



Analysis of the Effect of Different Flux Barrier configuration on the Performance of the PM-assisted Synchronous Reluctance Motor

Amir Hosein Amiri¹, Seyed Ehsan Abdolahi^{2*} , Saeed Hasanzadeh³

¹ PhD student, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

² Associate Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

³ Associate Professor, Qom University of Technology, Qom, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Article Type: Research paper

Receive: 22 August 2025

Revise: 25 October 2025

Accept: 10 November 2025

Available online: 20 February 2026

Keywords:

Synchronous reluctance

Ferrite magnet

Flux Barrier

Due to the simplicity and robustness of the rotor of the synchronous reluctance machines, they are widely used in many different kinds of applications. Some drawbacks like high torque ripple and low power factor make these machines less applicable. These drawbacks can to some extent be compensated by Insertion of magnet but the magnet itself can cause the torque ripple to increase so designing an appropriate structure for the flux barriers can greatly minimize the torque ripple. The novelty and main idea of this paper is evaluation of the effect of different barrier configurations such as barrier shapes and their angles on the performance of a PM-assisted synchronous reluctance machine. A 4-pole 1.5kw synchronous reluctance machine is considered and the ferrite magnets are inserted in the rotor barriers while keeping the insulation ratio constant and the performance of each structure is studied. Simulations are performed using 2D finite element analysis (FEA) and the results are compared.

Cite this article: A Amiri, S E Abdollahi and S Hasanzadeh. Analysis of the Effect of Different Flux Barrier Configuration on the Performance of the PM-assisted Synchronous Reluctance Motor. *Applied Electromagnetics*, 13 (2), pp. 17- 26 (2026).

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1404.13.2.2.9>



OPEN  ACCESS

© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

بررسی تأثیر ساختارهای مختلف سدشار بر عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربای دائم

امیرحسین امیری^۱، سید احسان عبداللهی^{۲*}، سعید حسن زاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

^۲ دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

^۳ دانشیار، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
موتورهای سنکرون رلوکتانسی به دلیل ساختار ساده و محکم رو تور به طور گسترده در کاربردهای مختلفی استفاده می شوند. وجود برخی ضعف ها در این موتور ها نظیر اعوجاج گشتاور بالا و ضریب توان پایین باعث می شود که این ماشین از اهمیت کمتری در برخی کاربردها برخوردار باشد. این ضعف ها را می توان با قرار دادن آهنربا در ساختار رو تور تا حدودی جبران کرد، اما قرار دادن آهنربا به خودی خود نیز می تواند باعث شود که اعوجاج گشتاور افزایش یابد، بنابراین طراحی یک ساختار مناسب برای سد شارها تا حدود زیادی می تواند اعوجاج گشتاور را کاهش دهد. ایده اصلی و نوآوری این مقاله بررسی تأثیر ساختارهای مختلفی از سد شارها، نظیر شکل سد شارها و زاویه آن ها روی عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا هست. به این منظور یک موتور سنکرون رلوکتانسی چهار قطب 1.5kw در نظر گرفته می شود و با ثابت نگه داشتن نسبت ضخامت سد شارها به حامل های شار آهنربای فریت در سدشارهای رو تور آن قرار داده می شود و عملکرد هر ساختار به طور جداگانه مورد مطالعه قرار می گیرد. شبیه سازی عملکرد با روش تحلیلی و اجزای محدود انجام می شود و نتایج باهم مقایسه می شوند.	تاریخچه مقاله: نوع مقاله: علمی- پژوهشی دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱ کلیدواژه ها: سنکرون رلوکتانسی آهنربای فریت سد شار

استناد: امیرحسین امیری، سید احسان عبداللهی و سعید حسن زاده، بررسی تأثیر ساختارهای مختلف سدشار بر عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربای دائم، «الکترومغناطیس کاربردی»، ۱۳(۲): ۱۷-۲۶، (۱۴۰۴).

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1404.13.2.2.9>

۱- مقدمه

[18] اعمال شده است، که هم از آهنربای فریت و هم از NdFeB در یک ساختار نامتقارن استفاده کرده است. ساختار ارائه شده توانسته علی‌رغم ثابت نگه داشتن مقدار گشتاور و داشتن دامنه سرعت وسیع-تر هزینه آهنربای مصرفی را کاهش دهد.

در این پژوهش با طراحی ساختارهای مختلف رو تور یک موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا، عملکرد هریک از آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. موتور انتخاب شده که استاتور آن بدون تغییر می‌ماند یک موتور سنکرون رلوکتانسی چهار قطب 1.5kw است. در این راستا در ادامه در ابتدا طراحی کلی موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا و تغییرات اعمال شده بر روی ساختار رو تور ارائه می‌شود. پس از آن با مدل سازی هریک از این طرح‌های موتورهای مدنظر، عملکرد آن‌ها شبیه سازی می‌شود. نتایج و پیش بینی عملکرد الکترومغناطیسی هریک از ساختارها از نظر اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین مورد بررسی قرار می‌گیرد و باهم مقایسه می‌شوند و بهترین طرح جهت کاربرد در حالت بهینه از گشتاور میانگین و اعوجاج گشتاور مشخص می‌شود.

۲- ساختار موتور

هدف این مقاله بررسی و مقایسه تأثیر ساختارهای مختلف رو تور بر روی عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا است. یک موتور سنکرون رلوکتانسی چهار قطب با توان 1.5kw مورد استفاده قرار گرفته است و سپس آهنربای فریت با حفظ نسبت ضخامت سد شارها به ضخامت حامل شارها (k_{wq}) در سد شارها قرار داده می‌شوند. ساختار رو تور و زاویه سد شارها بر اساس [19] و [20] است.

$$k_{wq} = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} W_{bi}}{\sum_{i=1}^{N_b+1} C_i} \quad (1)$$

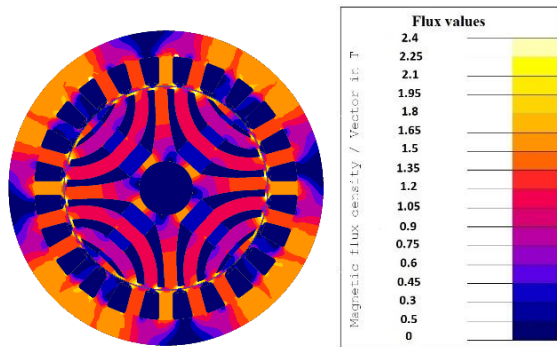
طبق رابطه (۱) که در آن W_{bi} ضخامت هر سدشار و C_i ضخامت هر حامل شار و N_b تعداد سد شارها می‌باشند. در تمام مراحل تغییرات اعمال شده و شبیه سازی‌های انجام شده مقدار k_{wq} با توجه به منابع ذکر شده ثابت است و برابر با 1 قرار داده شده است. مهم‌ترین پارامتر طراحی رو تور در ماشین سنکرون رلوکتانسی گام شیار رو تور هست که نقش مهمی را در میزان اعوجاج و مقدار گشتاور خروجی دارد. با توجه به رابطه‌ی (۲) از [20]، داریم:

موتورهای سنکرون رلوکتانسی به دلیل بازده مناسب و عدم وجود تلفات مسی در رو تور، هم در کاربردهای صنعتی و هم در کاربردهای رانشی می‌توانند به عنوان یک جایگزین مناسب برای موتورهای القایی به حساب آیند. این موتور این قابلیت را دارد که با ابعاد کوچک‌تر از موتور القایی بازده مناسبی نیز داشته باشد. به دلیل عدم وجود سیم پیچی در رو تور و تمرکز تلفات در استاتور شرایط ایجاد یک سیستم خنک سازی با قابلیت اجرای بهتر را نیز فراهم می‌کند. باوجود تمام این مزایا برخی ضعف‌ها نیز وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. ضریب توان پایین و اعوجاج بالای گشتاور از ضعف‌های اصلی این ماشین می‌باشند که برای برطرف کردن آن‌ها باید تغییراتی روی طراحی ماشین اعمال شود. برای حل این ضعف‌ها موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا به عنوان یک جایگزین برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی مطرح می‌شود که در توان برابر دارای ابعاد کوچک‌تر نیز می‌باشند و برای کاربردهای خودروی برقی یک گزینه‌ی مناسب هست [1]. وجود آهنربا در رو تور نیز می‌تواند اعوجاج گشتاور را افزایش دهد که در نتیجه طراحی یک ساختار مناسب در رو تور ماشین برای کاهش اعوجاج کاملاً ضروری هست [2]. روش‌های مختلفی جهت برطرف کردن این ضعف‌ها پیشنهاد شده است که در اکثر این روش‌ها روی ساختار رو تور کار شده است. برخی محققان نیز در مورد ساختارهای مختلف سیم پیچی مطالعاتی را انجام داده‌اند.

روش‌های مختلفی جهت کاهش اعوجاج گشتاور نظیر مورب سازی [3-5]، تغییر ساختارهای مختلف سیم پیچی استاتور [6-8]، استفاده از تکنیک‌های مختلف کنترلی [9-10]، تغییر ترکیب قطب و شیار [11-12] و معمول‌ترین و قابل‌اجراترین روش که تغییر در ساختار رو تور هست برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا پیشنهاد شده است [13-14]. پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی این روش‌ها انجام شده است. در [15] از ساختار صلیبی شکل^۱ در سد شارها استفاده شده است که در نتیجه آن اعوجاج گشتاور به میزان 34% کاهش یافته و گشتاور میانگین نیز به اندازه 11.34% افزایش پیدا کرده است. در [16] با یک روش جدید سد شارها به صورت پارامتری تعریف می‌شوند که در نتیجه آزادی عمل در فرایند طراحی را افزایش می‌دهد. سد شارهای اس پی لاین^۲ و سیال در دو نوع موتور سنکرون رلوکتانسی و سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربا استفاده شده است که ساختار تقویت شده با آهنربا عملکرد بهتری را هم در گشتاور میانگین و اعوجاج گشتاور از خود نشان داده است. در برخی دیگر از پژوهش‌ها با تمرکز بر نوع آرایش آهنربا ساختارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [17]. یک آرایش نامتقارن در

¹ Cross-shaped² Sp-line

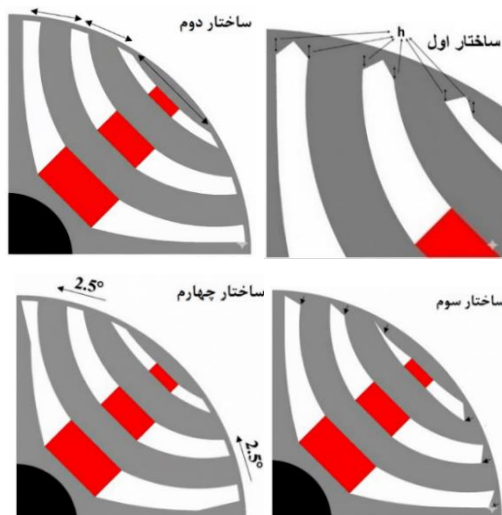
هست. در ادامه عملکرد ماشین در چهار طرح مختلف از ساختار رو تور مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۲). توزیع شار موتور شبیه‌سازی شده در سرعت 1500 دور بر دقیقه و جریان مؤثر 4.5A با زاویه الکتریکی جریان 36 درجه

۳- ساختارهای کلی ارائه شده

در این مقاله چهار حالت از ساختارهای مختلف سدشار مورد بررسی قرار می‌گیرند که دو حالت متقارن، (ساختار اول و دوم) و در دو حالت نامتقارن، (ساختار سوم و چهارم) می‌باشند. در ساختار اول شکل انتهای سدشار تغییر داده شده و در ساختار دوم با تحلیل حساسیت و تغییر زاویه سدشار اول مقدار آن برای اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین بهینه در موتور انتخاب می‌شود. در ساختار سوم ناحیه انتهای سدشار به صورت نامتقارن به یک سمت شیب‌دار شده و در ساختار چهارم زاویه تمام سدشارهای یک‌قطب به یک سمت تغییر داده می‌شود تا با نامتقارن سازی گام شیار رو تور مقدار زاویه بهینه برای بهترین مقادیر اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین به دست آید.



شکل (۳). چهار ساختار پیشنهادی استفاده شده

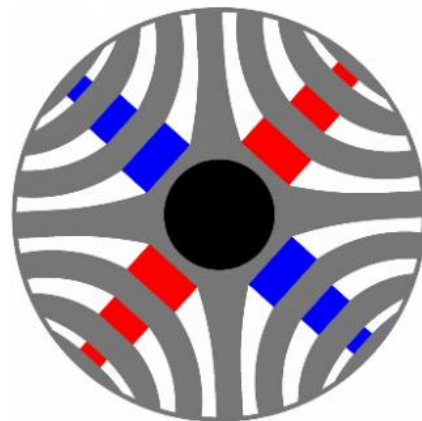
در هر یک از این ساختارها پارامترهایی تعریف می‌شود که با تغییر این پارامترها بهینه‌ترین حالت برای هر ساختار انتخاب می‌گردد. نتایج مربوط به تحلیل حساسیت در هر ساختار در بخش چهارم مقاله به صورت کامل توضیح داده می‌شود.

$$\Delta T = \sum_{i=1}^{N_b} S \sin(P * h_{s1} ((i - 0.5)\alpha_1 - \theta)) + \sin(P * h_{s1} ((90 - (i - 0.5)\alpha_1) - \theta)) \quad (2)$$

$$h_{s1} = \frac{n_s}{p} = N_s$$

که در آن ΔT اعوجاج گشتاور، P جفت قطب، N_b تعداد سد شارها، h_{s1} مرتبه اول هارمونیک مولد ریبیل، n_s تعداد شیار استاتور، θ زاویه رو تور و α_1 گام شیار رو تور است. با توجه به (۲) مشخص است که اندازه گام شیار رو تور (α_1) تأثیر زیادی در اعوجاج گشتاور دارد [21].

$$TR\% = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{average}}} \quad (3)$$

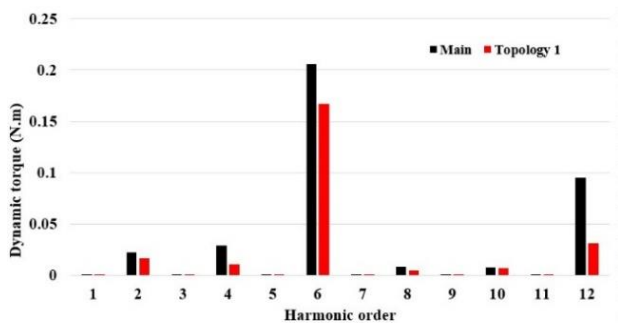


شکل (۱). ساختار رو تور موتور رلوکتانسی تقویت‌شده با آهنربا مشخصات موتور طراحی شده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱). مشخصات موتور

مقدار	مشخصه موردنظر
1.5 kw	توان نامی
0.5 mm	طول فاصله هوایی
140 mm	شعاع خارجی استاتور
90 mm	قطر رو تور
90 mm	طول مفید موتور
4.5 A	جریان نامی
24	تعداد شیار
2.5 mm	عرض دهانه شیار
1500 rpm	سرعت نامی
76	تعداد دور در هر شیار

اعوجاج گشتاور با توجه به رابطه‌ی (۳) که در آن $T_{\max}$ مقدار بیشینه گشتاور و $T_{\min}$ مقدار کمینه گشتاور و T_{average} مقدار میانگین گشتاور هست، به دست می‌آید. در ساختار پایه، اعوجاج گشتاور بعد از قرار دادن آهنربا برابر با 7.3% که از رابطه (۳) محاسبه شده است و مقدار گشتاور میانگین 13.28 N.m



شکل (۶). مؤلفه‌های هارمونیک گشتاور میانگین ساختار پایه و ساختار اول در سرعت 1500 دور بر دقیقه و جریان مؤثر 4.5 A

با توجه به شکل (۵)، اگرچه میزان گشتاور میانگین در ساختار جدید اندکی کم شده است اما میزان اعوجاج گشتاور به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

بر اساس مؤلفه‌های هارمونیک نشان داده شده در شکل (۶)، تغییر اعمال شده به صورت قابل توجهی هارمونیک دوازدهم که هارمونیک مولد اعوجاج است را کاهش داده است. این رویداد که به خاطر افزایش پهنای مؤثر دنده‌های مماسی^۱ است، منجر به هموارتر شدن مسیر عبور شار مغناطیسی هارمونیک‌ها می‌شود. در نتیجه هارمونیک‌های موجود در فاصله هوایی برهم‌کنش^۲ کمتری با رو تور و مؤلفه اصلی که دارای سرعت سنکرون است خواهند داشت و نهایتاً همان‌طور که در شکل (۶) نیز نشان داده شده است، دامنه همه مؤلفه‌های هارمونیک کاهش یافته است.

۴-۲- ساختار دوم: تغییر متقارن زاویه سدشار اول

در برخی مطالعات، گام شیار رو تور (با تعداد سدشارهای متفاوت) ثابت در نظر گرفته شده است. در این مطالعه نیز میزان گام شیار رو تور ثابت در نظر گرفته شده است. در این ساختار با تغییر زاویه اولین سدشار مقدار گام شیار رو تور در سدشار اول تغییر می‌کند.

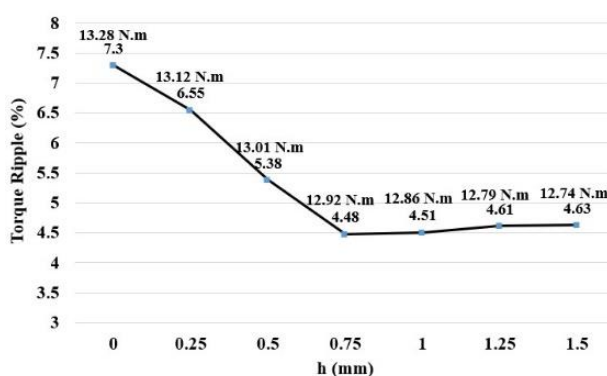
در این ساختار با تعریف پارامتر h در نقاط انتهایی سدشار اول این قابلیت پدید می‌آید که دهانه سد شار به درون و بیرون باز و بسته شود؛ به ازای h های منفی سدشار به درون جمع شده و به ازای h های مثبت سد شار به بیرون باز می‌شود. با تغییر از 5- تا 5+ با توجه به شکل (۳) در مقدار $h = -3.5$ هر طرف از سد شار به اندازه 3.5 درجه به درون جمع می‌شود. درواقع مقدار زاویه سد شار اول به اندازه 7 درجه به داخل جمع می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد مغناطیسی

در ادامه عملکرد ماشین در چهار ساختار مختلف شبیه‌سازی می‌شود و نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

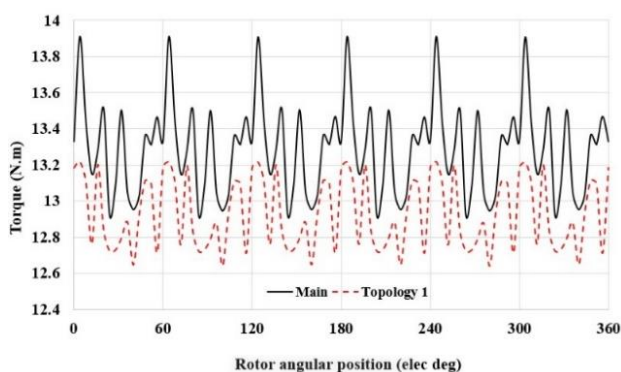
۴-۱- ساختار اول: تغییر متقارن انتهای سد شارها

در این ساختار با توجه به ایجاد تغییرات در ساختار انتهای سدشار و تغییر رلوکتانس این ناحیه، تلاش برای بهبود اعوجاج گشتاور بدون کاهش میزان گشتاور میانگین هست. ناحیه انتهایی سدشار طبق شکل (۳) تغییر داده می‌شود و با انجام تحلیل حساسیت و تغییر پارامتر h میزان اعوجاج و گشتاور میانگین به ازای مقادیر مختلف h محاسبه می‌شود. میزان h به ازای کمترین اعوجاج گشتاور در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۴). نتایج تحلیل حساسیت تغییرات اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین نسبت به پارامتر h

با توجه به شکل (۴) میزان این پارامتر از 0 تا 1.5 تغییر داده می‌شود و در نهایت $h = 0.75$ به عنوان بهینه‌ترین نقطه برای اعوجاج گشتاور انتخاب می‌شود. میزان گشتاور در این نقطه 12.92 N.m و میزان اعوجاج گشتاور 4.48% می‌باشند.



شکل (۵). گشتاور میانگین برای ساختار پایه و ساختار اول در سرعت 1500 دور بر دقیقه و جریان مؤثر 4.5 A

¹ Tangential ribs

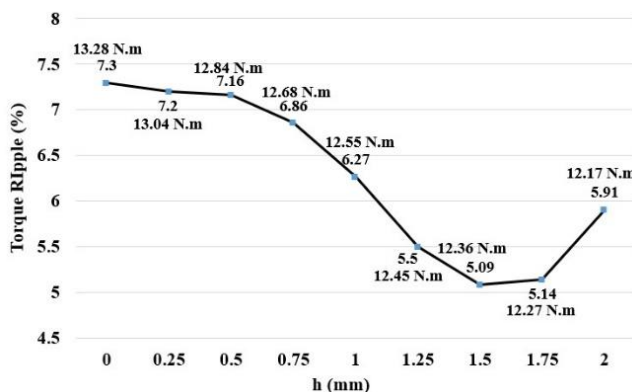
² Interaction

می‌دهد که در این حالت هارمونیک دوازدهم افزایش یافته و هارمونیک ششم به شدت کاهش پیدا کرده است. این پدیده از آن جهت رخ می‌دهد که از نگاه هارمونیک‌های 5 و 7 (که از نوع هارمونیک مکانی هستند)، مسیر بسته شدن شار مغناطیسی آن‌ها یکنواخت‌تر شده است و در نتیجه با روتور و مؤلفه اصلی سرعت سنکرون برهم‌کنش به مراتب کمتر انجام می‌دهند. به عبارت دیگر مقاومت مغناطیسی در مسیر شارهای هارمونیک 5 و 7، دارای تغییرات کمتری نسبت به زاویه چرخش رو تور هست.

۴-۳- ساختار سوم: تغییر نامتقارن انتهای سد شارها

در این ساختار شکل انتهایی سد شارها به یک سمت شیب داده می‌شود و یک ساختار نامتقارن از سد شارها شکل می‌گیرد. با

تعریف پارامتر h در دونقطه از ناحیه انتهایی سد شارها ($h/2$) در نقطه وسط انتهایی سد شارها و h در انتهای راست سد شارها، با تغییر h می‌توان ناحیه انتهایی را به یک سمت شیب‌دار کرد که در شکل (3) نشان داده شده است.

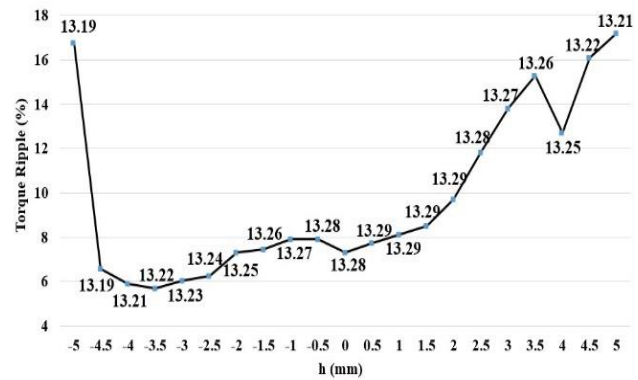


شکل (۱۰). نتایج تحلیل حساسیت تغییرات اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین نسبت به پارامتر h

با انجام تحلیل حساسیت، با تغییر h از 0 تا 2 با توجه به شکل (۱۰) نقطه‌ای با کمترین اعوجاج گشتاور برای این ساختار انتخاب می‌شود که به ازای $h=1.5$ هست. در این نقطه کمترین میزان اعوجاج گشتاور برابر با 5.09% و گشتاور میانگین برابر با 13.22 N.m هست.

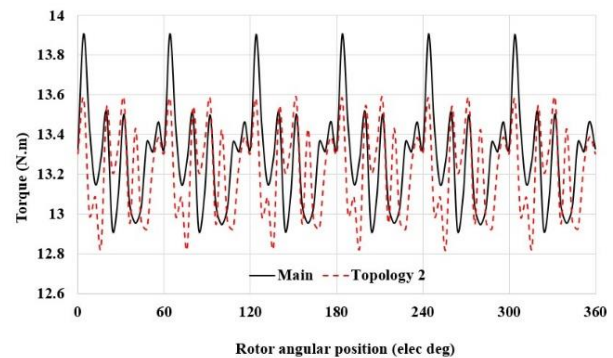
در این ساختار گام شیار رو تور و رلوکتانس انتهای سدشار تغییر می‌کند و باعث کاهش اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین می‌شود.

با توجه به شکل (۱۱) میزان اعوجاج گشتاور کاهش یافته ولی مقداری از گشتاور میانگین هم در این تغییر از دست‌رفته است. میزان اعوجاج برابر با 5.09% و میزان گشتاور میانگین 12.82 N.m هست.



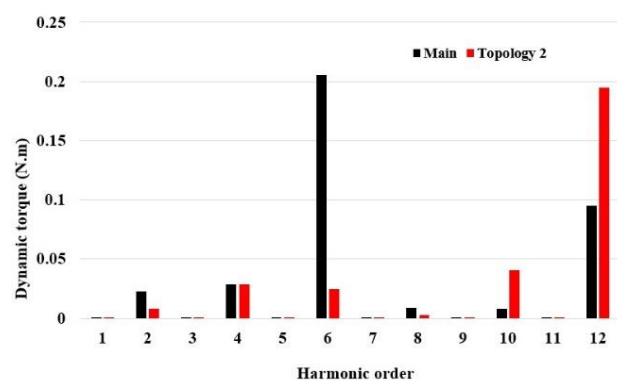
شکل (۷). نتایج تحلیل حساسیت تغییرات اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین نسبت به پارامتر h (مقادیر گشتاور هر مرحله به N.m در بالای هر مرحله نوشته شده است)

با توجه به شکل (۷) نقطه $h=-3.5$ با اعوجاج گشتاور 5.7% و گشتاور میانگین 13.22 N.m به عنوان نقطه بهینه برای این ساختار انتخاب می‌شود.



شکل (۸). گشتاور میانگین برای ساختار پایه و ساختار دوم در سرعت 1500 دور بر دقیقه و جریان مؤثر 4.5 A

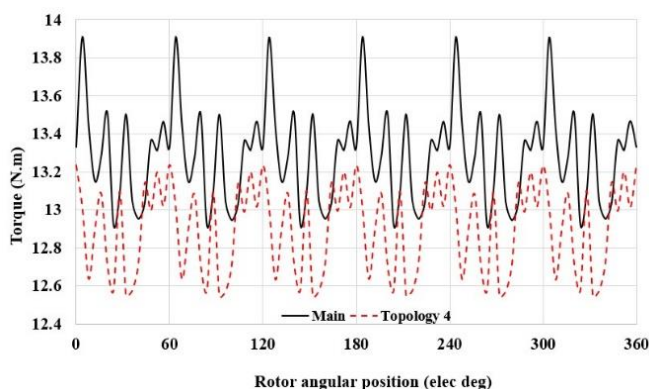
با توجه به شکل (۸) میزان اعوجاج گشتاور کاهش یافته ولی مقداری از گشتاور میانگین هم در این تغییر از دست‌رفته است. میزان اعوجاج برابر با 5.7% و میزان گشتاور میانگین 12.82 N.m هست.



شکل (۹). مؤلفه هارمونیک گشتاور میانگین ساختار پایه و ساختار دوم در سرعت 1500 دور بر دقیقه و جریان مؤثر 4.5 A

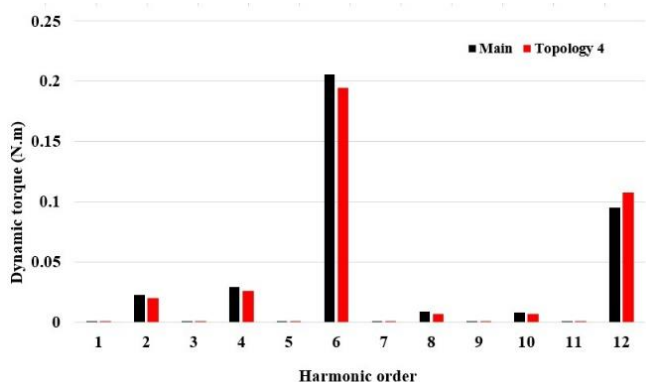
شکل (۹) مؤلفه‌های هارمونیک گشتاور ساختار دوم را نشان

با تغییر h از ۳.۵ تا ۳.۵ مقادیر گشتاور میانگین و اعوجاج گشتاور در تمامی حالت‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به شکل (۱۳) در نقطه $h=2.5^\circ$ که در جهت خلاف عقربه‌های ساعت است، کمترین میزان اعوجاج گشتاور را داریم و این نقطه به‌عنوان نقطه‌ی بهینه انتخاب می‌شود.



شکل (۱۴). گشتاور میانگین برای ساختار پایه و ساختار چهارم در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و جریان مؤثر ۴.۵ A

با توجه به شکل (۱۴) میزان کاهش گشتاور نسبت به حالت قبل خیلی کمتر هست. میزان گشتاور میانگین در این حالت برابر با ۱۲.۸۹ N.m و میزان اعوجاج گشتاور برابر با ۵.۳۵٪ هست.

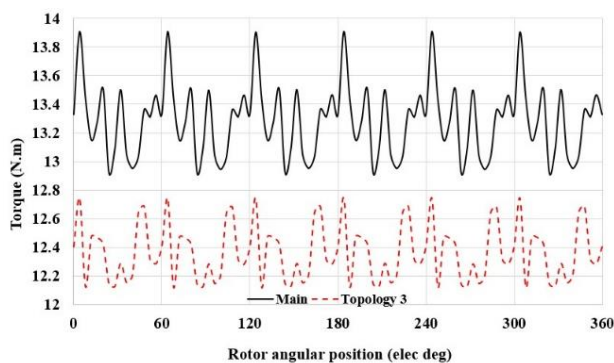


شکل (۱۵). گشتاور میانگین برای ساختار پایه و ساختار چهارم در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و جریان مؤثر ۴.۵ A

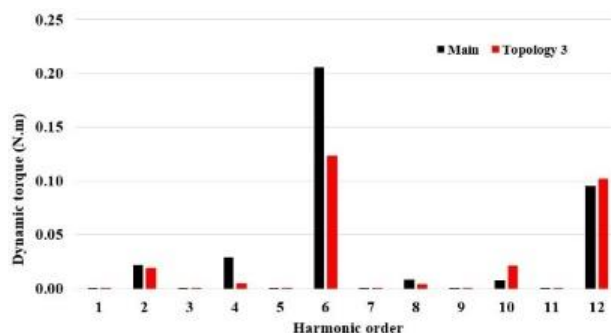
با توجه به مؤلفه هارمونیک گشتاور در شکل (۱۵) تغییر چندانی در هارمونیک‌های ۶ و ۱۲ دیده نشده است که می‌توان نتیجه گرفت که کاهش اعوجاج در این حالت ناشی از کاهش گشتاور دندانه‌ای در این ساختار هست و همچنین می‌تواند ناشی از کاهش زاویه بار نیز است.

۳- نتایج و بحث

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها در ساختارهای ذکر شده میزان اعوجاج گشتاور در تمامی حالت‌ها کاهش یافته است و بخشی از گشتاور میانگین نیز در تمامی حالت‌ها ازدست‌رفته است.



شکل (۱۱). گشتاور میانگین برای ساختار پایه و ساختار سوم در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و جریان مؤثر ۴.۵ A

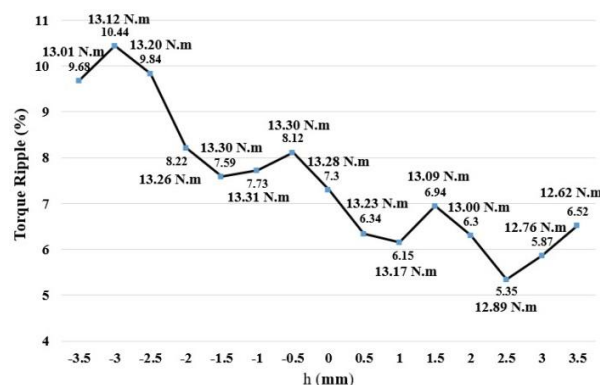


شکل (۱۲). گشتاور میانگین برای ساختار پایه و ساختار سوم در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و جریان مؤثر ۴.۵ A

با توجه به مؤلفه‌های هارمونیک گشتاور میانگین در شکل (۱۲) هارمونیک ششم در این ساختار تقریباً به نصف کاهش پیدا کرده است.

۴-۴- ساختار چهارم: تغییر نامتقارن زاویه سدشار

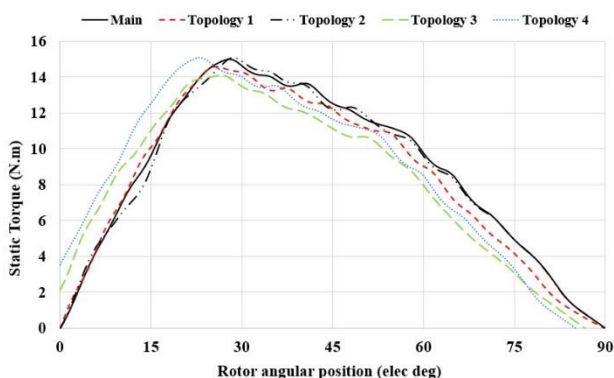
در این ساختار زاویه سد شارها به سمت چپ متمایل می‌شوند که یک ساختار نامتقارن شکل می‌گیرد و یک گام شیار رو تور جدید حاصل می‌شود. با تعریف پارامتر h در نقاط انتهایی زاویه سد شارها، سد شارها به‌صورت برابر در همی قطب‌ها به سمت در جهت و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت قابل تغییر هستند.



شکل (۱۳). نتایج تحلیل حساسیت تغییرات اعوجاج گشتاور و گشتاور میانگین نسبت به پارامتر h

نیست. در مواردی کاهشی در هارمونیک‌ها و گشتاور دندانه‌ای مشاهده نمی‌شود اما اعوجاج گشتاور کاهش می‌یابد. در این موارد می‌توان گفت که باوجود اینکه هارمونیک‌های شیری و مکانی کاهش پیدا نکرده اما برهم‌کنش آن‌ها می‌تواند باعث کاهش اعوجاج گشتاور شود زیرا با توجه به اینکه میزان هارمونیک‌ها کاهش پیدا نکرده اما احتمال تغییر زاویه هارمونیک‌ها وجود دارد که این امر می‌تواند در اثر برهم‌کنش هارمونیک‌ها باعث کاهش اعوجاج گشتاور شود.

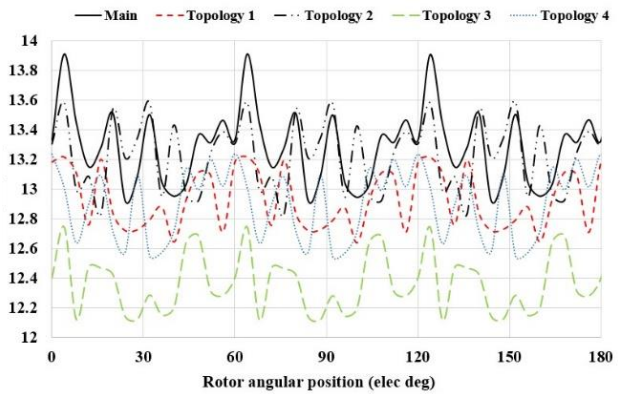
با تغییرات اعمال‌شده در ساختارها گام شیار رو تور مورد تغییر قرار می‌گیرد که این امر می‌تواند منجر به کاهش هارمونیک‌های شیری شود که در این موتور هارمونیک شیری مورد هدف همان هارمونیک دوازدهم، (هارمونیک اول مولد اعوجاج گشتاور) هست. تغییرات اعمال‌شده بر روی ساختارها در حالت‌های اول تا سوم باعث کم شدن هارمونیک‌های مکانی پنجم و هفتم (مولد مؤلفه ششم اعوجاج گشتاور) نیز شده است. درواقع اعمال این تغییرات برهم‌کنش هارمونیک‌ها را کم کرده است یا به بیان بهتر مسیر عبور هارمونیک‌ها تسهیل می‌شود ولی در عوض مقداری گشتاور میانگین از دست می‌رود.



شکل (۱۷). گشتاور استاتیکی چهار ساختار در حالت موتوری به ازای زاویه بارهای مختلف

شکل (۱۷) گشتاور استاتیکی چهار ساختار در حالت موتوری به ازای زاویه بارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، زاویه جریان استاتور 36 درجه بیان‌شده بود در این شکل زاویه گشتاور بیشینه به ازای هر آمپر جریان بین 28 تا 30 هست که این اختلاف به دلیل اثر اشباع هست.

با توجه به جدول (۳) میزان اندوکتانس‌های محور d و q برای هر چهار ساختار محاسبه شده‌اند. مقدار ضریب برجستگی نسبت بین اندوکتانس d و q هست بیانگر قابلیت ماشین برای تولید گشتاور رلکتانسی هست. با توجه به مقادیر ضریب برجستگی می‌توان دریافت ساختار با ضریب برجستگی بیشتر کمترین میزان کاهش گشتاور میانگین را داشته که این عدم کاهش را می‌توان با خاصیت جبرانگری گشتاور رلکتانسی در



شکل (۱۶). گشتاور میانگین برای همه‌ی چهار ساختار ارائه‌شده به ازای نصف چرخه الکتریکی در سرعت 1500 دور بر دقیقه و جریان مؤثر 4.5A

شکل (۱۶) شکل گشتاور تمام ساختارها را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ساختار چهارم بیشترین کاهش گشتاور میانگین و ساختار دوم کمترین کاهش گشتاور میانگین را دارد.

جدول (۲). مقادیر گشتاور میانگین و اعوجاج گشتاور حاصل از شبیه‌سازی‌ها

ساختارها	گشتاور میانگین (N.m)	درصد کاهش گشتاور میانگین	اعوجاج گشتاور	درصد کاهش اعوجاج گشتاور
ساختار پایه	۱۳.۲۸	-	۷.۳٪	-
ساختار اول	۱۲.۹۲	۲.۷٪	۴.۴۸٪	۳۸.۶٪
ساختار دوم	۱۳.۲۲	۰.۴٪	۵.۷٪	۲۱.۹٪
ساختار سوم	۱۲.۳۶	۶.۹٪	۵.۰۹٪	۳۰.۲٪
ساختار چهارم	۱۲.۸۹	۲.۹٪	۵.۳۵٪	۲۶.۷٪

با توجه به جدول (۲) کاهش اعوجاج گشتاور در تمامی حالت‌ها رخ داده است. این کاهش ناشی از کاهش هارمونیک‌های شیری و مکانی است. در هر یک از ساختارها میزان این هارمونیک‌ها تا حدودی کاهش پیدا کرده است. اندازه نسبت ضخامت سد شارها به حامل شارها و گام شیار رو تور دو عامل مهم در طراحی ماشین سنکرون رلکتانسی می‌باشند. طراحی اولیه مناسب این دو عامل می‌تواند تا حدود زیادی یک ساختار بهینه با اعوجاج مطلوب را ایجاد کند. از نگاهی دیگر عوامل ایجاد اعوجاج در ماشین عبارت‌اند از هارمونیک‌های شیری، هارمونیک‌های مکانی، گشتاور دندانه‌ای و هارمونیک‌های زمانی، که سه مورد اول بعد هندسی داشته و تأثیر متقابل (دوطرفه) در طراحی هندسه رو تور و استاتور ماشین‌های الکتریکی و مشخصه الکترومغناطیسی خروجی دارند، درحالی‌که مورد آخر بعد زمانی داشته و به‌صورت یک منشأ بیرونی از جانب منابع تغذیه کلید زنی (دراپورها) است و جزو مراحل طراحی ساختاری ماشین

- 10.1109/ICEMD60816.2023.10429257.
- [3] P. Lazari, J. Wang, and B. Sen, "3-D effects of rotor step-skews in permanent magnet-assisted synchronous reluctance machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2446511.
- [4] C. Gallardo, C. Madariaga, J. A. Tapia, and M. Degano, "A Method to Determine the Torque Ripple Harmonic Reduction in Skewed Synchronous Reluctance Machines," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, p. 2949, 2023, doi: 10.3390/app13052949.
- [5] R. Tsunata and M. Takemoto, "Skewing Technology for Permanent Magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Review and Recent Trends," *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, 2024, doi: 10.1109/OJIES.2024.3491295.
- [6] X. Ma, G. Li, Z. Zhu, G. W. Jewell, and J. Green, "Investigation on synchronous reluctance machines with different rotor topologies and winding configurations," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 1, pp. 45–53, 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0199.
- [7] M. A. Kabir and I. Husain, "Application of a multilayer AC winding to design synchronous reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 6, pp. 5941–5953, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2859033.
- [8] B. Lehner and D. Gerling, "Design and comparison of concentrated and distributed winding synchronous reluctance machines," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, 2016, pp. 1–8, doi: 10.1109/ECCE.2016.7855004.
- [9] H. Heidari *et al.*, "A review of synchronous reluctance motor-drive advancements," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 729, 2021, doi: 10.3390/su13020729.
- [10] R. Thike and P. Pillay, "Automated current control method for flux-linkage measurement of synchronous reluctance machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 2, pp. 1464–1474, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2967689.
- [11] S. M. Taghavi Araghi, A. Kiyomarsi, and B. Mirzaei Dehkordi, "Design, analysis and prototyping of a PM-assisted synchronous reluctance machine equipped with new-type of fractional-slot winding," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 19, no. 1, p. e70002, 2025, doi: 10.1049/elp2.70002.
- [12] T. Wolnik, V. Styskala, and T. Mlcak, "Study on the selection of the number of magnetic poles and the slot-pole combinations in fractional slot PMSM motor with a high power density," *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 215, 2021, doi: 10.3390/en15010215.
- [13] Z. Gmyrek, "The Impact of the Core Laminate Shaping Process on the Parameters and Characteristics of the Synchronous Reluctance Motor with Flux Barriers in the Rotor," *Energies*, vol. 18, no. 5, p. 1222, 2025, doi: 10.3390/en18051222.
- [14] M. Katona and T. Orosz, "Circular Economy Aspects of Permanent Magnet Synchronous Reluctance Machine Design for Electric Vehicle Applications: A Review," *Energies*, vol. 17, no. 6, p. 1408, 2024, doi: https://doi.org/10.3390/en17061408.
- [15] J. Liang, Y. Dong, H. Sun, R. Liu, and G. Zhu, "Flux-barrier design and torque performance analysis of synchronous reluctance motor with low torque ripple," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 8, p. 3958, 2022, doi: 10.3390/app12083958.
- [16] O. Korman, M. Di Nardo, M. Degano, and C. Gerada, "A novel flux barrier parametrization for synchronous reluctance machines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 37, no. 1, pp. 675–684, 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3099628.
- [17] Y. Xiao, Z.-Q. Zhu, J.-T. Chen, D. Wu, and L.-M. Gong,

میزان گشتاور میانگین بیان کرد. این میزان برای ساختار دوم که کمترین کاهش گشتاور میانگین را داشته نیز بیشترین مقدار است. درواقع کاهش گشتاور الکترومغناطیسی در این مورد با افزایش گشتاور رلوکتانسی جبران شده تا میزان کاهش گشتاور میانگین کمتر از حالت‌های دیگر باشد.

جدول (۳). مقادیر اندوکتانس‌ها در راستای محور d و q و ضریب برجستگی برای تمامی ساختارها

ساختارها	اندوکتانس محور d (H)	اندوکتانس محور q (H)	ضریب برجستگی
ساختار پایه	۰.۱۷۳۸	۰.۰۵۱۲	۳.۳۹۴۵
ساختار اول	۰.۱۷۴۰	۰.۰۵۶۴	۳.۰۸۵۱
ساختار دوم	۰.۱۷۴۰	۰.۰۵۱۲	۳.۳۹۸۴
ساختار سوم	۰.۱۷۴۰	۰.۰۵۸۹	۲.۹۵۴
ساختار چهارم	۰.۱۷۳۸	۰.۰۵۷۲	۳.۰۳۸۴

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله چهار ساختار مختلف از سدشارهای موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت‌شده با آهنربا با تغییر در ناحیه انتهایی سدشار و زاویه سد شارها موردبررسی قرار گرفته است. میزان گشتاور میانگین و اعوجاج در هر حالت موردمحاسبه قرار گرفته است. با توجه به دو عامل مهم گام شیار رو تور و نسبت ضخامت سد شارها به حامل شارها در طراحی ساختار ماشین‌های سنکرون رلوکتانسی، ساختارهای موردنظر با تغییر گام شیار رو تور و رلوکتانس ناحیه انتهایی سد شارها میزان اعوجاج گشتاور تا حدود مطلوبی کاهش‌یافته است. از تغییرات انجام‌شده در ساختار ماشین و نتایج به‌دست‌آمده می‌توان دریافت از میان تمامی روش‌های کاهش اعوجاج گشتاور در موتورهای سنکرون رلوکتانسی نظیر تغییر ساختار رو تور ماشین، مورب‌سازی، تغییر ساختار سیم‌پیچی و روش‌های کنترلی متنوع، به دلیل پیچیدگی و ناهمگن بودن ساختار رو تور ماشین‌های سنکرون رلوکتانسی، بهترین روش برای کاهش اعوجاج تغییر ساختار رو تور و طراحی بهینه سدشارهای این ماشین است.

۵- مراجع

- [1] N. Bianchi, E. Fornasiero, and W. Soong, "Selection of PM flux linkage for maximum low-speed torque rating in a PM-assisted synchronous reluctance machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 3600–3608, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2416236.
- [2] A. H. Amiri, S. E. Abdollahi, and S. Hasanzadeh, "Performance Comparison of Different Methods of Torque Ripple Reduction for Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor," in *2023 3rd International Conference on Electrical Machines and Drives (ICEMD)*, IEEE, 2023, pp. 1–5. doi:

- "A novel asymmetric rotor interior PM machine with hybrid-layer PMs," in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, 2020, pp. 4029–4035. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9236015.
- [18] Y. Xie, J. Shao, S. He, B. Ye, F. Yang, and L. Wang, "Novel PM-Assisted Synchronous Reluctance Machines Using Asymmetrical Rotor Configuration," *Ieee Access*, vol. 10, pp. 79564–79573, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3195047.
- [19] R. Rouhani, S. E. Abdollahi, and S. A. Gholamian, "Design of a high speed interior claw synchronous reluctance machine," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 12, p. e13200, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13200.
- [20] R. Rouhani, S. E. Abdollahi, and S. A. Gholamian, "A Simple Analytical Method for Rotor Design of Synchronous Reluctance Machines," in *2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, IEEE, 2022, pp. 420–425. doi: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767279.
- [21] S. A. G. R. Rouhani, S. Ehsan Abdollahi, "Presentation of a Generalized Method for Rotor Design of Synchronous Reluctance Machine," *J. Appl. Electromagn.*, vol. Vol. 7, 2019, doi: 20.1001.1.26455153.1398.7.1.5.8.