

Mikro-mobilite Araçlar için Senkron Relüktans Motorun Tasarımı ve Optimizasyonu

Design and Optimization of Synchronous Reluctance Motor for Micro-Mobility Vehicles

Erdal Bekiroğlu, Sadullah Esmer

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
Bekiroglu_@ibu.edu.tr, sadullahesmer@ibu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada mikro-mobilite sınıfı elektrikli araçlar için senkron relüktans motorun tasarımı ve optimizasyonu sunulmuştur. Analizler sonlu elemanlar yöntemiyle Ansys Maxwell'de yapılmıştır. İlk etapta SynRM, Ansys Maxwell'in başlangıç parametreleri ile tasarlanmıştır. Hedeflenen kriterleri karşılamak için SynRM'nin rotor geometri parametreleri Genetik Algoritma (GA) kullanılarak optimize edilmiştir. Daha sonra optimize edilen parametreler kullanılarak SynRM'nin tekrar tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin performansı incelenmiştir ve bunun için Ansys Maxwell'deki Machine Toolkit eklentisi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde SynRM'nin mikro-mobilite sınıfı elektrikli araçlar için başarıyla tasarlandığı ve hedeflenen tasarım kriterlerini karşıladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Elektrikli Araçlar, Genetik Algoritma, Mikro-mobilite, Optimizasyon, Senkron Relüktans Motor

Abstract

In this study, the design and optimization of synchronous reluctance motor for micro-mobility class electric vehicles is presented. Analyses were made using the finite element method in Ansys Maxwell. SynRM is designed with the initial parameters of Ansys Maxwell. To meet the targeted criteria, SynRM's rotor geometry parameters have been optimized using the Genetic Algorithm. SynRM was redesigned using optimized parameters. The performance of the designed SynRM was examined and the Machine Toolkit plugin in Ansys Maxwell was used for this. When the results obtained were examined, it was seen that SynRM was successfully designed for micro-mobility class electric vehicles and met the targeted design criteria.

Keywords: Electric Vehicles, Genetic Algorithm, Micro-mobility, Optimization, Synchronous Reluctance Motor

1. Giriş

Günümüzde elektrikli ulaşım araçları en popüler konulardan biri haline gelmiştir. Bu araçlar pek çok akademik çalışmalara da konu olmaktadır. Aşırı sera gazı emisyonları, gürültü ve ekolojik problemler nedeniyle çevre düzenlemelerini güçlendirmek için elektrikli ulaşım araçları gibi çevre dostu araçlara ilgi artmaktadır. Hem elektrikli bir araç olmanın avantajları hem de maliyet ve pratiklik avantajlarından dolayı mikro-mobilite de bu ilginin bir odak noktası olmuştur. Mikro-mobilite, küçük güçlü ve düşük hızlı elektrikli ulaşım araçlarını temsil eden bir kategoridir. Bu araçlar genelde kısa mesafeli ve düşük süreli yolculuklarda kullanılmaktadır. Mikro-mobilite sınıfı araçlar üzerine yapılan çalışmalar son zamanlarda artmıştır [1], [2], [3]. Bu çalışmalardan bazıları [1] mikro-mobilite sınıfının sosyo-ekonomik ve çevre ile ilişkisini konu alırken, bazıları da [2], [3] bu araçlar için elektrik motoru tasarımı konu almıştır. Elektrikli araçlarda kullanılacak elektrik motorunun seçiminde, motordan beklenen performans ile maliyet arasındaki denge çok önemlidir. Ayrıca güç yoğunluğu, güvenilirlik, verimlilik, hata toleransı, uzun ömür, termal limit ve tork dalgalanması gibi birçok parametre de elektrik motoru seçiminde önemlidir [4]. Elektrikli araçlarda genel olarak doğru akım motoru, sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM), fırçasız doğru akım motoru (FDAM), anahtarlamalı relüktans motor (ARM) ve asenkron motor (ASM) gibi çeşitli motor tipleri kullanılmaktadır [5]. Bu elektrikli motorların avantaj ve dezavantajlarına göre elektrikli araçta kullanılacak elektrik motoru seçilmektedir. Doğru akım motoru hız kontrol kolaylığına sahiptir fakat fırça ve komütatöre sahip olduğu için verim ve güvenilirliği düşüktür. Mıknatıslı motorlardan SMSM ve FDAM yüksek verimlilik, yüksek güç faktörü ve düşük tork dalgalanmasına sahiptir. Bu avantajlarının yanında mıknatıslardan kaynaklı maliyet artışı ve termal sınırlar gibi dezavantajlara sahiptir [6]. ARM'nin basit yapıya sahip olması, güvenilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları vardır fakat yüksek tork dalgalanması gibi

dezavantajı vardır [2]. ASM'ler basit yapı, düşük bakım gereksinimi ve düşük tork dalgalanması gibi avantajlarının yanında düşük verim ve düşük güç yoğunluğu dezavantajına sahiptir [7].

Mikro-mobilite dahil elektrikli araçlarda genellikle mıknatıslı motorlar kullanılmaktadır. Mıknatıs kullanımının daha yüksek tork üretme ve daha yüksek verim elde etme gibi motorun performansını iyileştirmeye katkısı vardır. Fakat mıknatısların yüksek maliyeti, doğada sınırlı miktarda bulunmaları ve sıcaklığa bağlı demanyetize olma gibi olumsuz tarafı da vardır. Bu nedenle mıknatıs içermeyen ya da daha az miktarda mıknatıs içeren motorlara artan bir ilgi vardır [8].

Senkron relüktans motor (SynRM), elektrikli araçlar için alternatif bir motordur. SynRM basit ve sağlam bir yapıya sahiptir. Rotorunda herhangi bir sargı veya mıknatıs yoktur. Rotorun anizotropi yapısı sayesinde, relüktans kuvveti tarafından tork üretilir. SynRM, yüksek verimlilik, düşük maliyet, uzun ömür ve sağlamlık gibi avantajlara ve yüksek tork dalgalanması, düşük güç faktörü gibi dezavantajlara sahiptir [9].

SynRM hakkında literatürde pek çok çalışma vardır. Bir çalışmada SynRM'nin simetrik ve asimetrik akı bariyer yapısı kıyaslanmıştır. Asimetrik akı bariyer yapısının daha düşük tork dalgalanması ürettiği görülmüştür [10]. Başka bir çalışmada farklı akı bariyer geometrilerin SynRM'nin performansına olan etkilerini incelenmiştir [11]. Başka bir çalışmada rotorda burma yönteminin uygulanması ile SynRM'nin performansındaki değişim incelenmiştir [12]. Başka çalışmalarda elektrikli araçlar için SynRM tasarımları gerçekleştirilmiştir [13], [14], [15]. Bu çalışmaların bazılarında yüksek güçlü bazılarında ise düşük güçlü SynRM tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmada, mikro-mobilite sınıfı elektrikli araçlar için SynRM tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirmiştir. 3 faz, 360 rpm, 500 W ve 4 kutuplu olarak tasarlanan SynRM, hedeflenen gereksinimleri karşılama için optimize edilmiştir. Optimizasyon SynRM'nin rotor geometri parametreleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon için genetik algoritma kullanılmıştır. Ansys Maxwell'de sonlu elemanlar yöntemiyle SynRM'nin performansı analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, tasarlanan SynRM'nin mikro-mobilite sınıfı elektrikli araçların gereksinimlerini karşıladığını göstermiştir.

2. SynRM'nin tasarımı

2.1. Hedeflenen SynRM'nin tasarım kriterleri

Hedeflenen SynRM için tasarım kriterleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. SynRM'nin hedeflenen tasarım kriterleri

Parametreler	Değerler
--------------	----------

Faz sayısı	3
Güç (W)	500
Hız (rpm)	360
Tork (Nm)	>6
Tork Dalgalanması (%)	<15
Verim (%)	>90
En yüksek faz akımı (A)	<20
Kaynak gerilimi (V)	48
Frekans (Hz)	50

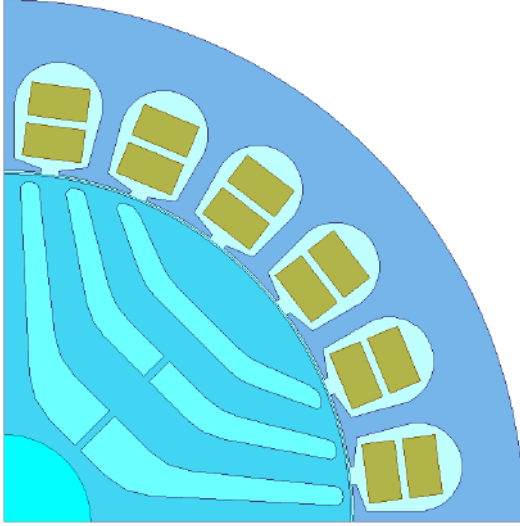
Tablo 1'deki tasarım kriterleri literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen referans değerlerdir. Hedeflenen motoru tasarlamak için stator ve rotor parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. SynRM'nin stator ve rotor başlangıç parametreleri tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. SynRM'nin stator ve rotor başlangıç parametreleri

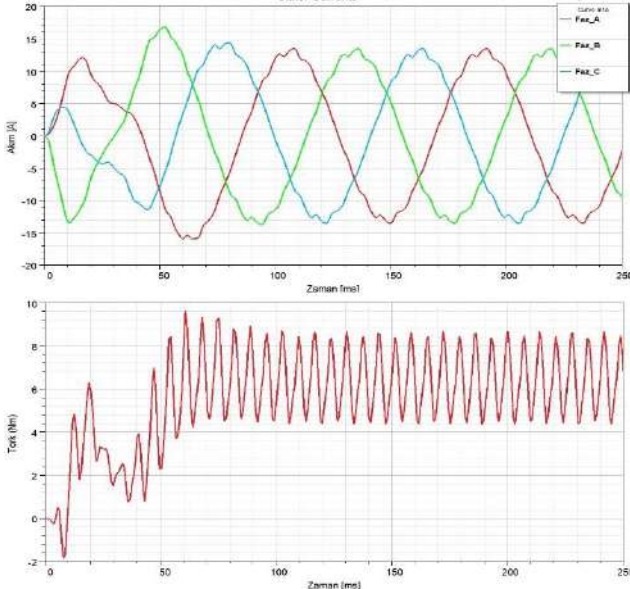
Parametreler	Değerler
Stator	
Hs0 (mm)	0.5
Hs1 (mm)	1
Hs2 (mm)	8.2
Bs0 (mm)	2.5
Bs1 (mm)	10.6
Bs2 (mm)	12.8
Rs (mm)	6.4
Dış çap (mm)	150
İç çap (mm)	101
Uzunluk (mm)	72
Rotor	
H (mm)	1
W (mm)	1
R (mm)	1
R0 (mm)	10
Rb (mm)	15
Y0 (mm)	7
B0 (mm)	7
Dış çap (mm)	100
İç çap (mm)	25
Uzunluk (mm)	72

2.2. SynRM'nin tasarımı

SynRM'nin tasarımı öncelikle Ansys Maxwell'de referans SynRM parametreleri kullanılarak gerçekleştirildi. Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Tasarlanan SynRM Şekil 1'de gösterilmiştir. Tork ve Akım grafikleri ise Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Başlangıç parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM



Şekil 2 Başlangıç parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM'nin akım ve tork grafiği

Şekil 2'deki grafikte görüldüğü gibi başlangıç parametreleri ile tasarlanan SynRM, yüksek tork dalgalanmasına sahiptir. Bu yaklaşık %66,1 değerindeki tork dalgalanması hedeflenen değerin çok üstündedir. Üretilen torkun rms değeri 6.56 Nm ve akımın rms değeri ise 9.3 A'dır.

Bir sonraki adımda hedeflenen tasarım kriterlerini karşılayabilmek için SynRM'nin rotor parametrelerinde optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

3. SynRM'nin optimizasyonu

Başlangıç parametreleri kullanılarak tasarlanan SynRM, hedeflenen kriterleri karşılamamıştır. Bundan dolayı tasarımda iyileştirme yapma ihtiyacı oluşmuştur. İyileştirme için SynRM'nin rotor parametrelerinde seçilmiştir. Bu bölümde SynRM'nin rotor parametreleri

optimize edilerek hedeflenen kriterlere ulaşmak amaçlanmıştır. Optimizasyon için Genetik Algoritma (GA) tercih edilmiştir.

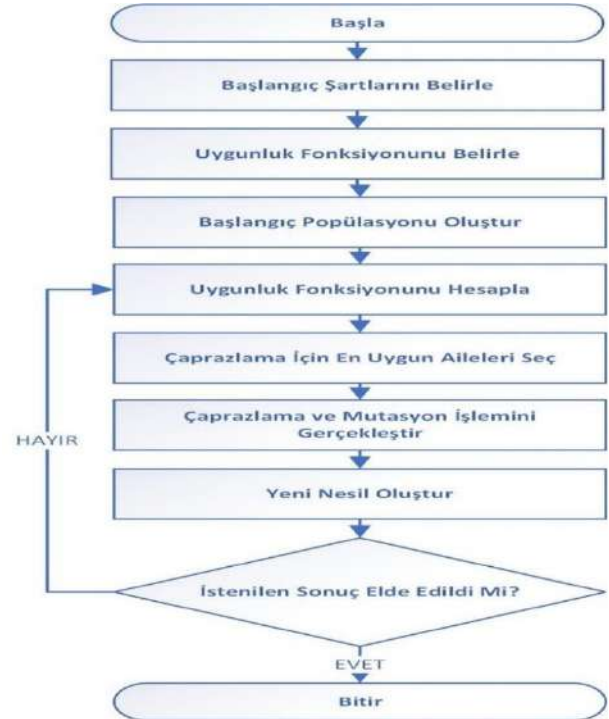
3.1. Genetik algoritma

Genetik Algoritma (GA), genetik şifre mantığını kullanan bir yapay zekâ algoritmasıdır [16]. Genetik algoritmanın akış diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. Bu optimizasyonda amaç tork dalgalanmasını en aza indirecek parametrelerin bulunmasıdır. Bunun için GA'nın uygunluk fonksiyonu tork dalgalanması üzerinden belirlenmiştir. Denklem (1) ve (2)'de sırasıyla tork dalgalanması (T_{dal}) ve uygunluk fonksiyonu (f_u) verilmiştir.

$$T_{dal} = \frac{T_{maks} - T_{min}}{T_{ort}} \times 100 \quad (1)$$

$$f_u = \min(T_{dal}) \quad (2)$$

GA'nın birey sayısı ve çocuk sayısı 30 olarak belirlenmiştir. Toplam iterasyon sayısı 600'dür. GA'nın optimize edeceği parametreler, SynRM'nin rotor geometri parametreleri olan R_b , Y_0 ve B_0 olarak seçilmiştir.



Şekil 3. GA'nın akış diyagramı

Tablo 3'te GA ile optimize edilen parametreler ve optimizasyon sınırları verilmiştir. Sınırlar rotor geometrisinin izin verdiği kadar geniş seçilmeye çalışılmıştır. Optimize edilen parametrelerden;

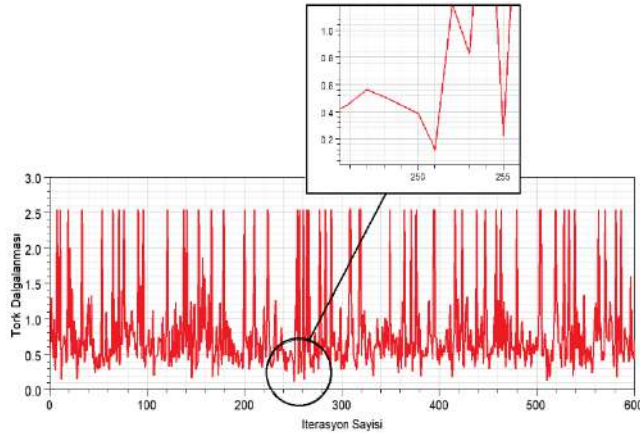
- R_b , ilk akı bariyerinin başlama çapını
- Y_0 , rotor demir bölüt genişliğini

- B0, akı bariyerinin genişliğini ifade etmektedir.

Tablo 3. GA ile optimize edilen parametreler ve sınırları

Parametreler	Optimizasyon Sınırları
Rb (mm)	12.6 – 20
Y0 (mm)	2 – 12
B0 (mm)	2 – 12

GA ile optimizasyon süreci Şekil 4'te gösterilmiştir. Toplam 600 iterasyon boyunca en düşük tork dalgalanması 251'inci iterasyonda elde edilmiştir. Optimize edilen parametrelerin yeni değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

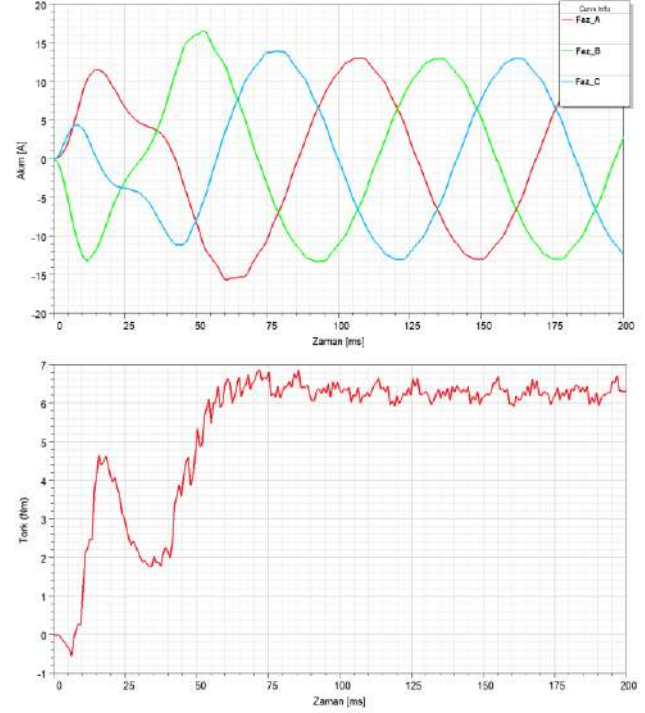


Şekil 4. GA ile yapılan optimizasyon sürecinde elde edilen tork dalgalanması grafiği

Tablo 4. Optimize edilen parametrelerin yeni değerleri

Parametreler	Başlangıç Değerleri	Yeni Değerler
Rb (mm)	15	15.5
Y0 (mm)	7	2.11
B0 (mm)	7	6.27

Şekil 4'te görüldüğü üzere GA kullanılarak optimize edilen parametreler SynRM'nin tork dalgalanmasını yakından etkilemektedir. Optimize edilen parametreler ile tasarlanan SynRM'nin yeni tork dalgalanması %11,9'a kadar düşürülmüştür. Diğer analiz sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.

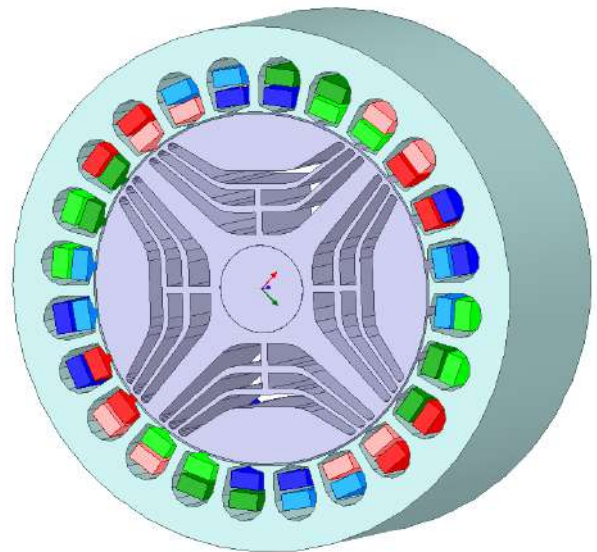


Şekil 5. Optimizasyon Sonrası Akım ve Tork Grafiği

Şekil 5'te görülen grafikler incelendiğinde yeni SynRM'nin tork dalgalanması %11,9, torkun rms değerinin 6.25 Nm ve akımın rms değerinin 9.26 A olduğu görülmektedir. Elde edilen grafikler incelendiğinde optimizasyon sonrasında tork ve akım değerleri çok değişmeden, tork dalgalanmasının %66,1'den %11,9'a kadar düşürülmüştür.

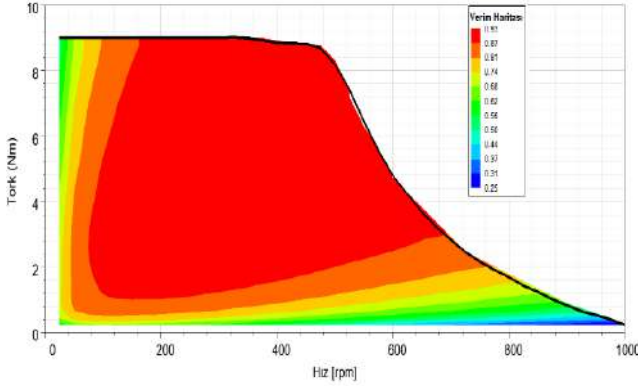
4. Tasarlanan SynRM'nin performansı

SynRM'nin rotor parametrelerini GA kullanılarak optimize etmek, SynRM'nin daha düşük tork dalgalanması üretmesini sağlamıştır. Optimize edilen parametreler ile tasarlanan SynRM'nin yapısı Şekil 6'da verilmiştir.

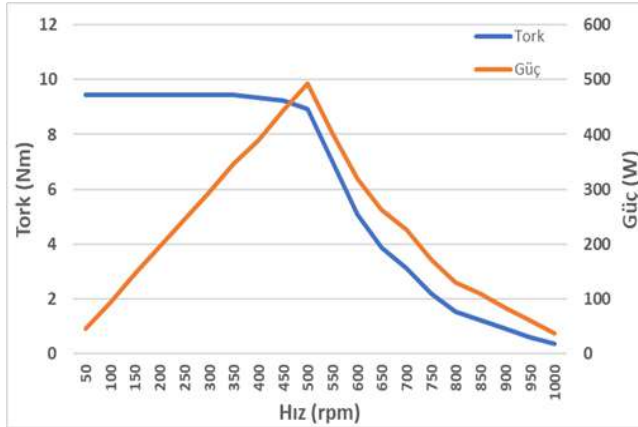


Şekil 6. Tasarlanan SynRM'nin Yapısı

Tasarlanan SynRM'nin genel performansı Ansys Maxwell paket programında Machine Toolkit eklentisi yardımı ile analiz edilmiştir. Bu eklenti sayesinde tasarlanan motor 0-1000 rpm arasında simüle edilmiştir. Tasarlanan SynRM'nin verim haritası ve tork-güç-hız grafikleri elde edilmiştir. Şekil 7'de SynRM'nin verim haritası verilmiştir. Görüldüğü üzere Tasarlanan SynRM çok geniş bir alanda %93 gibi yüksek bir verimlilik sağlamaktadır. Şekil 8'de tasarlanan SynRM'nin tork-güç-hız grafiği verilmiştir.



Şekil 7. Optimize Edilen SynRM'nin Verim Haritası



Şekil 8. Optimize Edilen SynRM'nin Tork-Güç-Hız Grafiği

Şekil 8'de görüldüğü üzere parametreleri optimize edilen SynRM'nin performansı simüle edildiğinde 360 rpm hıza kadar sabit 9.45 Nm tork ürettiği görülmektedir. En yüksek gücü 500 rpm'de sağlamaktadır. Elde edilen Şekil 5, Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde tasarlanan SynRM'nin Tablo 1'deki hedeflenen kriterleri sağladığı görülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada mikro-mobilite sınıfı araçlar için SynRM'nin tasarımı ve optimizasyonu sunulmuştur. Mikro-mobilite sınıfı araçların elektrik motorlarının karşılaması gereken uygun tork değeri, uygun tork dalgalanması, hız ve verim gibi bazı gereksinimler vardır. Ansys Maxwell paket programının başlangıç

değerleri ile yapılan SynRM tasarımı bu değerlerin bazılarını karşılayamamıştır. Hedeflenen değerleri karşılayabilmek için GA ile SynRM'nin parametrelerinde optimizasyon yapılmıştır. GA ile optimize edilen parametreleri kullanarak yapılan SynRM tasarımı, hedeflenen kriterleri başarıyla karşılamıştır.

6. Kaynaklar

- [1] H. Güldür, F. Karaçor, S. Hatipoğlu Ve M. K. Çubuk, "A New Mode of Urban Transportation: E-scooter and Suggestions for Application Türkiye," Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt 8, pp. 60-73, 2022.
- [2] S. Koyuncu, U. Tuncer, A. Dalcalı ve S. Öncü, "External Rotor 6/8 Switched Reluctance Motor Design for E-Bike," 10th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, pp. 131-135, 2021.
- [3] A. K. Mishra, B. S. Rajpurohit ve R. Kumar, "Revampment of urface permanent magnet synchronous motor design for ameliorated torque profile in e - mobility applications," IET Electrical Systems in Transportation, pp. 99-108, 2020.
- [4] L. Shao, A. E. H. Karci, D. Tavernini, A. Sorniotti ve M. Cheng, "Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review" IEEE Access, cilt 8, pp. 116900-116913, 2020.
- [5] M. F. Demir ve H. Kaymaz, "Traction Motor Type Selection for Electric Car," International Periodical of Recent Technologies in Applied, cilt 2, no. 1, pp. 35-41, 2020.
- [6] W. Cai, X. Wu ve M. Zhou, "Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles,"Automot. Innov., cilt 4, pp. 3-22, 2021.
- [7] P. Uglielmi, "Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples," IEEE Transactions on Industry Applications, cilt 48, no. 6, pp. 2322-2332, 2012.
- [8] J. D. Widmer, R. Martin ve M. Kimiabeigi, "Electric Vehicle Traction Motors Without Rare Earth Magnets," Sustainable Materials and Technologies, pp. 7-13, 2015.
- [9] M. Murataliyev, M. Degano, M. D. Nardo, N. Bianchi ve C. Gerada, "Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison," Proceedings of the IEEE, cilt 110, no. 3, pp. 382-399, 2022.
- [10] M. Sanada, K. Hiramoto, S. Morimoto ve Y. Takeda, "Torque ripple improvement for synchronous reluctance motor using asymmetric flux barrier arrangement," 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.
- [11] N. Bianchi, S. Bolognani ve D. B. a. M. D. Pre, "Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted," IEEE Transactions on Industry Applications, cilt 45, no. 3, pp. 921-928, 2009.
- [12] P. Lazari, J. Wang ve B. Sen, "3-D Effects of Rotor Step-Skews in Permanent Magnet-Assisted

- Synchronous Reluctance Machines,” IEEE Transactions on Magnetics, cilt 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [13] J.-C. Son, J.-M. Ahn, J. Lim ve D.-K. Lim, “Optimal Design of PMA-SynRM for Electric Vehicles Exploiting Adaptive-Sampling Kriging Algorithm,” IEEE Access, cilt 9, pp. 41174-41183, 2021.
- [14] D. B. Herrera, E. Galvan ve J. M. Carrasco, “Synchronous reluctance motor design based EV powertrain with inverter integrated with redundant topology,” %1 içinde IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 2015.
- [15] D. Herrera, J. Villegas, E. Galván ve J. M. Carrasco, “Powertrain EV synchronous reluctance motor design with redundant topology with novel control,” IET Electric Power Applications, cilt 13, no. 11, pp. 1647-1659, 2019.
- [16] K. Man, K. Tang ve S. Kwong, “Genetic Algorithms,” Springer London, 1999.
- [17] Z. Yang, F. Shang, I. Brown ve M. Krishnamurthy, “Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications,” IEEE Transactions on Transportation Electrification, cilt 3, no. 1, pp. 245-254, 2015.