

بهینه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور با روش تاگوچی بهبودیافته

م‌حمدعلی توکلی^۱، دانشجوی دکتری؛ مهدی معلم^۲، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - m.tavakkoli@ec.iut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - moallem@cc.iut.ac.ir

چکیده: روش بهینه‌سازی تاگوچی، روشی مبتنی بر آرایه‌های متعامد است و روش منظم و کارآمدی را برای بهینه‌سازی سیستم‌های دارای متغیرهای متعدد، ارائه می‌کند. در این مقاله، روش تاگوچی بهبودیافته، به منظور بهینه‌سازی سیستم‌های الکترومغناطیسی ارائه گردیده و سپس، برای بهینه‌سازی مشخصه گشتاور تولیدی موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور، با استفاده از روش اجزاء محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ارائه شده، ابتدا متغیرهای وابسته و یا متغیرهایی که دارای وابستگی به سایر متغیرها هستند را مشخص کرده و از این اطلاعات، برای افزایش دقت روش تاگوچی استفاده می‌کند. در این روش، از جدول پاسخ‌ها به طور مؤثری جهت یافتن مقادیر بهینه متغیرها استفاده می‌شود. سرعت این روش، نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک، در مسائل دارای تعداد متغیرهای کم، بیش تر است. نتایج به دست آمده، مؤید کارایی این روش، در بهینه‌سازی مسائل چندمتغیره است.

واژه‌های کلیدی: روش تاگوچی، بهینه‌سازی، موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور.

Optimization of Double Stator Switched Reluctance Motor using Improved Taguchi's Method

M. A Tavakkoli¹, PhD Student; M. Moallem², Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: m.tavakkoli@ec.iut.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: moallem@cc.iut.ac.ir

Abstract: Taguchi's method is an effective multi-variable optimization method based on orthogonal array concept which offers a systematic and efficient optimization process. In this paper, an improved Taguchi's method for shape optimization of electromagnetic devices is developed and applied to torque profile optimization of Double Stator Switched Reluctance Motor (DSSRM) using Finite Element Analysis (FEA). The proposed method determines parameters which are dependent or have nonlinear effect on the system operation, and uses this information in the optimization process to increase the precision of Taguchi method. This research uses the response table efficiently to obtain the optimum parameter levels. Simulation results show the efficiency and accuracy of the proposed method for optimization of multi variable problems.

Keywords: Taguchi's method, optimization, double stator switched reluctance motor.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰ و ۱۳۹۴/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۱۱

نام نویسنده مسئول: مهدی معلم

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - خمینی‌شهر - بلوار دانشگاه - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

پایان، در بخش ششم، روش ارائه شده، برای بهینه‌سازی یک موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور استفاده می‌گردد.

۲- آرایه‌های متعامد

آرایه‌های متعامد [۱۴] که نقش مهمی در روش تاگوچی ایفا می‌کنند، در دهه ۱۹۴۰ معرفی گردیده و در طراحی آزمایش‌ها، مورد استفاده قرار گرفتند. آرایه‌های متعامد، وسیله‌ای مؤثر، در یافتن مقادیر بهینه سیستم‌ها با استفاده از تعداد کمی آزمایش، ارائه می‌کنند. این بخش، به اختصار به بررسی آرایه‌های متعامد می‌پردازد.

۲-۱- تعریف آرایه‌های متعامد

مجموعه S را مجموعه‌ای از اعداد متفاوت در نظر بگیرید. ماتریس A که ماتریسی دارای N ردیف و K ستون متشکل از عناصر مجموعه S است یک آرایه متعامد با s سطح و توان $(0 \leq t \leq k)$ نامیده می‌شود اگر هر زیر آرایه با ابعاد $N \times t$ دقیقاً به تعداد مشخصی به عنوان یک سطر دیده شود [۱۴]. این مسئله، سبب ایجاد نوعی تعادل در آزمایش‌ها و در نظر گرفتن اثر متغیرها بر روی یکدیگر می‌گردد. آرایه متعامد، به صورت $OA(N, k, s, t)$ نشان داده می‌شود. در این عبارت، N تعداد سطر، K تعداد ستون، s تعداد مقادیری که هر متغیر به خود اختصاص می‌دهد و t ، توان آرایه متعامد است.

جدول ۱: آرایه متعامد $OA(12, 11, 2, 2)$

شماره آزمایش	ستون‌ها										
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲
۴	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲
۵	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۲	۱
۶	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱
۷	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۸	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲
۹	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱
۱۰	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۲
۱۱	۲	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۲
۱۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۱

در جدول ۱، آرایه متعامد $OA(12, 11, 2, 2)$ که دارای ۱۲ سطر، ۱۱ ستون، ۲ مقدار یا سطح برای هر متغیر و توان ۲ است، نشان داده شده است. هر المان آرایه از مجموعه $S = \{1, 2\}$ انتخاب می‌گردد. بنابراین، آرایه مورد بررسی، دارای ۲ سطح است. چهار ترکیب $(2, 2)$ ، $(2, 1)$ ، $(1, 2)$ ، $(1, 1)$ می‌توانند به عنوان یک سطر در آرایه دیده شوند.

یکی از روش‌های شناخته شده برای بهینه‌سازی، روش سعی و خطا و آزمون همه ترکیب‌های ممکن برای متغیرهای موجود، است. این روش، فرایندی ساده ولی غیرعملی، برای مسائل دارای متغیرهای زیاد است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی که برای غلبه بر این مشکل و حصول نتایج با دقت قابل قبول ارائه گردید، روش بهینه‌سازی تاگوچی است. این روش، مبتنی بر آرایه‌های متعامد بوده و به همین دلیل، تعداد آزمون‌های لازم، جهت نیل به مقادیر بهینه متغیرها را کاهش می‌دهد [۱].

علی‌رغم استفاده گسترده این روش در رشته‌ها و گرایش‌های مختلف مهندسی، مانند مهندسی شیمی، مهندسی مکانیک و الکترونیک قدرت [۵-۲] در زمینه بهینه‌سازی طرح سیستم‌های الکترومغناطیسی، روش شناخته شده‌ای نیست هرچند که در زمینه طراحی جاذب‌ها [۸-۶] دایپلکسرها [۹] و بهینه‌سازی متغیرهای مدار میکروویو [۱۰] در مواردی استفاده شده است.

بهبود عملکرد موتورهای الکتریکی، با استفاده از بهبود طراحی آن‌ها همواره مورد توجه مهندسين بوده است. در این زمینه، روش‌های الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی بیشتر از سایر روش‌ها، برای بهینه‌سازی طراحی موتورهای الکتریکی استفاده شده‌اند. از روش تاگوچی نیز در مواردی به طور مؤثر استفاده شده است. به طور مثال، در [۱۱]، از روش تاگوچی، جهت بهینه‌سازی شکل موانع عبور شار در موتور سنکرون آهنربای داخلی، به منظور جلوگیری از عبور شار از پل بین دو آهنربای دائم استفاده شده است. تغییرات پیشنهادی مقاله ذکر شده به منظور مناسب‌سازی روش تاگوچی برای مسائل دارای چند تابع هدف است. در [۱۲]، از روش تاگوچی به همراه روش سطح پاسخ به منظور بهبود مشخصه عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم سطحی با کاهش ریبیل گشتاور و کاهش ولتاژ القایی در استاتور استفاده شده است. مقاله یاد شده، در نهایت با استفاده از نتایج بهینه‌سازی، رابطه‌ای تحلیلی بین متغیرها و مقادیر ریبیل گشتاور، گشتاور متوسط و ولتاژ القایی در استاتور به دست آورده است. در [۱۲] نیز با یک مسئله دارای چند تابع هدف مواجه هستیم. مؤلفین در [۱۳] با استفاده از روش تاگوچی، سعی در افزایش بازده و کاهش ریبیل گشتاور موتور جریان مستقیم بدون جاروبک سرعت بالا کرده‌اند و نتیجه به دست آمده، تأثیر قابل توجه بهینه‌سازی با روش تاگوچی را نشان می‌دهد. در این مقاله، روش تاگوچی با دقت بالاتری به منظور کاهش ریبیل گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور، ارائه می‌گردد. مراحل روش ارائه شده در طی بهینه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور نشان داده می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش ارائه شده روشی مؤثر به منظور استفاده بیشتر از روش تاگوچی است.

در ادامه، در بخش دوم، آرایه‌های متعامد توصیف می‌شوند. در بخش سوم، روش معمول تاگوچی برای مسائل بهینه‌سازی توضیح داده شده است. در بخش چهارم، روش ارائه شده، معرفی و بررسی می‌گردد. در بخش پنجم، روش معمول تاگوچی با روش ارائه شده مقایسه گردیده و در

روش‌های مختلفی برای ساخت آرایه‌های متعامد وجود دارد. امروزه، آرایه‌های متعامد با تعداد متغیرها، توان و سطوح مختلف در برخی مراجع موجود و قابل استفاده است [۱۶].

۳- روش بهینه‌سازی تاگوچی

در این بخش، روش معمول بهینه‌سازی به روش تاگوچی به اختصار، در شکل ۱ توضیح داده می‌شود.

۳-۱- تعیین متغیرهای مؤثر بر مشخصه سیستم و تعیین سطوح مناسب برای هر متغیر

در همه روش‌های بهینه‌سازی، گام اول، تعیین متغیرهای مناسب، جهت شروع فرایند بهینه‌سازی است. این متغیرها و سطوح انتخابی آن‌ها گاهی بر اساس تجربه و اطلاعات قبلی طراح تعیین می‌گردند و گاهی، اطمینان از قرار گرفتن مقادیر بهینه، در حوزه موردبررسی، به حد کافی، وسیع در نظر گرفته می‌شوند.

۳-۲- انتخاب آرایه‌های متعامد مناسب

با توجه به تعداد متغیرها و تعداد سطوح انتخابی برای آن‌ها، جدول تاگوچی مناسبی انتخاب می‌گردد. در صورتی که تعداد متغیرهای انتخابی و سطوح در نظر گرفته‌شده برای آن‌ها با هیچیک از جداول تاگوچی مطابق نباشد، با تعریف تعدادی متغیر جعلی که عملاً تأثیری در رفتار سیستم ندارند، می‌توان از جدول تاگوچی مناسب استفاده نمود. منظور از متغیر جعلی، متغیری است که برای بهبود رفتار سیستم به آن نیازی نیست و یا اثر آن بر رفتار سیستم مشخص است و نیازی به در نظر گرفتن آن برای فرایند بهینه‌سازی نیست ولی به دلیل اینکه تعداد متغیرهای تعیین‌شده جهت بهینه‌سازی با هیچیک از جداول تاگوچی تطابق ندارد ناگزیر به افزایش متغیرها هستیم. افزودن یک متغیر دیگر به متغیرهای فعلی، هرچند که آن متغیر نیازی به بهینه‌سازی نداشته باشد، می‌تواند امکان استفاده از یکی از جداول تاگوچی را فراهم کند. جداول تاگوچی، به‌راحتی از مراجع اینترنتی قابل دریافت هستند [۱۷].

۳-۳- انجام آزمایش‌ها

پس از انتخاب جدول تاگوچی مناسب، آزمایش‌ها باید انجام گیرند. انجام یک آزمایش یا با استفاده از روابط تحلیلی توصیف‌کننده رفتار سیستم و یا با استفاده از یک نرم‌افزار شبیه‌سازی انجام می‌گیرند. در این مقاله، از روش اجزاء محدود، برای انجام آزمایش‌ها استفاده می‌شود.

۳-۴- انتخاب بهترین آزمایش

پس از انجام آزمایش‌ها، ارزیابی تابع هدف F و انتخاب بهترین آزمایش، امکان‌پذیر است. در این مرحله، مقادیر تابع هدف، جهت انتخاب مقادیر بهینه متغیرها کفایت می‌کند. سطوح متغیرها مطابق

با دقت در آرایه موردنظر، دیده می‌شود که هر ترکیب، به تعداد ۳ مرتبه، در سطوح هر زیر آرایه دو ستونی دیده می‌شود. این آرایه، دارای ۱۱ متغیر به‌منظور بهینه‌سازی است. و مقادیر ۱ و ۲ در طول فرایند بهینه‌سازی، می‌تواند برای هر متغیر، در نظر گرفته شود. به‌طور مثال، سطر ششم، نشان می‌دهد که متغیرهای ۱، ۵، ۸، ۱۰ و ۱۱ دارای سطح ۱ و متغیرهای ۲، ۳، ۴، ۶، ۷ و ۹ دارای سطح ۲ هستند.

هر سطر، یک ترکیب ممکن از سطوح انتخابی برای متغیرها را نشان می‌دهد و به‌عنوان یک آزمایش، در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، حاصل این آزمایش‌ها، امکان مقایسه و انتخاب متغیرهای بهینه را فراهم می‌کند.

۲-۲- برخی مشخصات آرایه‌های متعامد

آرایه متعامد جدول ۱ نشان می‌دهد که فقط ۱۲ آزمایش برای به دست آوردن سطوح بهینه متغیرها موردنیاز است، برخلاف دقیق‌ترین روش بهینه‌سازی، که بررسی کامل $2^{11}=2048$ ترکیب ممکن بوده و عملی نیست. پس از اجرای آزمایش‌ها و تحلیل نتایج، مقادیر بهینه متغیرها به دست می‌آیند. در علم آمار اثبات می‌شود که اگرچه تعداد آزمایش‌ها، در روش تاگوچی، به‌شدت کاهش می‌یابد ولی مقادیر بهینه به‌دست‌آمده از این روش، به مقادیر بهینه به‌دست‌آمده از آزمایش تمام ترکیب‌های ممکن، بسیار نزدیک است. در تعیین آزمایش‌ها برای مسائل بهینه‌سازی، ایجاد نوعی تعادل در سطوح انتخابی برای انتخاب متغیرهای مختلف باید موردتوجه ویژه قرار گیرد و این به دلیل در نظر گرفتن تأثیرات متغیرهای مختلف، بر روی یکدیگر است.

برای مثال، در جدول ۱، در ستون چهارم، متغیر ۴، شش مرتبه دارای سطح ۱ و شش مرتبه دارای سطح ۲ است. همچنین، هنگامی که متغیری دارای سطحی است، متغیرهای دیگر، همه سطوح دیگر را تجربه می‌کنند. برای مثال، هنگامی که متغیر ۷ دارای سطح ۲ است، متغیر ۹ در سطوح ۴، ۷ و ۸ دارای سطح ۱ و در سطوح ۲، ۶ و ۱۲ دارای سطح ۲ است. همچنین، همه ترکیب‌های ممکن حداکثر t متغیر، به تعداد یکسانی وجود خواهند داشت و این خاصیت، سبب ایجاد نوعی تعادل، به‌منظور بررسی همه متغیرها و مقادیر مختلف آن‌ها حین فرایند بهینه‌سازی است. بنابراین، آرایه‌های متعامد، نه‌تنها تأثیر هر متغیر را به‌تنهایی بررسی می‌کند، بلکه اثرات متقابل متغیرها بر یکدیگر را نیز در نظر می‌گیرد. خاصیت دیگر آرایه‌های متعامد که دارای اهمیت بسیار زیادی است این است که در صورت حذف ستون‌هایی از آرایه متعامد، آن آرایه، همچنان یک آرایه متعامد باقی می‌ماند.

متغیرهای یک آرایه متعامد، باید در نامساوی‌های زیر صدق کند [۱۵]:

$$N \geq \sum_{i=0}^u \binom{K}{i} (s-1)^i \quad \text{if } t=2u+1, \quad u \geq 0 \quad (1)$$

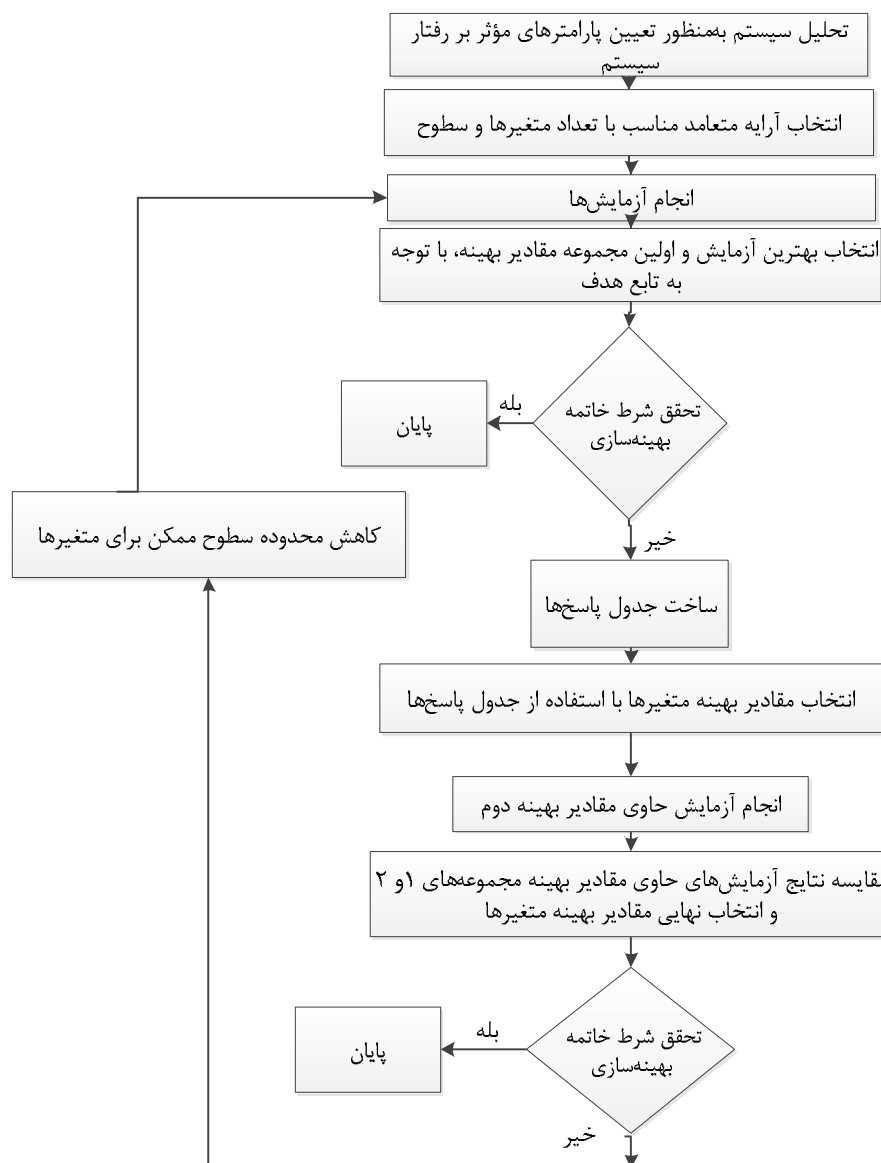
$$N \geq \sum_{i=0}^u \binom{K}{i} (s-1)^i + \binom{K-1}{U} (s-1)^{u+1} \quad (2)$$

می‌گردند. به‌طور مثال، برای متغیر ۱ و سطح ۲، مقادیر تابع هدف مربوط به آزمایش‌هایی که در آن‌ها، متغیر ۱ دارای سطح ۲ است محاسبه می‌گردد. در پایان، سطوحی که مطلوب‌ترین مقدار تابع هدف را سبب می‌شوند، به‌عنوان بهترین سطوح در این مرحله انتخاب شده و در این مقاله، مقادیر بهینه شماره ۲ نامیده می‌شوند. از طرف دیگر، در بخش ۳-۴، گروه دیگری از سطوح متغیرها، به‌عنوان مجموعه شماره ۱ تعیین گردیدند. بنابراین، هر دو گروه، کاندیدای مقادیر بهینه نهایی هستند. با انجام آزمایشی که سطوح متغیرها در آن مطابق با مجموعه شماره ۲ هستند و مقایسه نتیجه آن با نتیجه آزمایش متعلق به مجموعه شماره ۱، یکی از دو مجموعه، به‌عنوان مقادیر بهینه نهایی انتخاب می‌گردند.

با آنچه در بهترین آزمایش وجود دارد، به‌عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله، این مقادیر بهینه، مجموعه شماره ۱ نامیده می‌شوند.

۳-۵- ساخت جدول پاسخ‌ها

پس از گام چهارم، در صورتی که شرط تعیین‌شده برای اتمام فرایند بهینه‌سازی، محقق نشده باشد و تابع هدف، به مقدار قابل قبولی میل نکرده باشد، گام پنجم برداشته شده و جدول پاسخ‌ها تشکیل می‌شود. هر عنصر جدول پاسخ، به یک متغیر و یک سطح تعلق دارد. به‌طور مثال، یک مسئله با x متغیر، در حالی که هر متغیر دارای y سطح باشد، جدول پاسخی با تعداد $x \times y$ عنصر خواهد داشت. همه عناصر جدول، با متوسط‌گیری از مقادیر تابع هدف به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها تعیین



شکل ۱: فلوچارت روش تاگوچی معمول

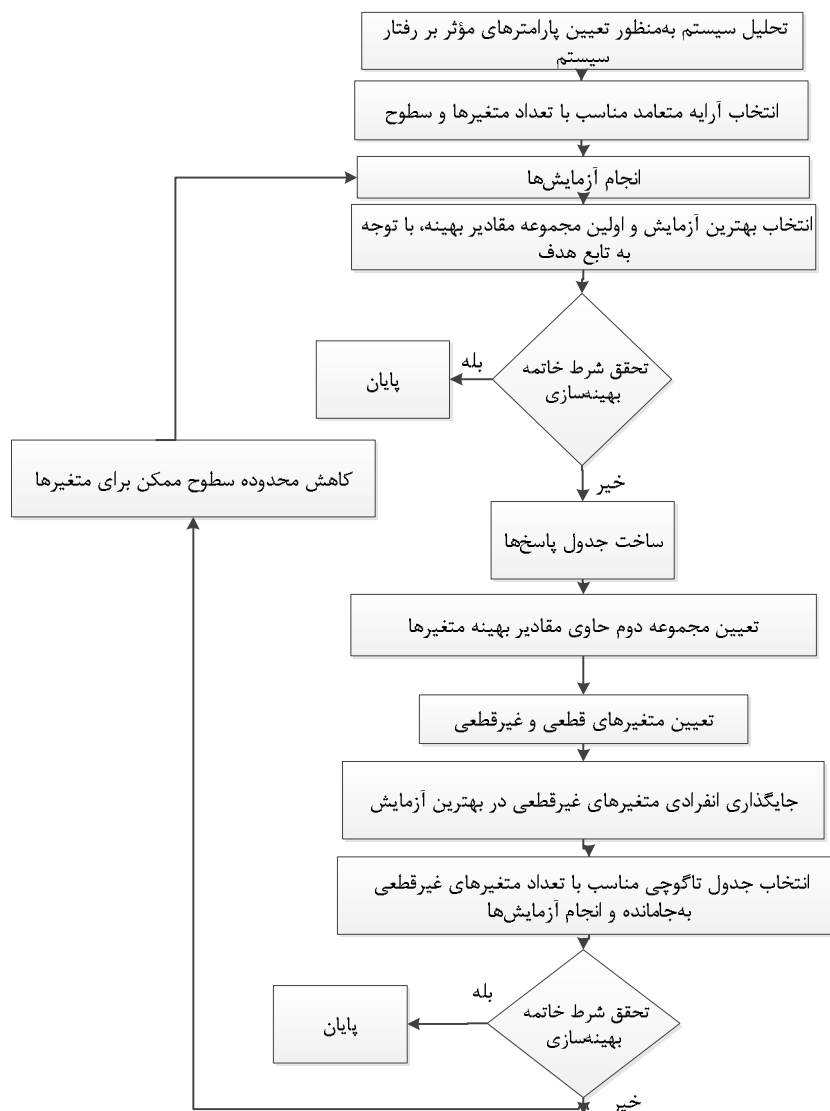
۴- راهکار ارائه شده به منظور بهبود روش تاگوچی

روش ارائه شده در این مقاله، به منظور افزایش دقت روش تاگوچی، در شکل ۲ دیده می شود. در این روش، مراحل ۱ تا ۵ روش تاگوچی دقیقاً تکرار می شود ولی در ادامه، مراحل دیگری نیز انجام می پذیرد. با مقایسه مجموعه ۱ و ۲ احتمالاً تعدادی از متغیرهای یکسان، سطوح یکسانی را خواهند داشت. این متغیرها را متغیرهای قطعی و متغیرهای دیگر را غیرقطعی می نامیم. دلیل این نام گذاری این است که از دو مسیر مختلف، یکی آزمایش ها و دیگری میانگین گیری از مقادیر به دست آمده از آزمایش ها، سطوح یکسانی برای این متغیرها به دست آورده ایم. متغیرهای قطعی از فرایند بهینه سازی خارج می شوند. در بخش بعدی، گام ششم، فرایند جایگذاری توضیح داده می شود.

۴-۱- جایگذاری متغیرهای غیرقطعی در آزمایش دارای بهترین مقدار آزمایشی که دارای بهترین نتیجه در بین آزمایش های انجام شده است، یکی از آزمایش های ممکن برای بررسی همه ترکیب های متغیرهای

مختلف است. بنابراین، ممکن است ترکیب دیگری از متغیرها وجود داشته باشد که دارای نتیجه بهتری در مقایسه با بهترین آزمایش موجود کنونی باشد. یکی از این ترکیب های مناسب تر، ممکن است ترکیب مربوط به بهترین آزمایش، درحالی که متغیرهای غیرقطعی آن مطابق با مجموعه ۲ جایگذاری شده است باشد. به دلیل اینکه میانگین گیری از نتایج به دست آمده، مبنای انتخاب مجموعه ۲ بوده است، ماهیت آماری این فرایند، احتمال انتخاب مقادیر بهینه برای متغیرها را افزایش می دهد. متغیرهای قطعی تعیین تکلیف شده از فرایند خارج شده اند و تنها متغیرهای غیرقطعی، مورد بررسی مجدد قرار می گیرند.

به منظور جلوگیری از برهم کنش متغیرها، فرایند جایگذاری متغیرهای غیرقطعی از مجموعه دوم در بهترین آزمایش، به صورت انفرادی انجام می گیرد. در صورتی که متغیر جایگذاری شده، نتیجه ای بهتر از متغیر قبلی را سبب نشود، این متغیر را نیز قطعی نامیده و در بهترین آزمایش، تثبیت می نماییم. متغیرهای غیرقطعی دیگر هم به همین صورت جایگذاری می شوند.



شکل ۲: فلوچارت روش تاگوچی بهبود یافته

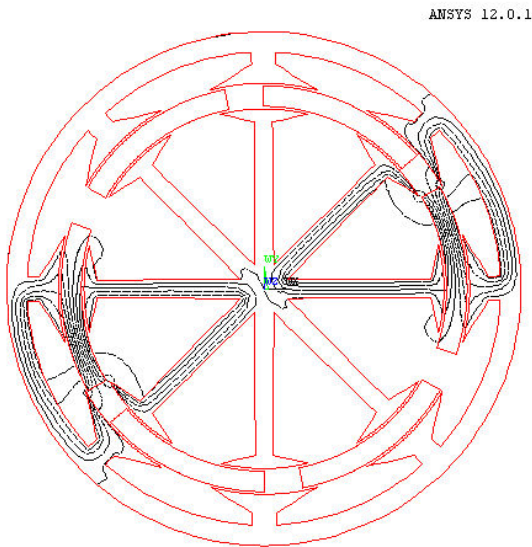
ارائه‌شده بهینه‌سازی می‌گردد و نتایج حاصل‌شده با روش تاگوچی معمول مقایسه می‌گردند.

در شکل ۴، P_i شعاع دایره λ_m و θ_i زاویه بین مرکز دایره λ_m و خط مقطع افق است. در این مقاله، ریپل گشتاور، مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

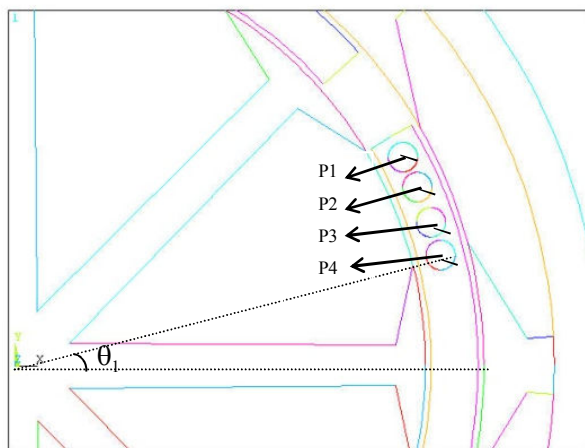
$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \quad (3)$$

تابع هدف به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$F = \frac{T_{av}}{T_{max} - T_{min}} \times P \quad (4)$$



شکل ۳: موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور و نمایش خطوط شار [۱۴]



شکل ۴: متغیرهای در نظر گرفته‌شده به‌منظور بهینه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور

$$P(\text{penalty factor}) = \begin{cases} 0 & T_{av} < 17.7 \\ 1 & T_{av} \geq 17.7 \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه (۵) مقدار 17.7 به‌عنوان مقدار مرزی تابع جریمه تعریف گردید و این به دلیل در نظر گرفتن حداکثر ۲ درصد کاهش متوسط

۲-۴- انتخاب آرایه متعامد برای متغیرهای غیرقطعی باقی‌مانده

در این قسمت، متغیرهای غیرقطعی، با استفاده از جدول تاگوچی دیگری که مناسب آن‌ها انتخاب شده است، بهینه‌سازی می‌شوند. در صورتی که تعداد متغیرهای به‌جای‌مانده، اندک باشند، همه ترکیب‌های ممکن را آزمایش می‌کنیم.

فرایند بهینه‌سازی، تا جایی که شرط اتمام بهینه‌سازی برآورده شود ادامه می‌یابد.

۵- تفاوت‌های بین روش تاگوچی معمول و روش ارائه‌شده

در روش تاگوچی معمول، درنهایت، سطوح متغیرهای موجود در مجموعه‌های ۱ و ۲ در بهترین آزمایش جایگذاری شده و هرکدام از دو مجموعه که نتیجه بهتری را به همراه داشته باشد، به‌عنوان مجموعه حاوی مقادیر بهینه، در نظر گرفته می‌شود. در روش ارائه‌شده، متغیرها به دودسته متغیرهای قطعی و غیرقطعی تقسیم می‌شوند. متغیرهای قطعی، تعیین شده و از فرایند بهینه‌سازی خارج می‌گردند. در صورتی که متغیرهای غیرقطعی، با دقت بیشتری بررسی می‌گردند و همین موضوع تفاوت روش ارائه‌شده با روش تاگوچی معمول است. از آنجایی که روش ارائه‌شده، از روش تاگوچی استفاده می‌نماید، نیازی به اثبات همگرایی به سمت نقطه بهینه وجود ندارد. برای جلوگیری از برهم‌کنش متغیرها، روش ارائه‌شده، جاگذاری تک‌تک متغیرها را پیشنهاد می‌کند.

در این مقاله، هدف، نشان دادن تأثیر تحلیل صحیح نتایج حاصل از روش تاگوچی بوده و بنابراین، موضوعاتی نظیر آنالیز حساسیت، مطرح نشده‌اند. در صورت استفاده از فرایندهای جانبی دیگر، نظیر آنالیز حساسیت، کارایی روش ارائه‌شده همچنان برجا می‌ماند. در بخش بعدی، به‌منظور ارزیابی کارآمدی روش ارائه‌شده، بهینه‌سازی ترکیب روتور موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور، به‌وسیله روش ارائه‌شده انجام می‌شود.

۶- بهینه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور، با استفاده از روش پیشنهادی

ماشین سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور [۱۷]، موتور جدید با چگالی توان بالایی است (شکل ۳). به‌منظور کاهش ریپل گشتاور این موتور، از بهینه‌سازی ترکیب روتور استفاده می‌کنیم. از آنجایی که تغییرات اندوکتانس فاز، در موتورهای سوئیچ رلوکتانس، تأثیر زیادی در مشخصه گشتاور موتور دارد، یکی از روش‌های کاهش ریپل گشتاور، تغییر مشخصه اندوکتانس سیم‌پیچ‌های فاز با هدف خطی کردن آن است. برای تغییر ساختار روتور می‌توان از برش روتور استفاده نمود. به دلیل مشکلات مکانیکی ایجاد‌شده در اثر برش، از حفره‌هایی در ساختار روتور استفاده می‌گردد. مزیت استفاده از حفره‌ها علاوه بر نداشتن مشکلات مکانیکی، سادگی و سهولت ایجاد آن‌ها در روتور است.

در [۱۸] ساختار نشان داده‌شده در شکل ۴، برای بهینه‌سازی، در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت، موتور معرفی‌شده با استفاده از روش

۶-۳- گام سوم

در این مرحله، آزمایش‌های نشان داده شده در جدول ۲، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام می‌شود. نتایج حاصل شده در جدول ۴، نشان داده شده است. این جدول، نشان می‌دهد که آزمایش ۱۸ بیش‌ترین مقدار تابع هدف را حاصل می‌کند. بنابراین، سطوح اختصاص یافته به آزمایش ۱۸ (جدول ۵) به عنوان مجموعه ۱ انتخاب شده و آزمایش ۱۸ بهترین آزمایش در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳: سطوح انتخابی برای ۸ متغیر

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	متغیرها
	۰/۸ میلی‌متر	۱/۲ میلی‌متر	P ₁
۰/۸ میلی‌متر	۱/۲ میلی‌متر	۱/۶ میلی‌متر	P ₂
۱/۵ میلی‌متر	۱/۸ میلی‌متر	۲/۱ میلی‌متر	P ₃
۳/۱ میلی‌متر	۳/۲ میلی‌متر	۳/۳ میلی‌متر	P ₄
۰/۲۵ رادیان	۰/۲۵۳ رادیان	۰/۲۵۵ رادیان	θ ₁
۰/۳۰۵ رادیان	۰/۳۱ رادیان	۰/۳۱۵ رادیان	θ ₂
۰/۳۸۵ رادیان	۰/۳۹ رادیان	۰/۳۹۵ رادیان	θ ₃
۰/۴۸ رادیان	۰/۴۸۵ رادیان	۰/۴۹ رادیان	θ ₄

جدول ۴: مقادیر تابع هدف متناظر با هر آزمایش

F	درصد رپیل	گشتاور متوسط (نیوتن متر)	شماره آزمایش
۲/۲۵	۴۴/۴	۱۷/۹۳	۱
۱/۹۹	۵۰/۲	۱۷/۸۷	۲
۱/۶۸	۵۹/۲	۱۷/۸۵	۳
۱/۸۱	۵۵/۲۵	۱۷/۷۵	۴
۰	۶۸/۵	۱۷/۵۵	۵
۰	۳۶	۱۷/۵۶	۶
۰	۴۳/۷	۱۷/۶۸	۷
۰	۵۵/۵	۱۷/۶	۸
۰	۷۱/۹	۱۷/۴۵	۹
۱/۴۸	۶۷/۶	۱۷/۸۶	۱۰
۲/۴۷	۴۰/۵	۱۷/۹۸	۱۱
۱/۶۸	۵۹/۵	۱۷/۷	۱۲
۱/۴۵	۶۹	۱۷/۹۵	۱۳
۲/۴۳	۴۱/۲	۱۷/۸	۱۴
۲/۲۴	۴۴/۶	۱۷/۸۲	۱۵
۱/۸۵	۵۴/۱	۱۷/۷۹	۱۶
۱/۵۹	۶۲/۹	۱۷/۸۴	۱۷
۲/۸	۳۵/۷	۱۷/۸۶	۱۸

با فرض این که شرط خاتمه بهینه‌سازی برآورده نشده است، وارد مرحله چهارم می‌شویم (در صورتی که در عمل، این شرط برآورده شود، فرایند بهینه‌سازی خاتمه می‌یابد).

۶-۴- گام چهارم

در این مرحله، جدول پاسخی (جدول ۶) بر اساس جدول ۴ تشکیل می‌دهیم.

گشتاور در فرایند بهینه‌سازی است و به صورت اختیاری انتخاب می‌گردد. شرط خاتمه بهینه‌سازی، به هدف طراح، از بهینه‌سازی بستگی دارد. در این مقاله، شرط خاتمه فرایند بهینه‌سازی را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$F \geq 2$$

(۶)

گشتاور متوسط موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور، قبل از تغییر ترکیب روتور، برابر با ۱۸/۰۶ نیوتن متر و رپیل گشتاور آن برابر با ۱۰۱ درصد است. در این فرایند بهینه‌سازی، ماکزیمم مقدار مجاز کاهش متوسط گشتاور، ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل، مقدار ۱۷/۷ نیوتن متر در تابع P در نظر گرفته شده است. در ادامه، فرایند بهینه‌سازی انجام می‌گیرد.

۶-۱- گام اول

تحلیل موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور در [۱۸] انجام گرفته و متغیرهای بهینه‌سازی، مطابق با آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲: جدول تاگوچی دارای ۸ متغیر

شماره آزمایش	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	θ ₁	θ ₂	θ ₃	θ ₄
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۴	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۳	۳
۵	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۱	۱
۶	۱	۲	۳	۳	۱	۱	۲	۲
۷	۱	۳	۱	۲	۱	۳	۲	۳
۸	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۳	۱
۹	۱	۳	۳	۱	۳	۲	۱	۲
۱۰	۲	۱	۱	۳	۳	۲	۲	۱
۱۱	۲	۱	۲	۱	۱	۳	۳	۲
۱۲	۲	۱	۳	۲	۲	۱	۱	۳
۱۳	۲	۲	۱	۲	۳	۱	۳	۲
۱۴	۲	۲	۲	۳	۱	۲	۱	۳
۱۵	۲	۲	۳	۱	۲	۳	۲	۱
۱۶	۲	۳	۱	۳	۲	۳	۱	۲
۱۷	۲	۳	۲	۱	۳	۱	۲	۳
۱۸	۲	۳	۳	۲	۱	۲	۳	۱

۶-۲- گام دوم

با توجه به تعداد متغیرها، جدول تاگوچی نشان داده شده در جدول ۲ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در جدول ۲، به جز متغیر P₁ که دارای دو سطح است بقیه متغیرها دارای سه سطح هستند. تعداد سطوح مورد استفاده در این مقاله، با توجه به تجربه طراح تعیین شده است. در جدول ۳، سطوح انتخابی متغیرهای شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۷، وارد بهترین آزمایش (آزمایش ۱۸) می‌گردند. هر متغیر غیرقطعی که مقدار F را افزایش می‌دهد، به‌عنوان متغیر قطعی، در بهترین آزمایش، تثبیت می‌شود. در غیر این صورت، از بهترین آزمایش، مجدداً خارج می‌گردد. نتایج، در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۹: متغیرهای غیرقطعی در تکرار اول

P_3
P_4
θ_1
θ_3

جدول ۱۰: پاسخ تابع هدف در جاگذاری متغیرهای غیرقطعی

متغیرهای جایگزین شده	F
فقط P_3 در آزمایش ۱۸ جایگزین شده است	۱/۶
فقط P_4 در آزمایش ۱۸ جایگزین شده است	۲/۹۲
P_4 و θ_1 در آزمایش ۱۸ جایگزین شده‌اند	۲/۹۳
P_4 و θ_1 و θ_3 در آزمایش ۱۸ جایگزین شده‌اند	۲/۷۴

همان‌طور که در جدول ۱۰ دیده می‌شود، ابتدا مقدار متغیر غیرقطعی P_3 در آزمایش ۱۸، با مقدار این متغیر، از جدول ۷، جایگزین می‌شود. با این جایگذاری، مقدار تابع F ، برابر با $۱/۶$ می‌شود که بسیار کم‌تر از مقدار F ، قبل از جایگذاری این متغیر است. بنابراین، P_3 ، متغیری غیرقطعی بوده و مقدار جایگذاری شده، از آزمایش ۱۸ خارج می‌گردد. در گام بعدی، P_4 ، مطابق با جدول ۷، در آزمایش ۱۸ جایگذاری می‌شود. با این ترکیب به‌دست‌آمده، مقدار F ، برابر با $۲/۹۲$ می‌شود که بیشتر از مقدار قبلی F است. بنابراین، متغیر P_4 متغیری قطعی در نظر گرفته شده و مقدار آن در آزمایش ۱۸ تثبیت می‌گردد. با جایگذاری θ_1 در آزمایش ۱۸، مطابق با جدول ۷، مقدار F ، به $۲/۹۳$ می‌رسد که برابر با مقدار قبلی F است. در این شرایط که تغییر مقدار θ_1 تغییری در مقدار F ایجاد نمی‌کند، آن را متغیری قطعی با مقدار موجود در بهترین آزمایش، در نظر می‌گیریم. در این صورت، تعداد متغیرهای غیرقطعی کاهش یافته و ادامه فرایند، سریع‌تر انجام می‌گیرد. در گام بعدی، نوبت به متغیر θ_3 می‌رسد. با جایگذاری این متغیر، مقدار تابع F برابر با $۲/۷۴$ می‌شود. بنابراین، θ_3 نیز متغیری غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود. در این گام، همه متغیرهای باقی‌مانده باید در آزمایش ۱۸ که متغیرهای P_4 و θ_1 سطوح جدول ۷ را دارا هستند، موردبررسی قرار گیرند. به دلیل این که تعداد متغیرهای باقی‌مانده، اندک هستند، همه ترکیب‌های ممکن را مورد آزمایش قرار می‌دهیم. در این ترکیب‌ها، متغیرهای باقی‌مانده، دارای سطوح نشان داده‌شده در جدول ۱۱ هستند. نتایج حاصل‌شده، در جدول ۱۲ قابل‌مشاهده است.

جدول ۱۱: متغیرهای غیرقطعی باقی‌مانده و سطوح آن‌ها

سطح ۲	سطح ۱	متغیرهای غیرقطعی
$۲/۱$ میلی‌متر	$۱/۵$ میلی‌متر	P_3
$۰/۳۹$ رادیان	$۰/۳۸۵$ رادیان	θ_3

جدول ۵: مجموعه ۱، شامل اولین سطوح کاندیدای مقادیر بهینه متغیرها

متغیرها	سطوح
P_1	$۰/۸$ میلی‌متر
P_2	$۰/۸$ میلی‌متر
P_3	$۲/۱$ میلی‌متر
P_4	$۳/۱$ میلی‌متر
θ_1	$۰/۲۵$ رادیان
θ_2	$۰/۳۱$ رادیان
θ_3	$۰/۳۹$ رادیان
θ_4	$۰/۴۹$ رادیان

جدول ۶: جدول پاسخ مبتنی بر جدول ۴

	P_1	P_2	P_3	P_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
سطح ۱	$۱/۹۴$	$۱/۹۳$	$۱/۸۶$	$۱/۹۶$	$۲/۷$	$۱/۹۳$	$۱/۸۴$	$۲/۲$
سطح ۲	$۲/۱۳$	$۲/۰۳$	$۱/۹۶$	$۲/۱۴$	$۱/۹$	$۲/۱۸$	$۲/۰۶$	$۱/۹۹$
سطح ۳	-	$۲/۱۵$	$۲/۳$	۲	$۱/۵۱$	۲	$۲/۲$	$۱/۹۱$

جدول ۷: مجموعه ۲، حاوی سطوح کاندیدای مقادیر بهینه متغیرها

مقادیر	سطوح	متغیرها
$۰/۸$ میلی‌متر	۲	P_1
$۰/۸$ میلی‌متر	۳	P_2
$۱/۵$ میلی‌متر	۳	P_3
$۳/۲$ میلی‌متر	۲	P_4
$۰/۲۵۵$ رادیان	۱	θ_1
$۰/۳۱$ رادیان	۲	θ_2
$۰/۳۸۵$ رادیان	۲	θ_3
$۰/۴۹$ رادیان	۱	θ_4

با بررسی جدول ۶، مجموعه ۲، مطابق با جدول ۷، تعیین می‌گردد. سطوح مشخص‌شده برای هر متغیر، بیش‌ترین مقدار برای هر متغیر، در جدول ۶ را فراهم کرده است.

۵-۶- گام پنجم

متغیرهایی که سطوح یکسانی را در دو جدول ۵ و ۷ دارا هستند به‌عنوان متغیرهای قطعی، در نظر گرفته می‌شوند. این متغیرها و مقادیر آن‌ها در جدول ۸ نشان داده شده‌اند.

جدول ۸: متغیرهای قطعی در تکرار اول

P_1	$۰/۸$ میلی‌متر
P_2	$۰/۸$ میلی‌متر
θ_2	$۰/۳۱$ رادیان
θ_4	$۰/۴۹$ رادیان

۶-۶- گام ششم

در این مرحله، مقادیر بهینه متغیرهای غیرقطعی، درحالی‌که متغیرهای قطعی، در بهترین آزمایش (آزمایش ۱۸) ثابت شده‌اند جستجو می‌شوند. متغیرهای غیرقطعی نشان داده‌شده در جدول ۹، به‌صورت تک‌تک از

- [4] T.Y. Chou, "Applications of the Taguchi method for optimized package design," *Proc. IEEE 5th Topical Meeting Electr. Performance Electron. Packag.*, Napa, CA, pp. 14-17, 1996.
- [5] H.T. Wang, Z.J. Liu, S.X. Chen, and J.P. Yang, "Application of Taguchi method to robust design of BLDC motor performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 3700-3702, 1999.
- [6] A.D. MacDonald, "A modified Taguchi method for the design of broadband spiral cavity absorbers," *Proc. Int. Symp. Antennas Propag. Soc.*, vol. 3, pp. 1180-1183, 1990.
- [7] A. Charles, M.S. Towers, and A. McCowen, "Sensitivity analysis of Jaumann absorbers," *Proc. Inst. Elect. Eng. Microw.*, Antennas Propag., vol. 146, no. 4, pp. 257-262, 1999.
- [8] J. Felba, K.P. Friedel, and A. Moscicki, "Characterization and performance of electrically conductive adhesives for microwave applications," *Proc. 4th Int. Conf. Adhesive Joining Coating Technol. Electron. Manuf. 2000*, Espoo, Finland, pp. 232-239, 2000.
- [9] P. Gouget, G. Duchamp, and J. Pistre, "Optimization and comparison of three diplexers based on a new slot to micro strip junction," *2003 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 1231-1234, 2003.
- [10] K.L. Virga, and R.J. Engelhardt, "Efficient statistical analysis of microwave circuit performance using design of experiments," *1993 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Atlanta, GA, vol. 1, pp. 123-126, 1993.
- [11] B. Yull, H. Kyu-yun, S.B. Rhee, D.K. Kim, and B.K. Yang, "Optimization of novel flux barrier in interior permanent magnet-type brushless dc motor based on modified Taguchi method," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 7, pp. 07F106-07F106-3, 2009.
- [12] D.J. Shin, and B. Kwon, "Multi-objective optimal design for in-wheel permanent magnet synchronous motor," *International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009*, pp. 1-5, 2009.
- [13] W. Zhu, X. Yan, and Z. Lan, "Structure optimization design of high speed BLDS motor using Taguchi method," *International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2010.
- [14] A.S. Hedayat, N.J.A. Sloane, and J. Stufken, *Orthogonal Arrays: Theory and Applications*, New York, Springer-Verlag, 1999.
- [15] W.C. Weng, F. Yan, and A. Z. Elsherbeni, "Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: a novel optimization technique in electromagnetic," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 723-730, 2007.
- [16] N.J.A. Sloane, *A Library of Orthogonal Array* [Online], Available: <http://www.research.att.com/~njas/oadir/>.
- [17] M.A. Abbasian, M. Moallem, and B. Fahimi, "Double stator switched reluctance machines (DSSRM): fundamentals and magnetic force analysis," *IEEE Trans. on Energy Con.*, vol. 25, pp. 589-597, 2010.
- [18] M. Tavakkoli, and M. Moallem, "Torque ripple mitigation of double stator switched reluctance motor (DSSRM) using a novel rotor shape optimization," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 15-20, 2012.

جدول ۱۲: نتایج آزمایش‌های به‌دست‌آمده از اجزاء محدود

شماره آزمایش	P_3	θ_3	F
۱	۱	۱	۱/۵۷
۲	۱	۲	۱/۵۱
۳	۲	۱	۲/۷۴
۴	۲	۲	۲/۹۳

جدول ۱۲ نشان می‌دهد که بهترین ترکیب متغیرها، ترکیب P_3 و θ_3 در آخرین سطر که هر دو متغیر دارای سطح ۲ هستند است. در این مقاله، تنها یک تکرار که در مدت‌زمان سه‌ونیم ساعت، با استفاده از پردازشگر هفت هسته‌ای انجام شد، نشان داده می‌شود. به طرز مشابهی می‌توان تکرارهای بعدی را نیز انجام داد. با جایگزینی همزمان همه متغیرهای به‌دست‌آمده از جدول پاسخ‌ها، به مقدار F برابر با ۱/۵۷ می‌رسیم که در مقایسه با ۲/۹ به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی بسیار کوچک‌تر است. در جدول ۱۳، مقادیر ریپل گشتاور به‌دست‌آمده از روش قبلی و روش ارائه‌شده، مقایسه شده‌اند.

جدول ۱۳: ریپل گشتاور به‌دست‌آمده از روش قبلی و روش ارائه‌شده

روش تاگوچی معمول	درصد ریپل گشتاور
روش ارائه‌شده	۳۴/۱
روش تاگوچی معمول	۳۵/۷

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی تاگوچی با دقت بالاتر، بررسی و ارائه گردید. برخلاف روش معمول تاگوچی، روش جدید، برای حصول نتایج دقیق‌تر، از اطلاعات حین فرایند بهینه‌سازی استفاده می‌کند. این روش، با استفاده از نتایج حین بهینه‌سازی و جدول پاسخ‌ها، متغیرهایی که به بررسی دقیق‌تر نیاز دارند را مشخص نموده و با دقت بیشتری، بهینه‌سازی آن‌ها را دنبال می‌کند. به‌منظور ارزیابی کارایی روش ارائه‌شده، از آن برای کاهش ریپل گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو استاتور، به کمک روش اجزاء محدود استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی، دقت بالاتر روش ارائه‌شده، نسبت به روش قبلی را تأیید می‌کنند.

مراجع

- [1] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, New York, Wiley, 2005.
- [2] H. Nagano, K. Miyano, T. Yamada, and I. Mizushima, "Robust selective-epitaxial-growth process for hybrid SOI wafer," *Proc. IEEE Int. Symp. Semicond. Manuf.*, San Jose, CA, pp. 187-190, 2003.
- [3] G.Y. Hwang, S.M. Hwang, H.J. Lee, J.H. Kim, K.S. Hong, and W.Y. Lee, "Application of Taguchi method to robust design of acoustic performance in IMT-2000 mobile phones," *IEEE Tran. Magn.*, vol. 41, pp. 1900-1903, 2005.