ژنراتور محاسبه شده و چگالی شار فاصله هوایی، اعتبار سنجی می‌شود. در صورتی که چگالی شار فاصله هوایی مورد تأیید نباشد، متغیرهای طراحی باید به‌روزرسانی شوند. اگر چگالی شار فاصله هوایی قابل قبول باشد، روند طراحی ادامه یافته و پارامترهای مدار معادل الکتریکی یعنی مقاومت و اندوکتانس، تلفات و هزینه ساخت محاسبه شده و در صورتی که ولتاژ ترمینال در بار نامی، بارگذاری الکتریکی ویژه و محدودیت‌های طراحی ارضا شده باشند، طراحی ژنراتور خاتمه می‌یابد. در غیر این صورت متغیرهای طراحی باید دوباره مقداردهی شوند. روندنمای طراحی ژنراتور در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۸): روندنمای طراحی ژنراتور سنکرون آهنربای دائم رتور خارجی

ذخیره‌شده در فاصله هوایی محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$T_{cog} = \frac{1}{2} \Phi_g^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (۳۳)$$

که  $\Phi_g$  و  $R$  فوران و رلوکتانس مغناطیسی فاصله هوایی است.

### ۶.۱.۲. محاسبه هزینه ساخت

محاسبه هزینه ساخت ژنراتور تحت تأثیر عوامل مختلفی است؛ از جمله: تعداد ژنراتورهای ساخته‌شده در طول یک سال، سطح به‌کارگیری تکنولوژی در ساخت، سازمان‌دهی فرایند تولید، هزینه نیروی کار و هزینه فراهم نمودن مواد مصرفی. در نظر گرفتن تمامی این عوامل در محاسبه هزینه ساخت ژنراتور بسیار پیچیده است؛ از این رو در این مقاله فقط هزینه مواد مصرفی ژنراتور یعنی مس، هسته آهنی و ماده آهنربای دائم محاسبه شده است:

$$C_{mat} = C_{PM} \cdot m_{PM} + C_{Cu} \cdot m_{Cu} + C_c \cdot m_c \quad (۳۴)$$

که  $C_{PM}$ ،  $C_{Cu}$  و  $C_c$  به ترتیب هزینه مخصوص ماده آهنربای دائم، مس و هسته آهنی برحسب دلار بر کیلوگرم و  $m_{PM}$ ،  $m_{Cu}$  و  $m_c$  وزن به ترتیب وزن کل ماده آهنربای دائم، مس و هسته آهنی هستند. هزینه مخصوص مواد مصرفی در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مشخصه‌های اصلی ژنراتور و هزینه مواد مصرفی

پارامترها	واحد	مقدار
توان خروجی الکتریکی	وات	۱۵۰۰۰
ولتاژ نامی خط	ولت	۴۰۰
سرعت نامی محور	دور بر دقیقه	۱۵۰
$C_{PM}$	یورو بر کیلوگرم	۳۰
$C_{Cu}$	یورو بر کیلوگرم	۱۵
$C_c$	یورو بر کیلوگرم	۳

### ۲.۲. مدل‌سازی توربین بادی

در این بخش محاسبه توان قابل دریافت از توربین بادی ارائه شده است. معمولاً توان قابل دریافت از یک توربین بادی به‌واسطه منحنی توان تشریح می‌شود که بیانگر رابطه بین سرعت باد و توان خروجی توربین بادی است [۲۱-۲۳]:

$$P_T = 0 \quad \text{برای سرعت باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه}$$

$$P_T = 0.5 C_p \rho_{air} \pi R^2 u^3 \quad \text{برای سرعت باد بین ۳ تا ۱۲ متر بر ثانیه} \quad (۳۵)$$

$$P_T = 0.5 C_p \rho_{air} \pi R^2 12^3 \quad \text{برای سرعت باد ۱۲ تا ۲۵ متر بر ثانیه}$$

که  $P_T$  توان به‌دست‌آمده از توربین بادی برحسب وات،  $u$  سرعت باد برحسب متر بر ثانیه،  $R$  شعاع پره توربین برحسب متر،  $\rho_{air}$  چگالی هوا (۱/۲۲۵) کیلوگرم بر مترمکعب) و  $C_p$  بازده آیرودینامیکی توربین بادی است. بازده آیرودینامیکی بین ۰/۳ تا ۰/۴۵ است [۲].



### ۳. بهینه‌سازی، شبیه‌سازی و مقایسه طرح‌های مختلف ژنراتور

در این بخش بهینه‌سازی طراحی ژنراتور بر اساس چهار طرح که از نظر نوع سیم‌پیچی و ابعاد آهنربای سطحی با هم متفاوت‌اند، انجام شده است:

**طرح الف:** ژنراتور با آهنربای سطحی متداول و سیم‌پیچی توزیع شده.

**طرح ب:** ژنراتور با آهنربای سطحی متداول و سیم‌پیچی متمرکز.

**طرح ج:** ژنراتور طبق آهنربای سطحی پیشنهادی و سیم‌پیچی توزیع شده.

**طرح د:** ژنراتور طبق آهنربای سطحی پیشنهادی و سیم‌پیچی متمرکز.

در واقع هدف ما این است که این چهار طرح بر اساس نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده تا طرح قابل قبول برای کاربرد مورد نظر معرفی گردد. نتایج حائز اهمیت برای مقایسه شامل راندمان، هزینه ساخت، چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی، کیفیت ولتاژ القایی، دامنه نوسانات گشتاور و گشتاور دندانه‌ای است. همچنین به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، این پارامترها با یک نمونه واقعی معرفی شده در مرجع [۵] مقایسه شده‌اند. قبل از انجام بهینه‌سازی لازم است که پارامترها، فرضیه‌ها و محدودیت‌های مهم در طراحی ژنراتور معرفی شوند. در جدول (۱) مشخصه‌های مهم ژنراتور معرفی شده‌اند. فرضیه‌ها و محدودیت‌های طراحی بدین شرح‌اند:

۱. طول فاصله هوایی به منظور بهبود عملکرد مکانیکی ژنراتور  $0/001$  قطر استاتور ( $D$ )، حداقل عرض دندانه استاتور  $10$  میلی‌متر و نسبت شیار بر قطب بر فاز  $1$  در نظر گرفته شده است [۴ و ۱۷]. همچنین ضریب اشغال شیار استاتور  $0/6$  فرض شده است.

۲. سیم‌بندی توزیع شده به صورت یک طبقه بوده و گام کامل اجرا شده است.

۳. ترکیب تعداد شیار و قطب در مورد سیم‌پیچی متمرکز  $3/2$  است.

۴. نسبت قوس به گام قطب  $1$  در نظر گرفته شده است.

۵. طراحی ژنراتور بر اساس مؤلفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی است. از آنجا که هدف از طرح پیشنهادی این است که منحنی توزیع چگالی شار در فاصله هوایی سینوسی یا طبق مؤلفه اصلی باشد،  $B_{gl}=B_{mg}$  خواهد بود.

۶. طبق روندنمای طراحی، مقدار چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی، ولتاژ ترمینال و حداکثر بارگذاری الکتریکی ویژه در هر

تکرار با اختلاف  $5\%$  نسبت به مقدار محاسبه شده و نامی قابل قبول خواهد بود.

۷. نوع ماده آهنربای انتخاب شده در این مقاله NdFeB35 با چگالی شار پس ماند  $1/23$  تسلا و شدت میدان خشی کننده ( $H_c$ )  $890$  کیلوآمپر بر متر است.

۸. با توجه به محدوده فرکانس نامی برای یک ژنراتور آهنربای دائم متصل به توربین بادی بدون جعبه‌دنده که بین  $30$  تا  $80$  هرتز [۵] یا  $10$  تا  $70$  هرتز [۱۸] گزارش شده، تعداد جفت قطب ژنراتور برای سرعت نامی  $150$  دور بر دقیقه به‌عنوان یکی از متغیرهای طراحی بین  $4$  تا  $32$  انتخاب شده است.

### ۱.۳. بهینه‌سازی طراحی ژنراتور

همان‌طور که گفته شد، هدف از طراحی بهینه ژنراتور، کاهش هزینه ساخت آن طبق فرمول (۳۴) است. قابل ذکر است که توابع هدف مختلفی اعم از تک‌منظوره و چندمنظوره را می‌توان بر اساس نیاز طراحی تعریف کرد اما هدف نویسندگان از انتخاب تابع هدف تک‌منظوره هزینه ساخت، نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی برای طراحی ژنراتور است. با اینکه تابع هدف کاهش هزینه ساخت است، در ادامه مشاهده می‌شود که مقدار مناسبی برای راندمان، گشتاور دندانه‌ای، نوسانات گشتاور و کیفیت ولتاژ القایی حاصل شده است. قبل از انجام طراحی بهینه، متغیرهای طراحی به‌عنوان پارامترهای اساسی بهینه‌سازی معرفی شده و سپس طبق مدل پیشنهادی برای ژنراتور و تابع هدف در محدوده مناسب خود بهینه‌یابی می‌شوند. متغیرهای بهینه‌سازی در جدول (۲) نمایش داده شده‌اند. نتایج بهینه‌سازی طرح‌های الف، ب، ج و د طبق تابع هدف مورد نظر در جدول (۳) ارائه شده است. مقایسه طرح‌ها بعد از انجام شبیه‌سازی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول (۲): معرفی متغیرهای بهینه‌سازی ژنراتور

متغیر	واحد	محدوده تغییرات
$A_m$	آمپر بر متر	۱۰۰۰۰-۵۵۰۰۰
$B_{mg}$	تسلا	۰/۷۳۸-۰/۹۸۴
$k_{LD}$	-	۰/۱۴-۰/۵
$k_c$	-	۰/۶-۱
$P$	-	۴-۳۲
$B_{sy}$	تسلا	۱/۱-۱/۵
$B_{ry}$	تسلا	۱/۳-۱/۶
$B_t$	تسلا	۱/۵-۲
$\xi$	-	۰/۳-۰/۷
چگالی جریان	آمپر بر میلی‌متر مربع	۳-۶

جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی طرح‌های ارائه‌شده برای ژنراتور آهنربای دائم سطحی با رتور خارجی

پارامتر	واحد	طرح (الف)	طرح (ب)	طرح (ج)	طرح (د)
$A_m$	آمپر بر متر	۳۷۴۴۷	۳۷۶۰۹	۴۰۱۱۳	۴۹۵۹۸
$B_{mg}$	تسلا	۰/۸۳۴	۰/۸۶۲	۰/۸۱۳	۰/۹۴۹
$B_{gl}$	تسلا	۱/۰۶۲	۱/۰۹۷	۰/۸۱۳	۰/۹۴۹
$k_{LD}$	-	۰/۳۳۶	۰/۳۴۳	۰/۱۴۱	۰/۱۴
$k_e$	-	۰/۷۴۲	۰/۸۴۵	۰/۸۹۹	۰/۹۲۷
$P$	-	۲۴	۳۴	۳۰	۴۰
$B_{sy}$	تسلا	۱/۳۳	۱/۳۶	۱/۲۸	۱/۳۶
$B_{ry}$	تسلا	۱/۴۳	۱/۴۲	۱/۴	۱/۶
$B_t$	تسلا	۱/۷۵	۱/۷۳	۱/۸۷	۲
$\xi$	-	۰/۶۷	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۳
چگالی جریان	آمپر بر میلی‌متر مربع	۵/۶	۵/۱	۵/۶	۴/۸
راندمان	-	۹۴/۰۸	۹۴/۵۵	۹۴/۴۱	۹۵
هزینه ساخت	یورو	۵۵۴	۵۱۷	۵۲۵	۵۰۲
حجم	سانتی‌متر مکعب	۳۶۴۹۲	۳۴۷۸۰	۳۶۱۵۴	۲۸۲۷۴
ولتاژ القایی	ولت	۳۱۱/۰۲	۲۷۳/۴	۲۵۶/۶	۲۴۹/۳۸
$f$	هرتز	۳۰	۴۲/۵	۳۷/۵	۵۰
$h_{pm}$	میلی‌متر	۲/۵	۲/۴	۴/۰۴	۷/۳
$D_e$	میلی‌متر	۵۲۷/۵۸	۵۱۳/۰۳	۷۰۲/۴۲	۶۴۷/۹۴
$D$	میلی‌متر	۴۹۶/۷	۴۸۹/۲	۶۶۶/۴۳	۶۱۲/۵
$L$	میلی‌متر	۱۶۶/۹۳	۱۶۸/۲۴	۹۳/۳	۸۵/۷۵
$w_t$	میلی‌متر	۱۰/۶۱	۱۵/۵	۱۰/۴	۱۵/۷

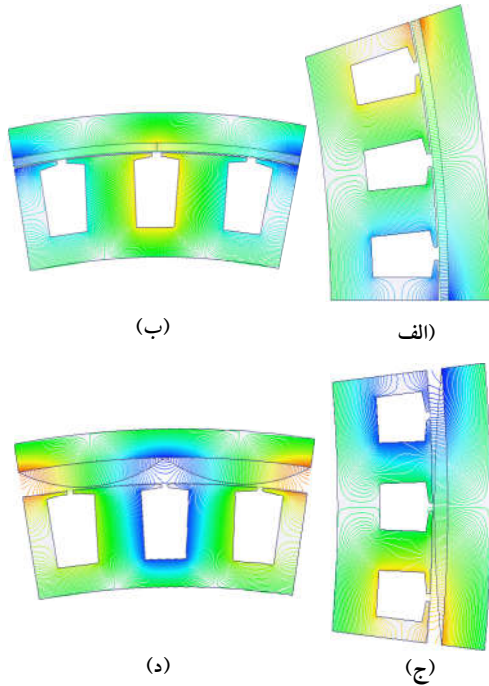
### ۲.۳. شبیه‌سازی طرح‌های مختلف ژنراتور

هارمونیک‌ها را شامل می‌شوند. این هارمونیک‌ها که معروف به هارمونیک‌های فضایی هستند، منجر به به ایجاد گشتاورهای مزاحم در فاصله هوایی و در ادامه نوسانات گشتاور و کاهش کیفیت ولتاژ القایی می‌شوند. اما از شکل‌های (۱۰-ج و د) مشاهده می‌شود که طرح پیشنهادی منجر به این شده است که منحنی توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی به صورت سینوسی شود. از طیف هارمونیک دو منحنی در شکل‌های (۱۱ ج و د) مشاهده می‌شود که اعوجاج هارمونیک کل آن‌ها (به ترتیب ۶/۳۲ و ۹/۰۹٪) بسیار کاهش یافته و طیف وسیعی از هارمونیک‌های فضایی تضعیف شده‌اند؛ لذا در ادامه شبیه‌سازی کاهش نوسانات گشتاور و بهبود کیفیت ولتاژ القایی رخ می‌دهد.

مؤلفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی ( $B_{gl}$ ) با انجام شبیه‌سازی برای طرح (الف) ۱/۰۴۳ تسلا و برای طرح (ب) ۱/۱۱۸ تسلا اندازه‌گیری شده است که با مراجعه به جدول (۳) مشاهده می‌شود با مقدار حاصل از بهینه‌سازی اختلاف بسیار کمی خواهند داشت. این نکته قابل ذکر است که برای طرح (الف و ب)  $B_{gl}$  برابر  $\frac{4}{\pi}$

به منظور اعتبارسنجی طرح‌های مختلف ارائه‌شده برای ژنراتور، از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ماکسول به منظور شبیه‌سازی استفاده شده است. توزیع شار مغناطیسی در بخش‌های مختلف ژنراتور در شکل (۹) دیده می‌شود. منحنی چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی برای چهار طرح در شکل (۱۰) برای دو گام قطب نمایش داده شده است. به منظور بررسی بیشتر، طیف هارمونیک منحنی‌های توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی با استفاده از نرم‌افزار متلب استخراج شده است که در شکل (۱۱) نمایش داده شده‌اند. در شکل‌های (۱۰ الف و ب) که مربوط به آهنربای سطحی متداول بوده، مشاهده می‌شود که منحنی توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی به صورت مستطیلی است. با مراجعه به طیف هارمونیک این دو منحنی که به ترتیب در شکل‌های (۱۱ الف و ب) ارائه شده است، مشاهده می‌شود که اعوجاج هارمونیک کل آن‌ها (به ترتیب ۳۵/۶۱ و ۴۶/۳۳٪) بسیار بالا بوده و طیف وسیعی از

ج و د) دیده می‌شود. حداکثر مقدار گشتاور دندانه‌ای در ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای پیشنهادی ۲/۶۴ نیوتن متر بوده و در ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای پیشنهادی به حداقل مقدار ۰/۸۵ نیوتن متر کاهش یافته است.



شکل (۹): توزیع شار مغناطیسی در بخش‌های مختلف ژنراتور: الف. با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول؛ ب. با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول؛ ج. با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی؛ د. با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی

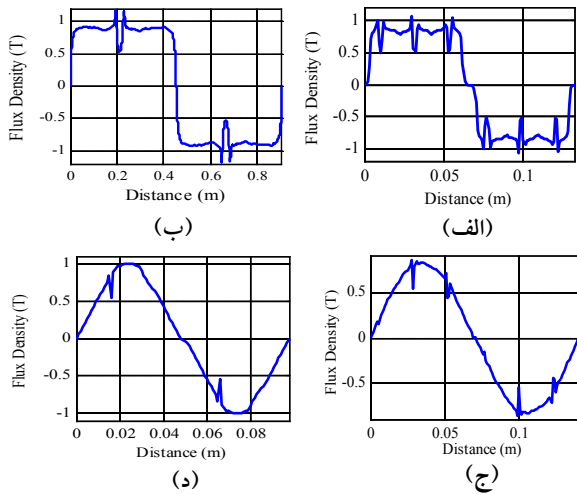
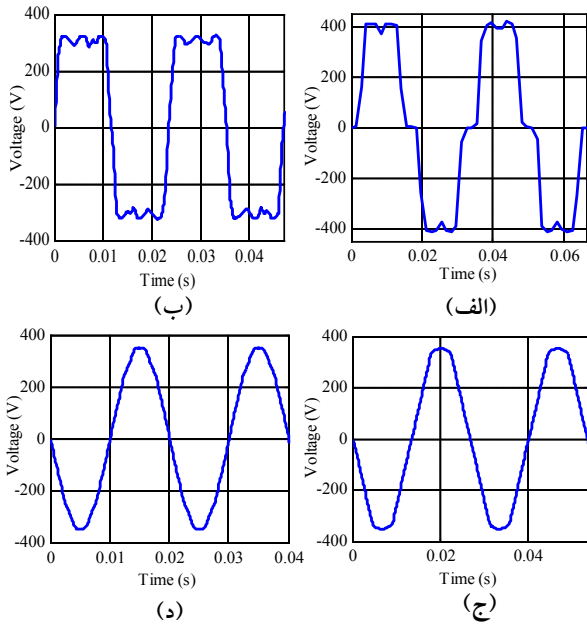
در شکل (۱۴) منحنی گشتاور محور ژنراتورها ارائه شده است. همان طور که در شکل (۱۴ الف) مشاهده می‌شود، ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول دارای بیشترین نوسانات گشتاور (۶۹/۲۱٪) است. با اجرای سیم‌پیچی متمرکز برای آهنربای سطحی متداول، نوسانات گشتاور به دلیل تضعیف گشتاور دندانه‌ای به مقدار ۴۸/۱۷٪ کاهش یافته است. اما نوسانات گشتاور برای ژنراتور با آهنربای سطحی پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است که در شکل‌های (۱۴ ج و د) دیده می‌شود. علت اصلی کاهش نوسانات گشتاور، تضعیف هارمونیک‌های فضایی و در نتیجه گشتاورهای مزاحم و همچنین کاهش گشتاور دندانه‌ای است. نوسانات گشتاور برای ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی ۱۳/۸۶٪ است. همچنین نوسانات گشتاور برای ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی ۶/۷۲٪ اندازه‌گیری شده است.

$B_{mg}$  خواهد بود. با انجام شبیه‌سازی برای طرح (ج)، حداکثر مقدار چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی ( $B_{mg}$ ) ۰/۸۴۸ و مؤلفه اصلی آن ( $B_{g1}$ ) ۰/۸۲۱ تسلا اندازه‌گیری شده است که این مقدار در طراحی بهینه ۰/۸۱۳ تسلا تعیین شده بود. اختلاف بسیار کم حداکثر چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی و مؤلفه اصلی آن و همچنین مقدار بهینه‌یابی شده آن در طراحی نشان‌دهنده صحت و اعتبار فرضیه (۵) در بخش (۳) خواهد بود.

با شبیه‌سازی طرح (د)،  $B_{mg}=0/995$  تسلا و  $B_{g1}=0/936$  تسلا اندازه‌گیری شده‌اند که مقدار بهینه‌یابی شده در طراحی بهینه ۰/۹۴۹ تسلا بوده است.

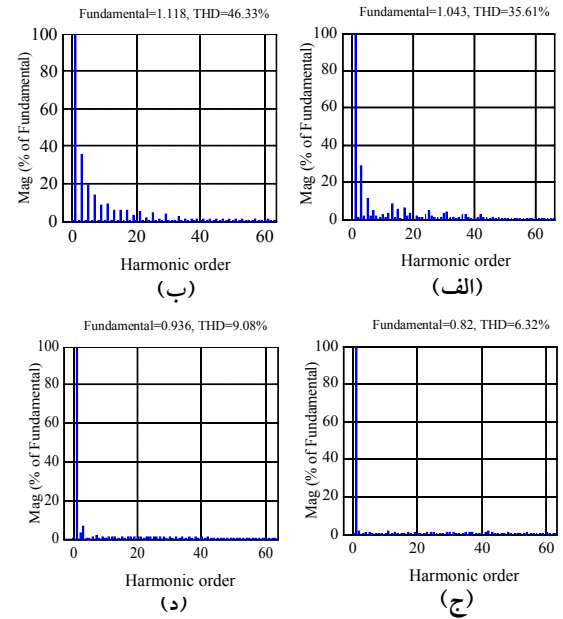
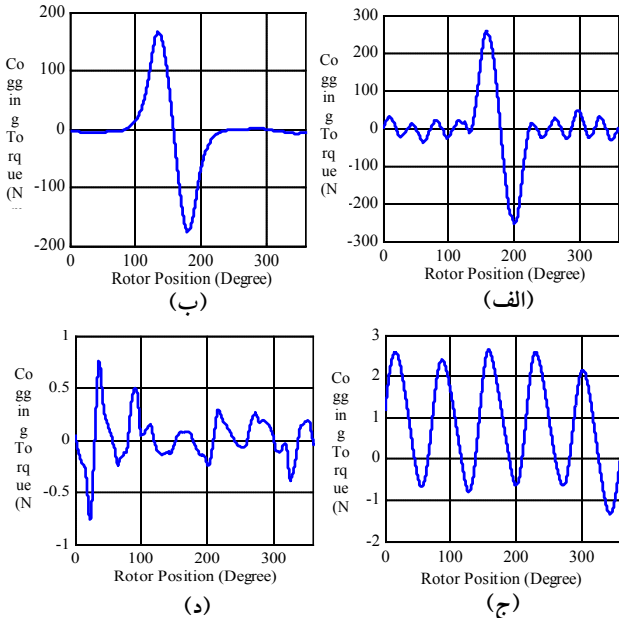
منحنی ولتاژ القایی فازی برای چهار طرح در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. شکل موج ولتاژ القایی ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول مطابق شکل (۱۲ الف) بوده که مقدار مؤثر آن ۳۰۸/۹ ولت با اعوجاج هارمونیک کل ۱۹/۰۸٪ است. در شکل (۱۲ ب) شکل موج ولتاژ القایی ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول مشاهده می‌شود که مقدار مؤثر آن ۲۷۶/۲ ولت با اعوجاج هارمونیک کل ۳۳/۸۸ درصد اندازه‌گیری شده است. همان طور که پیش‌تر گفته شد، کیفیت ولتاژ القایی نسبت به سیم‌پیچی توزیع شده کاهش یافته است؛ اما به طور واضح در شکل‌های (۱۲ ج و د) مشاهده می‌شود که در طرح آهنربای پیشنهادی، کیفیت ولتاژ القایی به طور چشم‌گیری بهبود یافته است. مقدار ولتاژ القایی ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی ۲۵۴/۹ ولت با اعوجاج هارمونیک کل ۱/۳۶٪ اندازه‌گیری شده است. همچنین مقدار مؤثر ولتاژ القایی ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی ۲۴۸/۴ ولت با اعوجاج هارمونیک کل ۴/۱۷٪ است. با مراجعه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که مقادیر حاصل از شبیه‌سازی با ولتاژ القایی محاسبه شده در طراحی بهینه اختلاف بسیار کمی خواهند داشت.

شکل موج گشتاور دندانه‌ای برای طرح‌های مورد نظر در شکل (۱۳) ارائه شده است. طبق شکل (۱۳ الف)، ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای متداول دارای بیشترین گشتاور دندانه‌ای یعنی ۲۵۶/۷۷ نیوتن متر است. با اجرای سیم‌پیچی متمرکز برای ژنراتور با آهنربای سطحی متداول، حداکثر مقدار گشتاور دندانه‌ای طبق شکل (۱۳ ب) به مقدار ۱۶۶/۶۳ نیوتن متر کاهش یافته که در واقع یکی از ویژگی‌های سیم‌پیچی متمرکز کاهش گشتاور دندانه‌ای بوده است. حال با اجرای طرح پیشنهادی برای آهنربای سطحی، گشتاور دندانه‌ای به طور چشم‌گیری کاهش یافته است که در شکل‌های (۱۳



شکل (۱۰): چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی: الف. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول؛ ب. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول؛ ج. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی؛ د. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی

شکل (۱۲): ولتاژ القایی فاز: الف. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول؛ ب. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول؛ ج. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی؛ د. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی



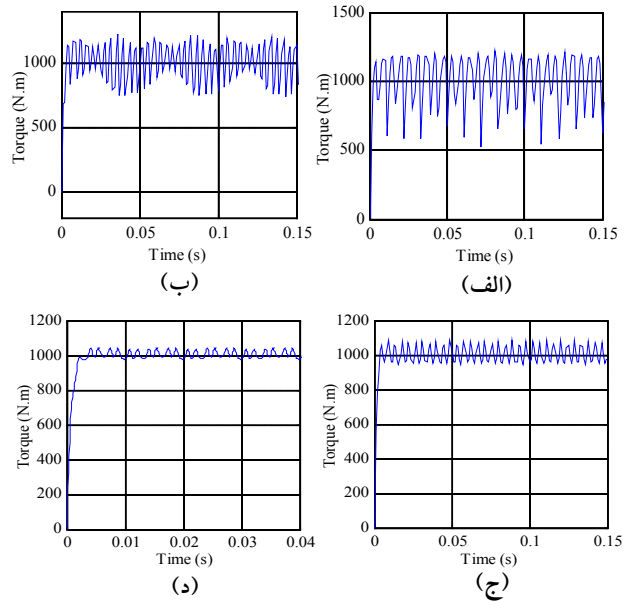
شکل (۱۱): طیف هارمونیکی منحنی چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی: الف. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول؛ ب. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول؛ ج. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی؛ د. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی

شکل (۱۳): شکل موج گشتاور دندانه‌ای: الف. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول؛ ب. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول؛ ج. ژنراتور با سیم‌پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی؛ د. ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی

ریبل گشتاور کمتری در مقایسه با طرح (الف) است. عیب اصلی این طرح، کیفیت ولتاژ پایین در مقایسه با طرح (الف) است.

**طرح ج:** ژنراتور این طرح بر اساس آهنربای سطحی پیشنهادی و سیم پیچی توزیع شده طراحی شده است. این ژنراتور در مقایسه با دو طرح (الف و ب) که با آهنربای متداول اجرا شده‌اند، راندمان کمتر، حجم کلی و هزینه ساخت بیشتری دارد که در جدول (۳) ارائه شده است. ولی در بخش شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که با ارائه طرح پیشنهادی برای آهنربای سطحی، منحنی چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی سینوسی شده که منجر به تضعیف طیف وسیعی از هارمونیک‌های فضایی شده است. همین امر باعث تضعیف گشتاورهای مزاحم و بهبود نوسانات گشتاور در مقایسه با دو طرح قبلی شده که در شکل (۱۴ ج) به وضوح قابل مشاهده است. از طرف دیگر با مراجعه به شکل (۱۲ ج) مشاهده می‌شود که منجر به بهبود کیفیت ولتاژ القایی با اعوجاج هارمونیک کل ۱/۳۶٪ شده است. همچنین گشتاور دندان‌های در مقایسه با طرح‌های پیشین به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته که همین امر نیز یکی از دلایل کاهش نوسانات گشتاور است.

**طرح د:** ژنراتور این طرح با آهنربای سطحی پیشنهادی و سیم پیچی متمرکز اجرا شده است. همان طور که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد، این طرح دارای راندمان بیشتر، حجم کلی و هزینه ساخت کمتری در مقایسه با طرح‌های قبلی است. طبق فرضیه ۵ بخش (۳) که  $B_{gl} = B_{mg}$  فرض شده و در بخش شبیه‌سازی نیز اثبات شده است، در واقع  $B_{gl}$  نسبت به طرح (الف و ب) به اندازه  $\frac{4}{\pi}$  برابر کمتر شده که در نهایت منجر به کاهش ابعاد، حجم کلی و هزینه ساخت ژنراتور نیز می‌شود. از طرف دیگر چون سیم‌بندی به صورت متمرکز اجرا شده به دلیل کاهش طول پیشانی کلاف، مقاومت الکتریکی و تلفات مسی کاهش یافته و راندمان نیز بیشتر شده است. همچنین به دلیل کاهش مقاومت الکتریکی، افت ولتاژ داخلی ژنراتور کمتر شده و در نتیجه ضریب  $k_e$  (نسبت ولتاژ ترمینال به ولتاژ القایی) به یک نزدیک‌تر شده و طبق رابطه (۸) ابعاد ژنراتور کمتر خواهد شد. همان طور که در بخش شبیه‌سازی ارائه شده، این طرح دارای گشتاور دندان‌های بسیار کمتری (۰/۸۵ نیوتون‌متر) نسبت به طرح‌های پیشین است. همچنین نوسانات گشتاور آن به حداقل مقدار ۶/۷۲٪ کاهش یافته است. کیفیت ولتاژ این طرح با اعوجاج هارمونیک کل ۴/۱۷ درصد، نسبت به طرح (ج) مقدار ناچیزی کاهش یافته ولی با توجه به ویژگی‌های خوب آن از نظر راندمان، هزینه ساخت، گشتاور دندان‌های و نوسانات



شکل (۱۴): منحنی گشتاور محور: الف. ژنراتور با سیم پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول؛ ب. ژنراتور با سیم پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول؛ ج. ژنراتور با سیم پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی پیشنهادی؛ د. ژنراتور با سیم پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی

### ۳.۳. مقایسه طرح‌های ارائه شده

در این بخش، بحث و مقایسه بین طرح‌های ارائه شده برای ژنراتور از جهات مختلف ارائه شده است. هریک از طرح‌ها به طور جداگانه طبق موارد زیر مورد بحث قرار گرفته‌اند:

**طرح الف:** این طرح با سیم پیچی توزیع شده و آهنربای سطحی متداول انجام است. با مراجعه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که دارای کمترین راندمان و بیشترین حجم کلی و هزینه ساخت در مقایسه با طرح‌های دیگر است. همچنین با مراجعه به بخش شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که دارای بیشترین نوسانات گشتاور و گشتاور دندان‌های نیز می‌باشد. تنها مزیت آن کیفیت ولتاژ القایی بهتر در مقایسه با ژنراتور طرح (ب) یعنی ژنراتور با سیم پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول خواهد بود. همچنین در مقایسه با سیم پیچی متمرکز احتمال خط‌پذیری بیشتری دارد.

**طرح ب:** ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی در این طرح با سیم پیچی متمرکز و آهنربای سطحی متداول اجرا شده است. در جدول (۳) مشاهده می‌شود که این طرح در مقایسه با طرح (الف) راندمان بیشتری دارد که علت اصلی آن کاهش طول پیشانی کلاف و تلفات مسی است. همچنین دارای حجم کلی و هزینه ساخت کمتری نسبت به طرح (الف) است. از طرف دیگر با مراجعه به بخش شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که دارای گشتاور دندان‌های و

بوده است که ژنراتور بهینه‌شده در مقایسه با نمونه واقعی دارای راندمان بیشتر، حجم کلی کمتر، کیفیت ولتاژ بهتر و گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور کمتری خواهد بود. البته در مرجع [۵] برای بهبود کیفیت ولتاژ و نوسانات گشتاور به صورت تک‌منظوره چندین بهینه‌سازی انجام شده است که در تمام حالات نتایج ژنراتور بهینه‌شده طرح (د) دارای برتری می‌باشد.

گشتاور، بسیار مناسب برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده است. همچنین به منظور تأیید صحت و اعتبار طراحی انجام‌شده، در جدول (۴)، نتایج این طرح با پارامترهای یک نمونه ژنراتور واقعی آهنربای دائم با رتور خارجی و سیم‌پیچی متمرکز مقایسه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، ویژگی مناسب طرح پیشنهادی برای آهنربای سطحی و روند طراحی به‌گونه‌ای

جدول (۴): مقایسه نتایج بهینه‌سازی طرح (د) و یک نمونه ژنراتور واقعی

پارامتر	واحد	ژنراتور بهینه‌شده طرح (د)	ژنراتور واقعی در [۵]
توان نامی	وات	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰
سرعت نامی محور ژنراتور	دور بر دقیقه	۱۵۰	۱۵۰
ولتاژ نامی	ولت	۴۰۰	۴۰۰
فرکانس نامی	هرتز	۵۰	۵۰
راندمان	-	۹۵	۹۴/۴
حجم کلی	سانتی‌متر مکعب	۲۸۲۷۴	۳۳۵۴۱
THD و ولتاژ القایی	-	۴/۱۷	۱۳/۶۷
گشتاور دندانه‌ای	نیوتن‌متر	۰/۸۵	۱۳۰
نوسانات گشتاور	درصد	۶/۷۲	۴۱
قطر خارجی ژنراتور	میلی‌متر	۶۴۷/۹۴	۶۵۳/۵
قطر خارجی استاتور	میلی‌متر	۶۱۲/۵	۶۲۳
طول ژنراتور	میلی‌متر	۸۵/۷۵	۱۰۰

بررسی بیشتر، چهار طرح پیشنهادی از نظر راندمان، حجم کلی، هزینه ساخت، گشتاور دندانه‌ای و ریبیل گشتاور با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نتیجه حاصل شده است که ژنراتور با سیم‌پیچی متمرکز و آهنربای سطحی پیشنهادی دارای راندمان بیشتر، حجم کلی، هزینه ساخت، گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور کمتری نسبت به سایر طرح‌ها می‌باشد. از طرف دیگر با مقایسه انجام‌شده بین پارامترهای این ژنراتور و یک نمونه ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی با آهنربای سطحی واقعی، برتری ژنراتور بهینه‌شده در این مقاله از نظر راندمان، حجم کلی، گشتاور دندانه‌ای و نوسانات گشتاور مشهود است.

### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره‌های BNUT/390066/400 و BNUT/370509/400 و BNUT/370199/400 بسیار سپاسگزاری می‌کنند.

### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی هزینه ساخت یک ژنراتور سنکرون آهنربای دائم رتور خارجی ۱۵ کیلووات بر اساس چهار طرح مختلف انجام شده است. نوآوری این پژوهش ارائه ابعادی جدید برای ماده آهنربا دائم است که منجر به سیم‌پیچی شدن چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی می‌شود. دو طرح اول بر اساس آهنربای سطحی متداول (مستطیلی) با سیم‌پیچی توزیع‌شده و متمرکز است. دو طرح بعدی نیز طبق ابعاد پیشنهادی برای آهنربای سطحی با سیم‌پیچی توزیع‌شده و متمرکز بوده که منجر به سیم‌پیچی شدن منحنی توزیع چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی می‌شود. به‌منظور انجام بهینه‌سازی، ابتدا با استخراج روابط طراحی یک مدل کلی از ژنراتور و توربین بادی بدون جعبه‌دنده ارائه شد. سپس با مشخص کردن متغیرهای طراحی و در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، بهینه‌سازی طرح‌های پیشنهادی صورت گرفته است. همچنین از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ماکسول برای اعتبارسنجی طرح‌های پیشنهادی و استخراج پارامترهای مورد نیاز استفاده شده است. در پایان برای مطالعه و

- [1] Chen, Y., Pillay, P. and A. Khan, "PM wind generator topologies", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 41, No. 6, pp. 1619-1626, Nov-Dec. 2005.
- [2] Li, H. and Chen, Z., "Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems", Renewable Energy, Vol. 34, No. 4, pp. 1175-1184, April 2009.
- [3] Chen, J., Nayar, C. V. and Xu, L., "Design and finite-element analysis of an outer-rotor permanent-magnet generator for directly coupled wind turbines", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3802-3809, September 2000.
- [4] Polinder, H., Pijl, F., Vilder, G. and Tavner, P., "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 3, pp. 725-733, September 2006.
- [5] Potgieter, J. H. J. and Kamper, M. J., "Torque and voltage quality in design optimization of low-cost non-overlap single layer winding permanent magnet wind generator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 5, pp. 2147-2156, May 2012.
- [6] Lee, S., Kim, Y., Lee, K. and Kim, S., "Multiobjective optimization design of small-scale wind power generator with outer rotor based on box-behken design", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 4, pp. 605-609, Jun. 2016.
- [7] McDonald A. and Bhuiyan, N., "On the optimization of generators for offshore direct drive wind turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 32, No. 1, pp. 348-358, March 2017.
- [8] Öztürk, N., Dalcal, A., Çelik E. and Sakar, S., "Cogging Torque Reduction by Optimal Design of PM Synchronous Generator for Wind Turbines", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 28, pp. 17593-17600, Jul. 2017.
- [9] Puri, V., Chauhan, Y. K. and Singh, N., "A comparative design study and analysis of inner and outer rotor permanent magnet synchronous machine for power generation in vertical axis wind turbine using GSA and GSA-PSO", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 23, pp. 136-148, October 2017.
- [10] Bazzo, T. P. M., Kolzer, J. F., Carlson, R., Wurtz, F. and Gerbaud, L., "Multiphysics design optimization of a permanent magnet synchronous generator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 12, pp. 9815 - 9823, December 2017.
- [11] Yizhou, H., Huangqiu. Z. and Ying X., "Multi-Objective optimization design of bearingless permanent magnet synchronous generator", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 30, No. 4, June 2020.
- [12] Hua, Y., Zhu, H., Lee, K. and Xu, Y., "Multi-Objective optimization design of bearingless permanent magnet synchronous generator", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 30, No. 4, 5201250, Jan. 2020.
- [13] Prashanth, N. A., "Flux maximization in wind turbine permanent magnet synchronous generator made of ndfeb permanent magnets", Materials Today: Proceedings, Vol. 42, No. 28, pp. 731-737, May. 2021.
- [14] Gieras, J. F., "Permanent magnet motor technology, design and applications", 3rd edition. New York: CRC Press.
- [15] Tapia, J., Pyrhönen, J., Puranen, J., Lindh, P. and Nyman, S., "Optimal design of large permanent magnet synchronous generators", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 1, pp. 642-650, January 2013.
- [16] Khan, A. and Pillay, P., "Design of a PM wind, optimized for energy capture over a wide operating range", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, pp. 1501-1506, May 2005.
- [17] Pyrhönen, J., Jokinen, T. and Hrabovcová, V., "Design of rotating electrical machines", 1st edition, U.K: Wiley, 2009.
- [18] Ahsanullah, K., Dutta, R. and Rahmam, M. F., "Analysis of low-speed ipmms with distributed and fractional slot concentrated windings for wind energy applications", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, No. 11, pp. 1-11, Nov. 2017.
- [19] Yokoi, Y., Higuchi, T. and Miyamoto, T., "General formulation of winding factor for fractional-slot concentrated winding design", IET Electric Power Applications, Vol. 10, No. 4, pp. 1-9, April 2016.
- [20] Bianchi, N., Bolognani, S. and Frare, P., "Design criteria for high-efficiency spm synchronous motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, pp. 396-404, Jun. 2006.
- [21] Bazzo, T. P. M., Kolzer, J. F., Carlson R., Wurtz, F. and Gerbaud, L., "Multidisciplinary Design Optimization of direct-drive PMSG considering the site wind profile", Electric Power System Research, Vol. 141, pp. 467-475, Dec. 2016.
- [22] Pirkandi J., Mashhadi, M. and Nosratelahi, M., "Simulation and analysis of wind turbine configurations in wind farm by using CFD", Energy Engineering & Management, Vol. 5, No. 4, pp. 50-61, 2016.

- [23] Atashgar, K. and Abbasi, L., "*Wind turbine power curve modeling using parametric approach*", Energy Engineering & Management, Vol. 10, No, 3, pp. 70-77, 2020.