

Elektrikli Motosiklet İçin Fırçasız Doğru Akım ve Asenkron Motorun Karşılaştırmalı Analizi: Tasarım, Performans ve Optimizasyon

Hakan KAHVECİ^{1*}, Furkan Muhammed KIRIKCI², Ömür AKYAZI³

Öz

Elektrikli motosikletler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldırmada önemli bir adım olmaları nedeniyle literatürde büyük bir öneme sahiptir. Literatürde, asenkron motorlar (ASM) basit tasarımları, düşük üretim maliyetleri ve dayanıklılıklarıyla; fırçasız doğru akım motorlar (FDAM) ise yüksek verimlilik, tork yoğunluğu ve hassas hız kontrol özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. FDA motorların, tekerlek içi (hub motor) uygulamalarda kullanılabilmesi elektrikli motosikletlerde güç aktarım organlarına duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Özellikle dıştan rotorlu FDA motorlar ise yüksek tork yoğunluğu ve üstün soğutma özellikleri sayesinde literatürde popüler bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada, bir elektrikli motosikletin fiziksel kuvvet hesaplamalarına dayalı olarak (2.2-2.3) kW çıkış gücünü sağlayabilecek ASM ile dıştan rotorlu FDAM tasarımları, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanan ANSYS Electronics-Maxwell programında gerçekleştirilmiştir. Motorların hız, verim ve tork parametreleri değerlendirilmiş, ayrıca 2D-Maxwell ortamında akı yoğunlukları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar (%91.14 verim; 50.5 Nm; 11.067 kg), motosiklet uygulamasında FDA motorun üstün olduğunu göstermektedir. Genetik algoritma kullanılarak yapılan optimizasyon ile FDAM'ın istenmeyen Cogging torkunda azalma gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme, aynı nüve ve sargı malzemeleri referans alınarak yapılmıştır. Çalışmada, motor tasarım ve optimizasyon yöntemlerinin sunulması literatüre ve uluslararası yarışmalara önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fırçasız Doğru Akım Motor, Asenkron Motor, ANSYS Maxwell, Optimizasyon, Cogging Tork, Elektrikli Motosiklet.

Comparative Analysis of Brushless Direct Current and Induction Motor for Electric Motorcycle: Design, Performance and Optimization

Abstract

Electric motorcycles are significant in the literature as they are an important step in eliminating dependence on fossil fuels. In the literature, asynchronous motors (ASM) stand out with their simple design, low production costs and durability, while brushless direct current motors (BLDC) stand out with their high efficiency, torque density and sensitive speed control characteristics. The ability to use BLDC motors in in-wheel (hub motor) applications eliminates the need for powertrains in electric motorcycles. In particular, external rotor BLDC motors continue to be a popular research topic in the literature due to their high torque density and superior cooling properties. In this paper, based on the physical force calculations of an electric motorcycle, the external rotor BLDC motor designs with ASM which can provide (2.2-2.3) kW output power are carried out in ANSYS Electronics-Maxwell program using Finite Element Method (FEM). The speed, efficiency and torque parameters of the motors are evaluated and the flux densities are analyzed in a 2D-Maxwell platform. The results (%91.14 efficiency; 50.5 Nm; 11.067 kg) obtained show that the BLDC motor is advantageous in the motorcycle application. With the optimization using genetic algorithm, the undesired Cogging torque of the FDAM was reduced. The evaluation is based on the same core and winding materials. The presentation of motor design and optimization methods in this paper makes significant contributions to the literature and international challenge.

Keywords: Brushless Direct Current Motor, Asynchronous Motor, ANSYS Maxwell, Optimization, Cogging Torque, Electric Motorcycle.

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, hknkahveci@ktu.edu.tr

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, mfurkankirikci@ktu.edu.tr

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, oakyazi@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

21. yüzyılda, çevresel sürdürülebilirliğin artırılması amacıyla fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaya yönelik çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Fosil yakıtlardan elde edilen ısı enerjisini kinetik enerjiye dönüştüren içten yanmalı motorların çevresel zararları hem endüstride hem de akademide yeni adımların atılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu adımların sonucunda, elektrik motorlarının tasarımı, üretimi ve kullanımı kritik bir öneme sahip olmuştur. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha düşük işletim maliyetlerine ve daha yüksek konfor seviyesine sahiptir (Yaşa., 2023). Bu çalışmada, ulaşımdaki trafik sorununu azaltma potansiyeline sahip ve kullanımı giderek artan elektrikli motosiklet için motor tasarımı ve seçimine ilişkin bir yöntem ele alınmıştır.

Elektrikli motosiklet için motor tasarımı yapılırken, bireysel kullanıcı koşulları (kuvvetler, hız, kütle, boyutlar ve menzil vb.) göz önünde bulundurulmalıdır. Bu koşullar altında, asenkron motor (ASM) ile fırçasız doğru akım motorun (FDAM) tasarımı ele alınacaktır.

ASM alternatif akım gerilimini indüksiyon ile hareket enerjisine çeviren elektrik makinesidir. Yük altında devir sayısını koruması, bakım periyodunun uzun ve üretim maliyetinin düşük olması gibi avantajları bulunurken, hassas hız aralığı kontrolünün zor ve kontrol ünitesinin pahalı olması ulaşımda kullanılabilirlik alanını sınırlar.

FDAM stator sargılarında oluşan manyetik alanın rotor üzerindeki kalıcı mıknatıslarla etkileşimi sayesinde enerji dönüşümünü gerçekleştiren elektrik makinesidir. Yüksek güç/hacim ve ivmelenme/güç oranı, düşük bakım masrafı ve kompakt tasarım gibi avantajları bulunurken, yüksek üretim maliyeti ve karmaşık kontrol sistemleri gerektirmesi kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir (Gieras., 2009). Ayrıca motorun ön veya arka tekerleğin göbeğine yerleştirilmesinden dolayı Hub motor olarak adlandırılan bu sistemler; montaj kolaylığı sağladığından dolayı bir bisikletin elektrikli hale dönüştürmesi daha basit ve kolay olduğu için tercih edilmektedir (Aydın ve ark., 2023).

Asenkron motorlar alternatif akım ile çalıştığından dolayı invertere (DA>AA), geometrik modelinden dolayı güç aktarım sistemlerine ihtiyacı vardır. FDAM ise doğru akım kaynağı ve sürücüsü ile güç aktarım sistemlerine ihtiyaç duymadan çalışabilir. Ancak, sensör ile yazılım desteğine ihtiyacı vardır (Husain ., 2003).

Üç faz, 4 kutup, 30 kW sincap kafesli asenkron motorun rotor oluk ölçüleri ile stator ve rotor çaplarında yapılabilecek bir değişiklik; Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analiz edilip; motor verimi ve maliyetini optimize edebilir (Nakhaei ve Roshanfekar ., 2021). Çalışmada genetik algoritma kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sonuçlar ekonomik çıktılar ile ilişkilendirilmiştir.

ASM'nin stator sargı malzemesi değiştirilerek motor performansı optimize edilebilir (Prakash ve Perumallapalli ., 2024). 415 Volt, 50 Hz, 75 C° yüklenme parametrelerine sahip ASM'nin sargı

ham maddeleri (Ag, Al, Be, Cu, Mg, W, Zr) değiştirilerek değerlendirme yapılmıştır. Nüve malzemesi steel_1010; sargı hammaddesi gümüş (Ag) olarak belirlendiğinde %90.377 verim, 23.579 kg kütle, 79.6834 Nm kırılma momenti ve 0.884616 ileri güç faktörü ile çalışmanın en iyi motoru elde edilmiştir.

Stator sargılarının spiral ve halkalı sarılması ile elde edilen ASM'lerin tasarım sonuçları verilmiştir (Tikhonova ve ark., 2017). Sonuçlar, 2 kutuplu ASM'de stator sarımlarının halkalı yapılmasının farklı kayma değerlerinde motor momentini azalttığını göstermektedir.

Ocak ve Yenipınar, hafif elektrikli araçlar için ASM tasarımı yaparak prototip üretmişlerdir (Ocak ve Yenipınar ., 2021). ASM, sekiz farklı hız-yük koşulları altında test edilmiştir. Tasarımda %87.21, üretimde ise %88.41 verim elde edilmiştir. IC 410 sınıf soğutma ile çıkış gücünün %84'ü kadar sürekli güç elde edilmiştir.

ASM motorun performansını arttırmak için yapılan farklı bir çalışmada yeni bir soğutma sistemi önerilerek, motorların verimliliğinin ve kullanım ömrünün artması sağlanmıştır (Tören ve Mollahasanoğlu., 2021).

Elektrikli araçlarda ASM ve FDAM haricinde anahtarlama relüktans motorları da (ARM) kullanılmaktadır (Gecer ve ark., 2021). ARM, FDAM ve ASM'nin aynı güç/hacim oranında ANSYS RMxprt ve 2D Maxwell'de analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ARM'nin en yüksek tork ve dalgalanması değerlerine; FDAM'ın ise verim, manyetik dağılım ve boyut açısından en iyi sonuçlara sahip olduğunu göstermektedir.

Akar ve arkadaşları, 1.5 kW dıştan rotorlu bir elektrikli araç motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Akar ve ark ., 2021). 48 Volt, 680 RPM, 51 oluk/46 kutup konstrüksiyon parametreleri baz alınarak tasarlanan motordan 21.07 Nm tork ile %86 verim elde edilmiştir. Motor, 10 inç janta hub olarak monte edilmiştir.

Çabuk ve arkadaşları, 2.5 kW dıştan rotorlu bir elektrikli araç motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Çabuk ve ark ., 2019). 150 Volt ve 900 RPM parametreleri baz alınarak tasarlanan motor üzerinde farklı sarım teknikleri denenmiş olup, yarım kalıp-konsantrik yapıda en iyi sonuç elde edilmiştir. Analiz sonuçları (29.2484 Nm Tork, %90 Verim) ile üretim sonuçları birbirine yakın değerlerdedir.

Literatürde elektrik motorlarının klasik tasarımının yanı sıra eksenel akılı tipte de tasarımı oldukça artmıştır. Nugraha ve arkadaşları, 5 kW dıştan rotorlu bir elektrikli scooter motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Nugraha ve ark ., 2018). 50.9 Volt, 5000 RPM, 12 oluk/8 kutup konstrüksiyon parametreleri baz alınarak tasarlanan motor ile 9.5 Nm tork ve %94.49 verim elde edilmiştir.

Hsiao ve Htet, Taguchi yöntemi ve Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) gibi optimizasyon teknikleri kullanarak FDAM'ın tasarım ve performans iyileştirmelerine yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir (Hsiao ve Htet ., 2024). Çalışmada 26 W FDA elektrikli fan motoru referans alınmıştır. Bu yöntemlerle yapılan optimizasyon sonucunda çıkış gücünde 10 Watt'lık bir artış ve

maksimum torkta 0,032 Nm’lik bir iyileştirme elde edilmiştir. Ayrıca, referans tasarıma kıyasla enerji verimliliği %15 oranda artırılmıştır.

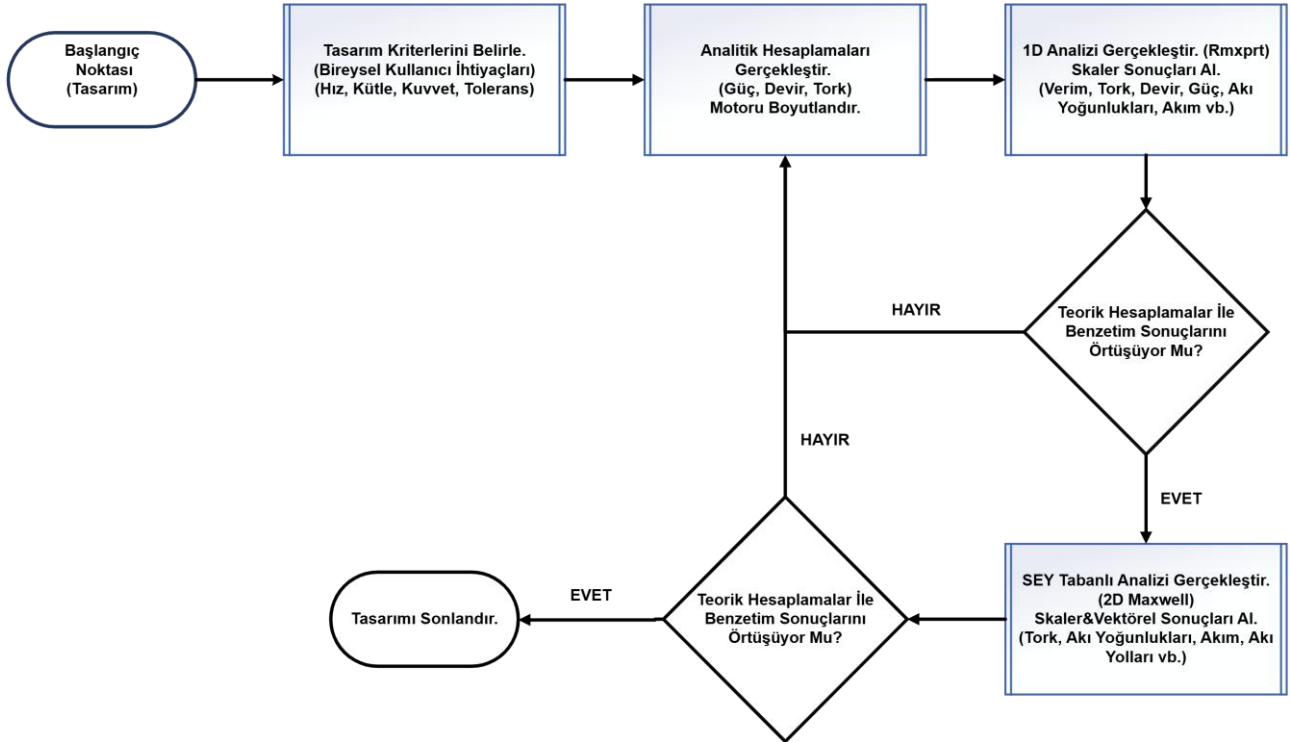
Mandasari ve arkadaşları, V şeklindeki FDAM’ın stator eğik açılarının Cogging torku üzerine etkisini incelemiştir. SEY kullanılarak yapılan çalışmada, eğik açının artırılmasının Cogging torkunu önemli ölçüde azalttığını ve motor verimliliğini artırdığını gösterilmiştir. Eğik açının 10° artırılması Cogging torkunda yaklaşık %72’lik bir azalma; 15° artırılmanın ise Cogging torkunu neredeyse ortadan kaldırdığı görülmektedir (Mandasari ve ark ., 2024).

ANSYS Electronics benzetim programında, FDAM tasarımına dair örnek bir çalışma verilmiştir (Dusane ., 2016).

Elektrik motorlarının tasarımında yapılması gereken ilk adım, motorun bireysel kullanım ihtiyaçları ile enerji tüketimini belirlemektir. Motosikletin belirlenen bir hızda gidebilmesi için ihtiyaç duyduğu güç miktarı, karşılaması gereken kuvvetlerin toplamı ile bulunabilir (Long ve ark ., 2013).

Motorun vereceği güç, boyutlar, elektriksel ve manyetik zorlanması (tork) ile dakikadaki devir sayısına bağlıdır (Boduroğlu ., 1994). Bulunan güç ve belirlenen hız değerleri ile motorun tasarım ölçüleri hesaplanabilir. Hesaplamadan sonra yapılacak analiz ile motor performans verileri üretim yapılmadan önce tahmin edilebilir, bulunabilir.

Şekil 1’de, elektrik makinelerinin ANSYS Electronics programı aracılığıyla tasarımına dair akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. Elektrik makineleri tasarım adımları (ANSYS Electronics)

Bu çalışmada elektrikli motosiklet için gücü hesaplanan ASM ve FDAM'ın karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. ASM ve FDAM'ın kullanıldığı uygulama, stator nüve malzemesi (M19_29G), sargı malzemesi (bakır) ve hava aralığı (1 mm) eşit alınmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına dayanarak, uygun olan motosiklet motoru için ANSYS Optimetrics arayüzünde, PoleEmbrace tasarım parametresi bazlı genetik algoritma kullanılarak Cogging tork düşürülmüştür. PoleEmbrace değeri motorun performans, maliyet ve verimine bağlı olarak alt ve üst sınırlar arasında seçilen bir katsayıdır. Tasarım parametresi olan PoleEmbrace'in sınırları parametrik analiz yöntemiyle belirlenmiştir.

Materyal ve metot bölümünde motor ölçülerine ait eşitlikler verilmiştir. Motorların sargı tasarımları ANSYS'de yer alan Auto-Design kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Auto-Design, belirlenen Setup değerlerine (Hedef Motor Verileri) göre arka planda Maxwell denklemlerini kullanarak en uygun değerleri belirleyen yazılımdır. Tasarımlara ait detaylı eşitlikler literatürde verilmiştir (Boduroğlu ., 1994; Hendershot ., 2010).

Bulgular bölümünde ise eşitliklerle (1-19) belirlenen ölçüler kullanılarak ASM ve FDAM için Rmxprt (1D) ile Maxwell (2D) çıktıları verilmiştir. Sonuçlar bölümünde ise motorların tork, hız, verim, akım ve manyetik akı dağılım verileri değerlendirilmiş, performansları uygulama bazlı tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

ASM ve FDAM tasarımı şekil 1'deki adımlardan oluşmaktadır. Çalışma teorik benzetim ortamında yapılmıştır. Motor ölçüt ve hedef tasarım verileri piyasada yer alan ürünler referans alınarak belirlenmiştir.

2.1. Tasarım Hedeflerinin Belirlenmesi – Motosiklet Parametreleri

Elektrik motoru tasarımında yapılacak ilk adım, toplam çıkış gücü, devir/dakika ve torkun belirlenmesidir. Eşitlik 1'de ASM ve FDAM'ın kullanıldığı motosikletin üstesinden gelmesi gereken kuvvetlerin toplamı ile bulunan motor çıkış gücü verilmiştir (Dusane ., 2016). Eşitlik 1'de verilen yuvarlanma direnci (F_R) eşitlik 2'de; hava direnci (F_A) eşitlik 3'te; eğim direnci (F_G) eşitlik 4'te sırasıyla verilmiştir. Eşitlik 5'te hedeflenen nominal tork verilmiştir.

Tablo 1'de araca ait kütle bilgisi verilmiştir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı ve piyasa ürünleri araştırması sonucunda, düz yolda bulunan motosikletin yapabileceği sınır hız (v_M) 40 km/s; 11.111 m/sn olarak belirlenmiştir (URL-1). Tablo 2'de ise eşitliklerde (2-4) yer alan parametreler verilmiştir.

Tablo 1. Araç kütle bilgileri

Parametre	Değer (kg)
Gövde (Şase)	30-40
Elektrik Motoru	10-20
Elektrik Sistemi	5-10
Batarya	15-25
Sürücü (Tahmini)	80-110
Toplam Kütle	140-205

$$P_{toplam} = (F_R + F_A + F_G) \times v_M \quad (1)$$

$$F_R = f \times m_g \times \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_A = C \times S \times \frac{\rho}{2} \times \left[\frac{v_M}{3.6} \right]^2 \quad (3)$$

$$F_G = m_g \times \sin \alpha \quad (4)$$

$$T_{yük} = T_{nominal} = \frac{P_{çıkış} \times 60}{2 \times \pi \times N_{RPM}} \quad (5)$$

Tablo 2. Eşitlik parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	f	0.013 (Karel ., 2011)
Motosiklet Ağırlığı	m_g	1569.6 N
Hava Direnci Katsayısı	C	0.6 – 1.2
Araç Ön Yüzey Alanı	S	0.782 m ²
Hava Basıncı	ρ	1.326 Kg/m ²

Eşitlikler (2-4), tablo 1 ve 2 verileri alınarak toplam güç (eşitlik 1) 2173 Watt bulunmuştur. ASM ve FDAM'ın hedef güç aralığı 2.2-2.3 kW olarak belirlenmiştir. Elektrik motorlarının devir sayısı, frekans ve kutup sayısı ile belirlenir. FDAM'ın (32 kutup) nominal hızı 430 devir / dakika, ASM'nin (4 kutup) ise 1450 devir / dakika belirlenmiştir. Eşitlik 5'e göre FDAM'ın hedef tasarım torku 48.257 Nm, ASM' ise 14.310 Nm hesaplanmıştır.

Sistemin batarya gerilimi 72 Volt belirlenmiştir. Elektrikli motosikletlerde genellikle 48 Volt bataryalar tercih edilse de 72 Volt tercih edilmesinin nedeni gerilimin artmasıyla birlikte akımın düşmesidir. Akımın düşmesi, motorun enerji kayıplarını azaltarak verimliliği artırırken, güç elektroniği ekipmanlarının daha düşük akım değerlerinde seçilmesine imkân tanır. Bu durum, ürün

maliyetlerini düşürür ve anahtarlama kayıplarını azaltır. Sonuç olarak, 72 Volt batarya kullanımı sayesinde sistem verimliliği ve menzile artar.

2.2. Elektrik Motorlarının Genel Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Motosikletin tasarım hedefleri belirlendikten sonra, uygulama sınırları içerisindeki elektrik motor boyutlarının hesaplanması gerekir (Hendershot ., 2010). Elektrik motorunun tasarım hedefleri (Boyutsal sınırlar, verim, kutup sayısı, hedeflenen akı yoğunlukları, mıknatıs, nüve ve sargı malzemeleri vb.) belirlenmelidir. ASM ve FDAM'ın dış çapları için 155-255 mm sınır, %86-92 verim aralığı ve M19_29G nüve malzemesi belirlenmiştir.

İlk olarak motorun birim hacmindeki hava aralığı moment değerinin (TRV) seçilmesi gerekir (Erdoğan ve ark ., 2024). Makinelerin kullanım amacı, performansı, gücü gibi değerlere bağlı olan TRV değeri (kN/m^3) eşitlik 6'da verilmiştir (Hendershot ., 2010). D stator dış çap (mm), L fiktif uzunluk (mm), p ise kutup çifti sayısıdır. Eşitlik 7'de makinenin maliyet, tasarım ve kalite faktörüne bağlı seçilen φ katsayısı; eşitlik 8'de ise τ_p kutup adımı verilmiştir (URL-2).

$$TRV = \frac{T_{nominal}}{\frac{\pi \times D^2 \times L}{4}} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{L}{\tau_p} \quad (7)$$

$$\tau_p = \frac{\pi \times D}{2 \times p} \quad (8)$$

Eşitlikler (5-8) ile ASM ve FDAM'ın stator dış çap ve fiktif uzunlukları sırasıyla 155/128 mm; 227/50 mm bulunmuştur. Dış çap ve uzunluk bulunduktan sonra stator ve rotor nüve parametreleri belirlenmelidir.

2.3. Fırçasız Doğru Akım Motorun Boyutlandırılması

FDAM'ın kutup (mıknatıs) sayısı tork, titreşim ve gürültü, frekans ve verim parametreleri göz önünde bulundurularak 32 seçilmiştir. FDAM tasarımında hedef, yüksek tork değeri elde etmektir. Elektrik makinelerinde giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü manyetik alan aracılığıyla sağlanır. Makine verimini parçaların akı yoğunluğu değerleri doğrudan etkiler. Makine boyutları belirlenirken

akı yoğunluğu değerlerinin kontrol edilmesi tasarımın önemli bir adımıdır. Tablo 3'te makinelere göre akı yoğunluğu değerleri verilmiştir (Pyrhonen ., 2013).

Stator dış çap bulunduktan sonra rotor iç çap ve dış çap tablo 3'e göre program yardımıyla bulunabilir. Ancak rotor tasarımında boyutlandırmayı etkileyen temel nokta mıknatısların seçimi ve boyutlarıdır (Hanselman ., 2006). Literatürde belirtilen NdFe türü mıknatıs seçilmiştir (Tören ve Mollahasanoğlu ., 2023). Eşitlik 9'dan mıknatısların kalınlığı (t_M); eşitlik 10'dan ise hava aralığı (δ) bulunabilir. B_R mıknatısların kalıntı akı değeri olup, teknik formdan bakılabilir. B hedef akı ise literatürden bulunmaktadır (Boduroğlu ., 1953). Statorda indüklenen trapezoidal gerilimin 120 derece sabit kısmında makine DA (doğru akım) makinesi karakteristiği gösterdiğinden dolayı tablo 3'te verilen DA makinesi parametreleri FDAM için de kullanılabilir.

Tablo 3. Uygun akı yoğunluk değerleri (Tesla)

Parça	Asenkron Makine	DA Makine
Hava Aralığı	0.7 – 0.9	0.6 – 1.1
Stator Nüve	1.4 – 1.7	1.1 – 1.5
Stator Dış	1.4 – 2.1	1.6 – 2.0
Rotor Nüve	1 – 1.6	1 – 1.5
Kutuplar	-	1.2 – 1.7

$$B = B_R \times \frac{t_M}{t_M + \delta} \quad (9)$$

$$\delta = 0.2 + 2 \times \sqrt{D \times L} \quad (10)$$

FDAM dıştan rotorlu olarak tasarlandığından, rotorun iç çapı hava aralığına bağlı olarak bulunmaktadır. Eşitlik 11'de statorun iç çapı; eşitlik 12'de stator oluklarının yüksekliği (t_b); eşitlik 13'te ise A_{hava} verilmiştir. FDAM'ın stator oluk ölçüleri belirlenirken 2 koşulun göz önünde bulundurulması gerekir: Slotların doluluk oranının en fazla %75 olabileceği ve tablo 3 akı yoğunluğu değerleri.

Eşitlik 12'nin yüksek olması slotların doluluk oranını düşüreceğinden dolayı sargı çapının artmasına ve kaynak akımının artmasına neden olur. Düşük bir değer alması ise olukların manyetik akı doygunluğuna ulaşmasına neden olur.

$$D_{S_{iç}} = D_{S_{dış}} - 2 \times (t_{boyunduruk} + t_{yuva}) \quad (11)$$

$$t_{boyunduruk} = \frac{\Phi_{Rotor}}{B_{stator} \times L} \quad (12)$$

$$A_{hava} = \pi \times D_{R(d_{l\dot{s}-i\dot{c}})} \times L \quad (13)$$

Embrace, FDAM'ın rotorunda yer alan mıknatısların (kutupların) genişliği ile doğru orantılıdır. Bu değerin Cogging torkuna doğrudan etkisi bulunmaktadır. Yüksek verim ve düşük maliyet göz önüne alınarak 0.8 değeri belirlenmiştir. Cogging torkunun azaltılması amacıyla Optimetrics arayüzü ile iyileştirme çalışması gerçekleştirilecektir.

MATLAB tabanlı meta-sezgisel algoritmalar, sıralı türev tabanlı lineer olmayan programlama, Quasi Newton, pattern search ve genetik algoritma ANSYS Optimetrics arayüzünde kullanılabilir. Bu çalışmada, PoleEmbrace tasarım parametresine bağlı olarak Cogging torku genetik algoritma ile azaltılmıştır. Genetik algoritmanın tasarım parametresinin sınırlarının belirlenmesi ve karşılaştırma amacıyla parametrik analiz yöntemi kullanılmıştır. PoleEmbrace'in alt ve üst sınırları 0.40 ile 0.825 alınmıştır.

Parametrik analiz sistemin farklı parametre değerleri ile nasıl tepki vereceğini belirleyerek en uygun çözümün bulunmasında yardımcı olur. Genetik algoritma ise doğa temelli bir optimizasyon tekniği olup, Cogging torkunu minimize etmek için en uygun embrace değerini bulmayı amaçlar. Genetik algoritma doğada bulunan kromozomların evrimleşmesi ilkesi ile çalışan gen tabanlı optimizasyon yöntemidir (John ., 1992).

Genetik algoritmanın birey sayısı 30 belirlenmiştir. Seçilim için rulet seçim yöntemi kullanılmış ve seçilim baskısı 10 ayarlanmıştır. Pareto sekmesinde, hayatta kalan birey sayısı 10'dur. Yeni nesil için her bir nesilde 30 birey hedefi belirlenmiş, algoritmanın çalışması 50 nesil ile sınırlandırılmıştır. Algoritmanın çalışma süresi ise 1 saatle sınırlıdır. Yavaş yakınsama durumunda da algoritma durdurulacaktır.

2.4. Asenkron Motorun Boyutlandırılması

Asenkron motorlar indüksiyon prensibiyle çalıştığından dolayı akının kaynağı olan statorun tasarımı ilk adımdır. Literatürde tasarım kaynakları mevcuttur (Boldea ., 2020).

Eşitlik 14'te asenkron motorun genel güç ifadesi ana boyutlara bağlı verilmiştir. D_i stator iç çap; L_i fiktif uzunluk, n_s devir sayısı; C ise Esson katsayısını (faydalanma) temsil eder. Gerçek makine uzunluğu, havalandırma ve izolasyon koşulları altında fiktif uzunluktan büyüktür. Literatürde D_i , motor gücüne göre referans alınabilir (Nürnberg ., 1952).

$$P_s = C \times D_i \times L_i \times n_s \quad (14)$$

Esson katsayısı, motorun birim hacminden elde edilen güç değerini verir. Eşitlik 15'te Esson katsayısının ampirik denkliği verilmiştir. Eşitlikte yer alan, B_{ort} (hava aralığındaki ortalama akı değeri) eşitlik 16'da, a_c (elektriksel yüklenme) eşitlik 17'de verilmiştir. Eşitlik 16'da bulunan $\emptyset$

değeri ve tablo 3'e göre stator nüve kalınlığı ayarlanabilir. K_w ise sargı faktörü olarak verilmiştir. Eşitlik 18'de ise stator oluklarının akı değeri (B_s) verilmiştir. Eşitlikte, w_{ts} diş genişliğini ve s oluk sayısını temsil eder (Apaydın ve ark ., 2022).

$$C_0 = 1.1 \times \pi^2 \times B_{ort} \times a_c \times K_w \times 10^{-3} \quad (15)$$

$$B_{ort} = \frac{2 \times p \times \phi}{\pi \times D_i \times L_i} \quad (16)$$

$$a_c = \frac{I \times Z}{\pi \times D_i} \quad (17)$$

$$\frac{B_s}{B_{ort}} = \frac{\pi \times D_i}{w_{ts} \times s} \quad (18)$$

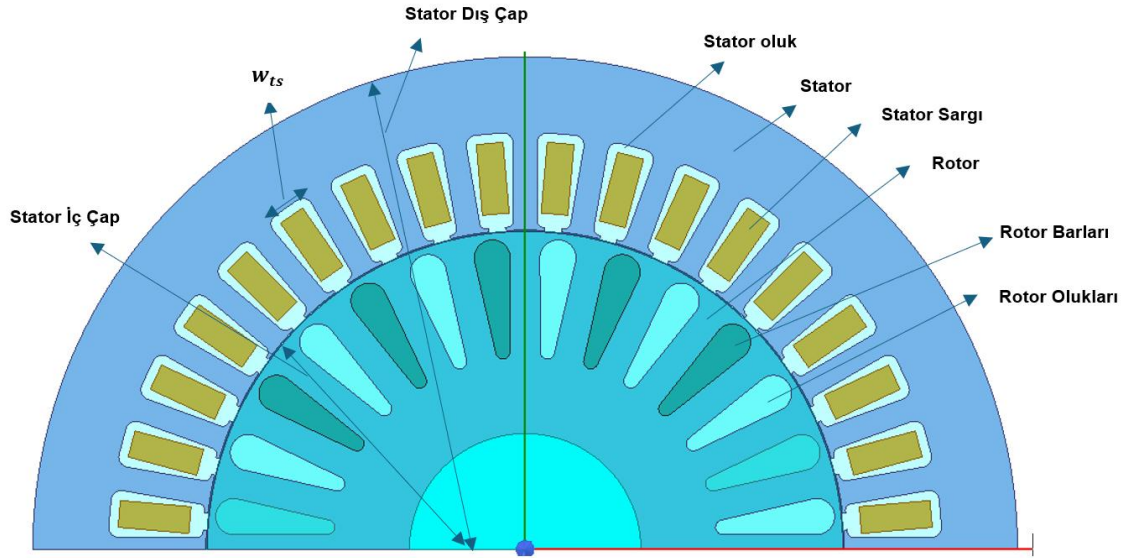
Stator çap ve oluklara dair parametreler bulunduktan sonra diğer oluk parametreleri ampirik formüller veya program yardımıyla bulunabilir (Boduroğlu ., 1994). Parametre tasarımında tablo 3'ün göz önünde bulundurulması gerekir. Eşitlik 19'da motorun hava aralığı (δ) stator iç çapa bağlı olarak verilmiştir.

Hava aralığı bulunduktan sonra rotor dış çap ve parametreleri bulunabilir (Gürdal ., 2001). Şekil 3'te ASM'nin 2D Maxwell arayüz görüntüsü verilmiştir. Stator oluk tipi FDAM ile aynıdır. Tablo 6 ve 7'de ise ASM'ye ait tasarım parametreleri verilmiştir. Makine 36/28 oluk konstrüksiyonunda oluşturulmuştur.

$$\delta = 0.2 + \frac{D_i}{1000} \quad (19)$$

Tablo 6. ASM stator tasarım parametreleri

Bölüm	Uygun Değer (mm)
H_{S1}	1
H_{S2}	12.21
B_{S1}	5.3
B_{S2}	7.39
Kablo Çapı	1.29
Fiktif Uzunluk	227



Şekil 3. ASM (ANSYS Maxwell)

Tablo 7. ASM rotor tasarım parametreleri

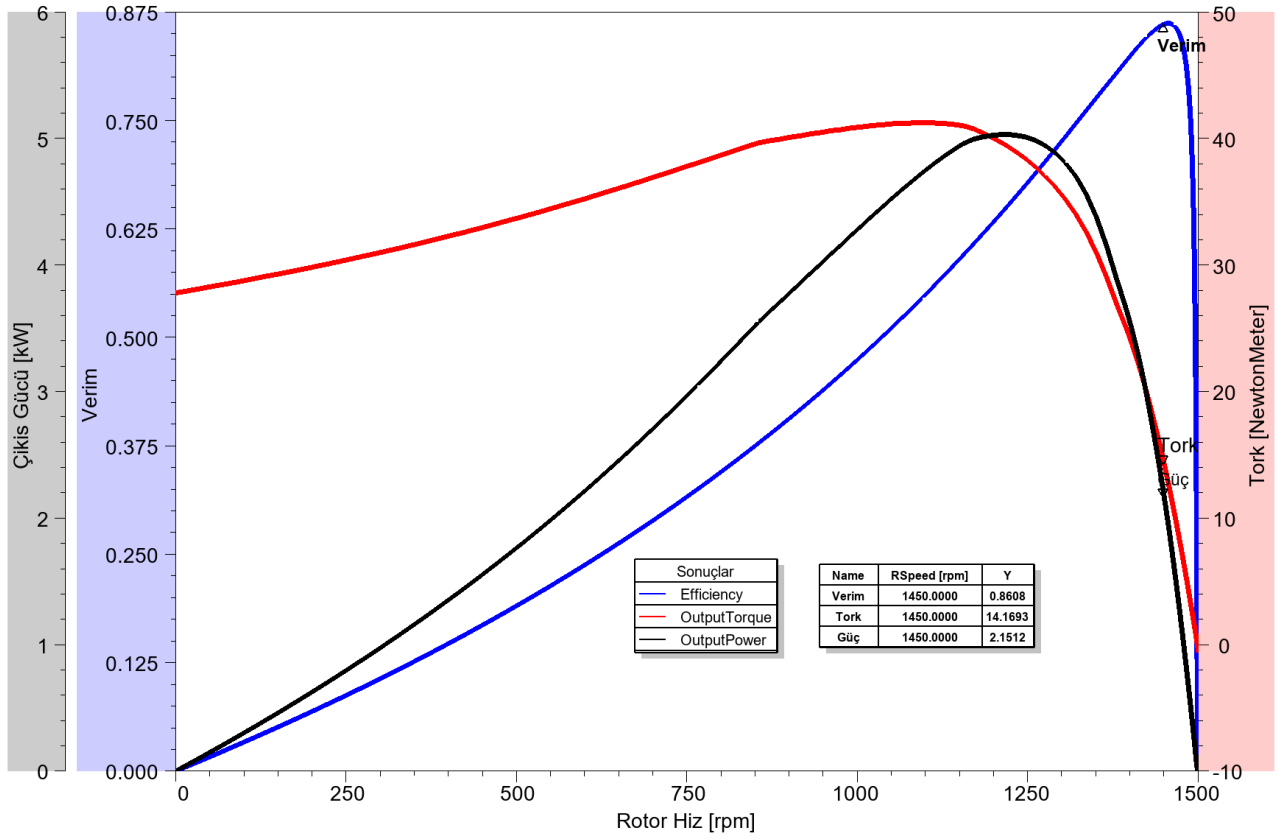
Bölüm	Uygun Değer (mm)
Bar Boyu	25
Bar Genişliği	7
Hava Aralığı	1
Dış Çap	100.2

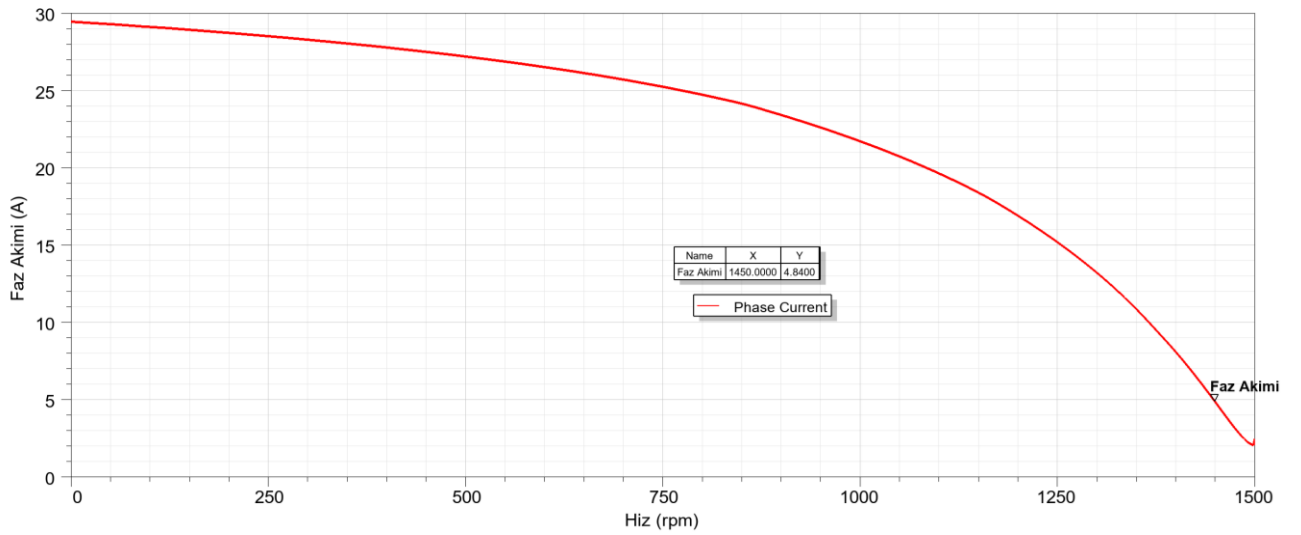
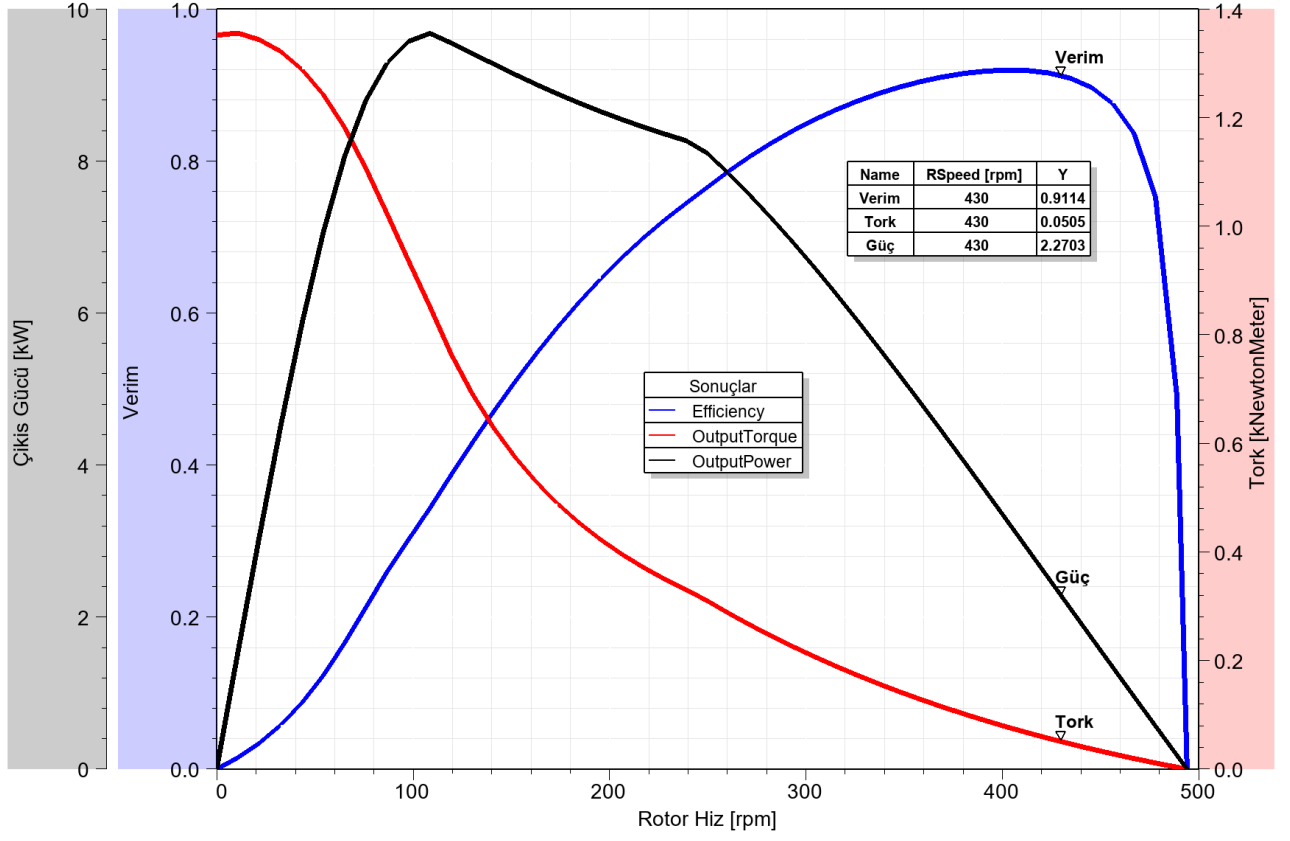
3. Bulgular ve Tartışma

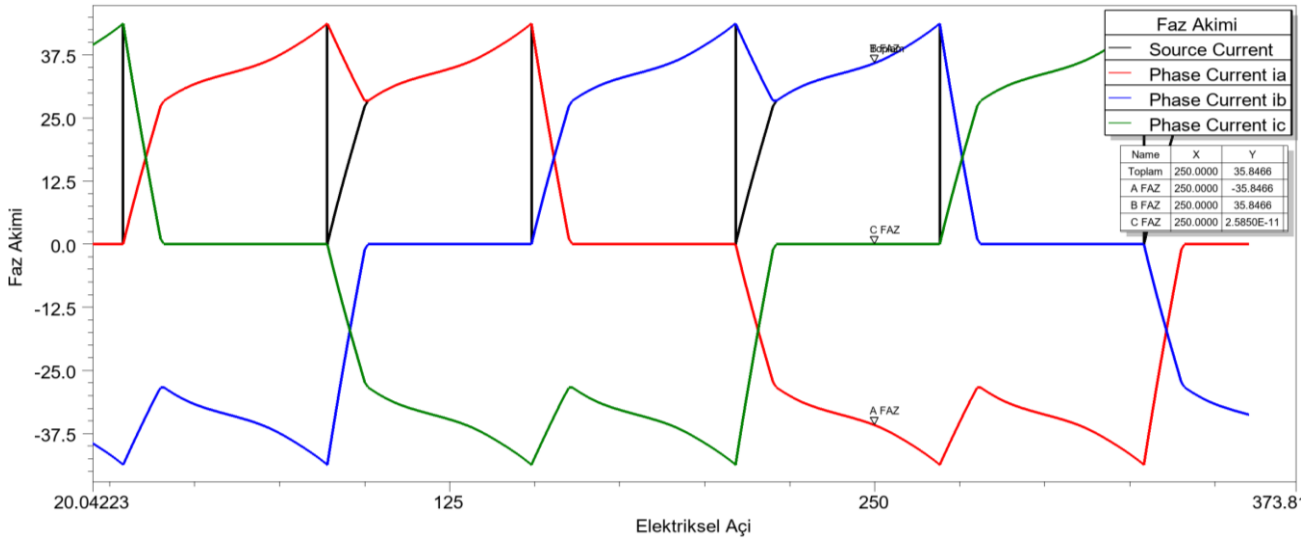
Şekil 4 ve 5'te sırasıyla ASM ve FDAM'ın Hız-(Moment, Güç, Verim) karakteristikleri verilmiştir. Şekil 6 ve 7'de ise sırasıyla ASM ve FDAM'ın hız-faz akımı grafiği verilmiştir. Tablo 8'de ASM ve FDAM'ın aynı nüve ve sargı malzemesi, stator oluk tipi ve hava aralığı referans alınarak yapılan karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. ASM ve FDAM tasarımlarının sonuçları (Tablo-8) incelendiğinde, FDAM tasarımının 11.067 kg ile daha düşük kütle, 50.5 Nm'lik yüksek tork ve %91.14 verim değerine sahip olduğu görülmüştür. İlk değerlendirmede motosiklet uygulaması için FDAM tasarımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. FDAM'ın daha düşük kütlesi ve yüksek verimliliği uygulama ihtiyaçları açısından önemli bir avantaj sağlar.

Tablo 8. ASM ve FDAM performans verileri

Sonuçlar	Birim	ASM	FDAM
Hız	(RPM)	1450	430
Çıkış Gücü	(kW)	2.151	2.270
Toplam Kayıp	(kW)	0.347	0.220
Verim	(%)	86.08	91.14
Moment	(Nm)	14.16	50.5
Stator Oluk Akı Yoğunluğu	(Tesla)	1.4654	1.8417
Stator Nüve Akı Yoğunluğu	(Tesla)	1.4207	1.1388
Rotor Nüve Akı Yoğunluğu	(Tesla)	1.4338	1.004
Faz Akımı	(Amper)	4.84	28.541
Toplam Kütle	(Kg)	15.9069	11.067

**Şekil 4.** ASM karakteristik (Hız-(Moment, Güç, Verim))





Şekil 7. FDAM faz akımı-hız grafiği

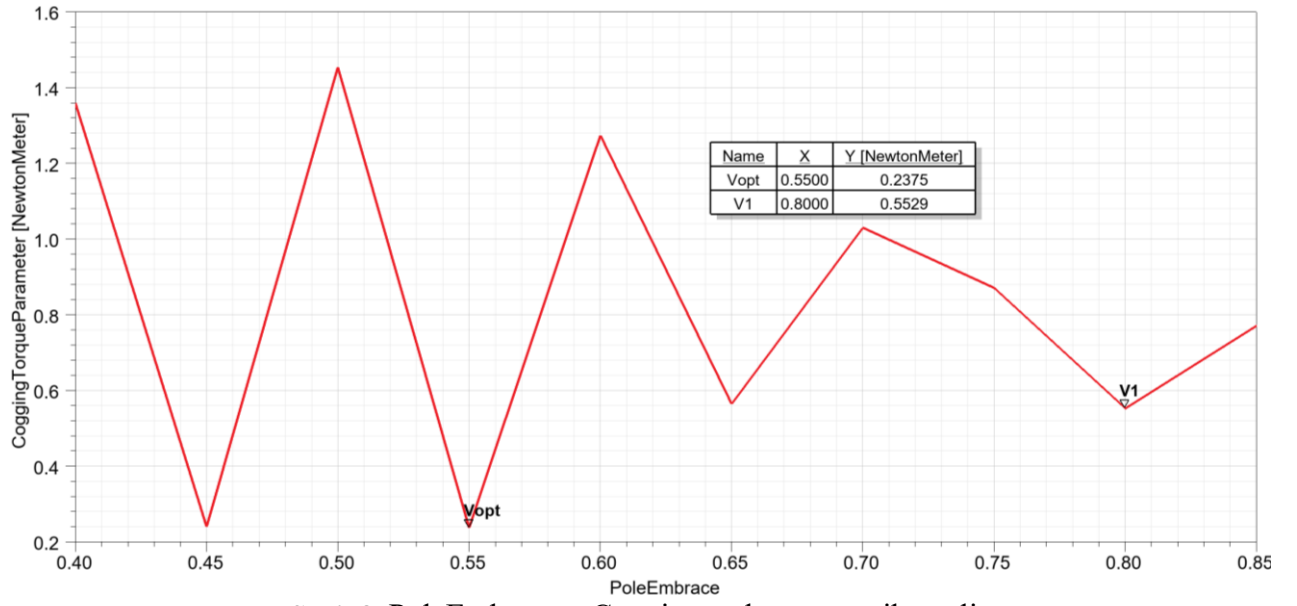
Bu çalışmada karşılaştırılan ASM ile FDAM karakteristikleri, motorların uygulama (motosiklet) bazlı performanslarını belirlemede önemli ipuçları sunar. ASM'nin elektriksel giriş gücü 2498.83 W iken, FDAM'ın 2490.673 W hesaplanmıştır. Yaklaşık güç tüketim değerlerinde, verimlilik açısından FDAM %91.14 değeri ile ASM'yi (%86.08) geride bırakmıştır.

ASM'nin momentı 14.16 Nm iken, FDAM'ın momentı 50.5 Nm ile yüksek bir değere sahiptir. Momentler arasındaki 36.34 Nm'lik fark eşitlik 5'te yer alan devir sayısından kaynaklanır. ASM'nin konstrüksiyon yapısından dolayı tork ve çektiği akım değeri sınırlanmaktadır. Şekil 6 ve 7'de ise FDAM'ın daha fazla akım çektiği görülmüştür.

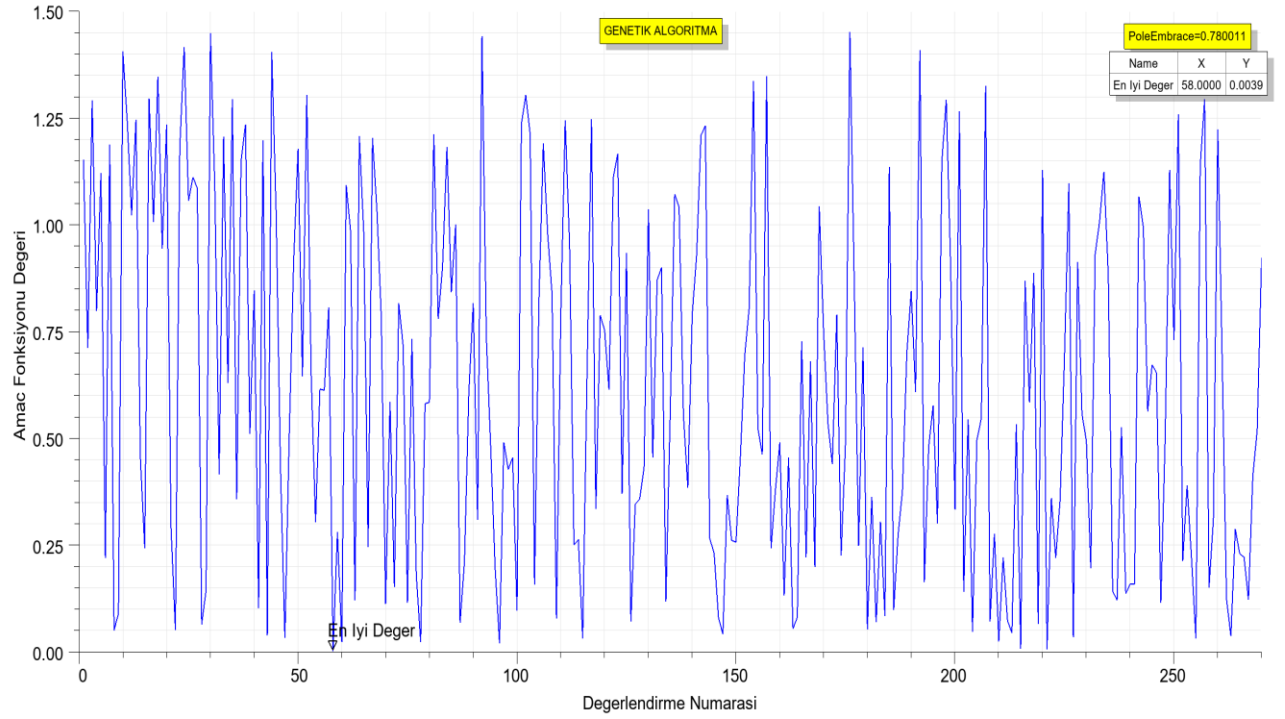
Ancak FDAM'da istenmeyen Cogging tork mevcuttur. Cogging tork, rotor kutuplarının statordaki oluklara etkisi sonucunda ters kuvvet meydana getirir. Ters kuvvet sonucunda titreşim, gürültü ve mekanik zorlanmalar meydana gelir. Uygulamadaki kullanıcı konforunu azaltmaktadır.

Cogging tork değeri ANSYS Optimetrics Genetik Algoritma ile azaltılmıştır. Tasarım parametresi olan PoleEmbrace'in parametrik analizi şekil 8'de; genetik algoritmanın amaç fonksiyonu değeri şekil 9'da verilmiştir. İlk ve optimize edilmiş tasarıma ait Cogging tork ise şekil 10'da verilmiştir.

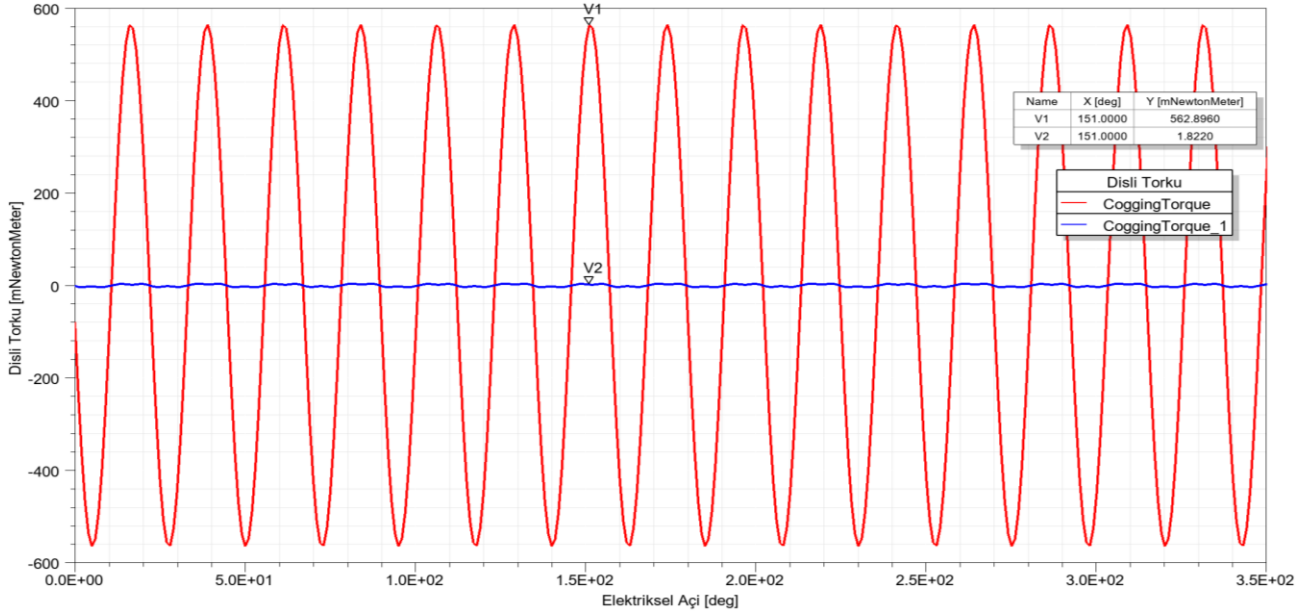
Şekil 8'de, PoleEmbrace=0.55 değerinde minimum Cogging tork (0.23 Nm) elde edilmiştir. Parametrik analiz alt ve üst sınırlar arasında artırım değerine bağlı olarak ayırık zamanlı değerlendirme yapar. Çalışmada parametrik analiz alt ve üst sınırların belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.



Şekil 8. PoleEmbrace – Cogging tork parametrik analiz



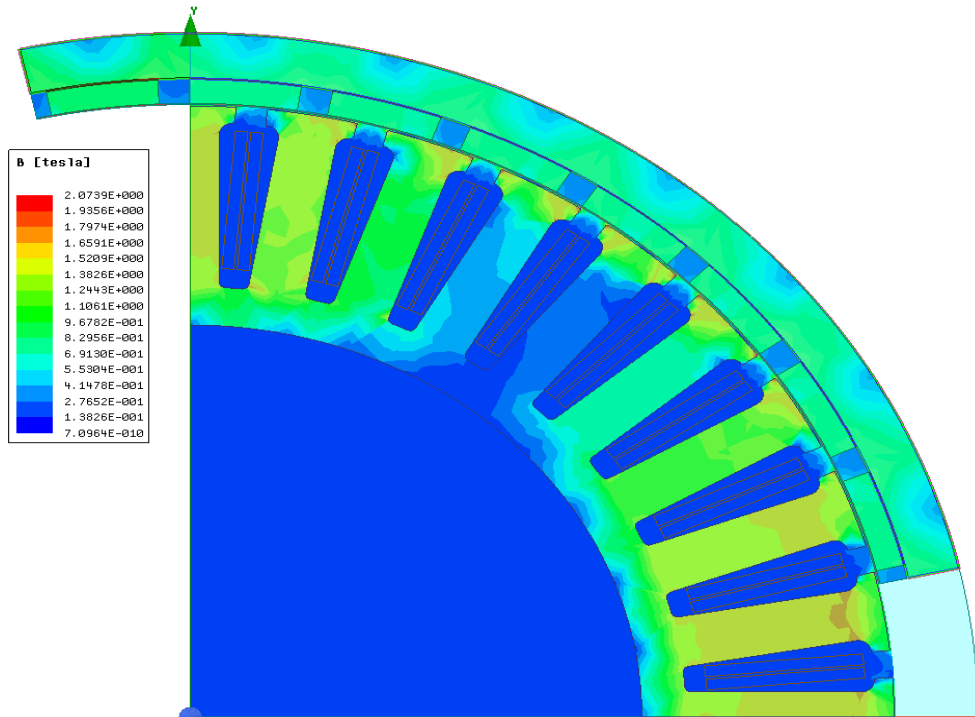
Şekil 9. Değerlendirme numarası – amaç fonksiyonu değeri (Genetik Algoritma)



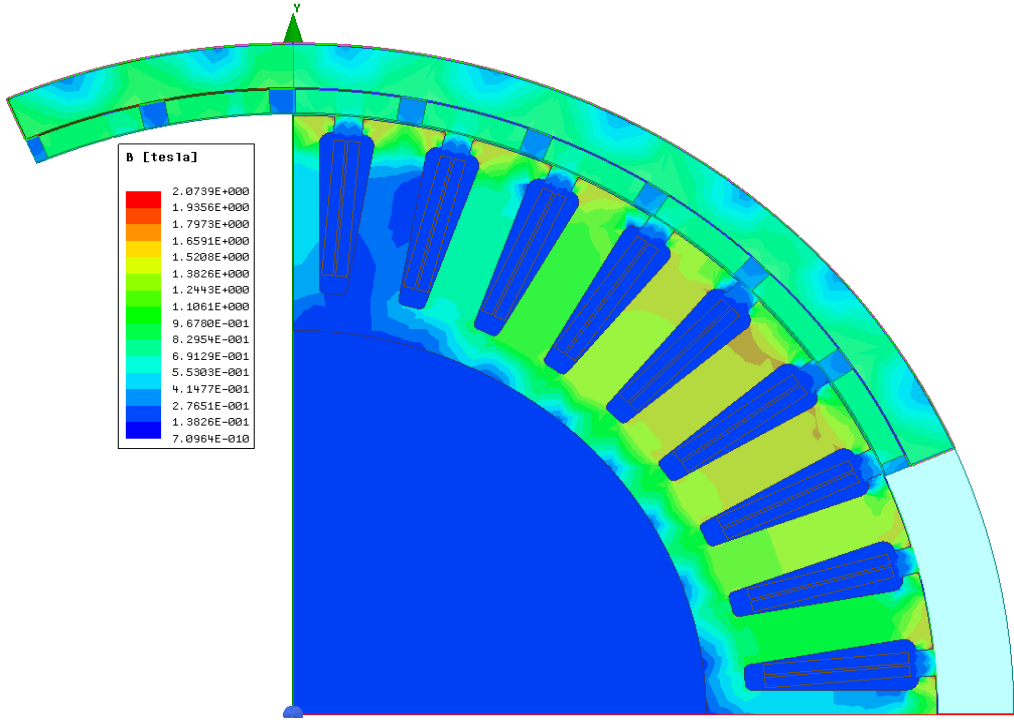
Şekil 10. Optimizasyon çalışması – Cogging tork

Şekil 11 (PoleEmbrace=0.8) ve Şekil 12’de (PoleEmbrace=0.780011) 2D Maxwell transient analizine göre 0.5 saniyedeki FDAM konumu gösterilmiştir. Cogging torkundaki azalma akı yoğunluğunun homojen dağılımı ve rotor konumu ile doğru orantılıdır.

Çalışmanın konusu sürekli zamanlı mühendislik problemi olduğundan dolayı, aynı yöntemi kullanan genetik algoritmadaki Cogging tork azalması daha fazladır.

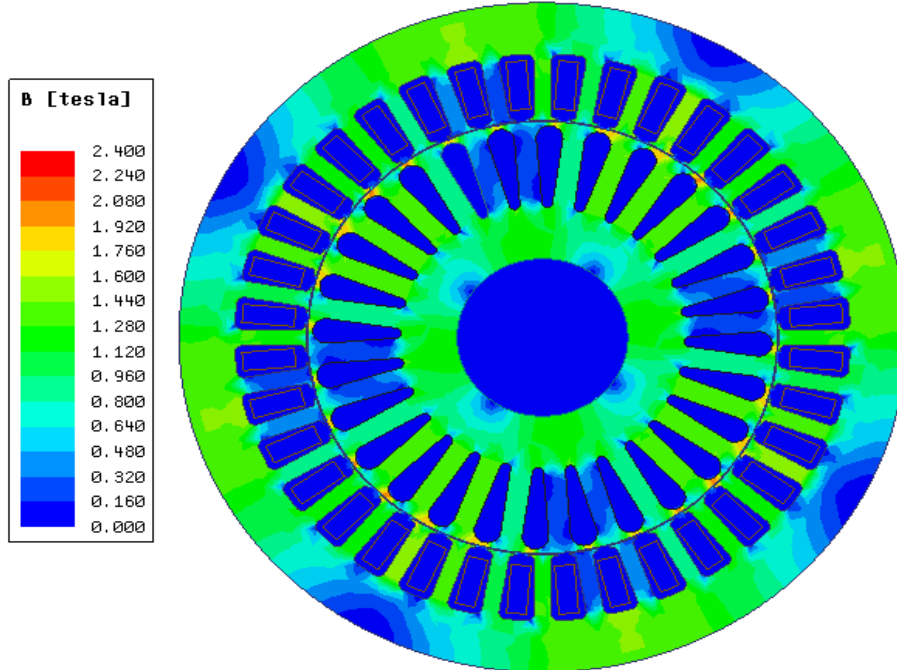


Şekil 11. PoleEmbrace = 0.8 (FDAM 2D Maxwell)



Şekil 12. PoleEmbrace = 0.780011 (FDAM 2D Maxwell)

Şekil 13'te ise ASM'nin 2D Maxwell transient analizinin akı yoğunluğu görüntüsü verilmiştir. Şekil 11, 12 ve 13 incelendiğinde tablo 3'teki hedef akı yoğunluğu değerlerine uygun olarak stator nüve akı yoğunluğunun sağlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 13. 2p=4, 36/28 Motor (ASM 2D Maxwell)

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motoru ile asenkron motorun karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Oluşturulan bu modellerin, ANSYS Maxwell RMxpert ve Maxwell 2D program arayüzünde benzetimi gerçekleştirilmiştir. Verim, çıkış torku, çıkış gücü ve Cogging tork gibi çeşitli parametreler ile gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler belirtilen motosiklet uygulaması için yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışması sonucunda;

- FDAM tasarımında belirlenen yüksek tork hedefi doğrultusunda, düşük devir elde edilmiştir. Sistemin yüksek tork yoğunluğuna sahip olması için gereken çalışma koşulları sağlanırken, aynı zamanda geniş bir hız kontrol aralığında etkili bir performans sergilemesi mümkündür. FDAM'ın şekil 5 karakteristik grafiği de bu geniş hız aralığında kontrolün sağlanabilmesini destekleyen önemli bir kanıttır.

- 2490 Watt giriş gücü olan FDAM, ASM'den (2498 W) daha fazla çıkış gücü sağlayarak verim performansını ortaya koymuştur. FDAM'ın enerji kaybı daha az olduğundan dolayı ısı kayıpları azdır.

- FDAM, dıştan rotorlu olarak tasarlandığı için dönen rotor doğrudan tekerleğe monte edilebilir. Bu nedenle güç aktarım organına ihtiyaç duymaz. Asenkron motorlarda ise mil bağlantısı olduğundan dolayı güç aktarım organı zorunludur. Ayrıca asenkron motorun kapalı bir konstrüksiyona sahip olması nedeniyle soğutma fanlarına ihtiyaç varken, FDAM'ın tekerlek içi montajı açık bir şekilde yapılabilir ve kanallar aracılığıyla aldığı hava ile soğutma sağlanabilir. Ek bir soğutma sistemine ihtiyacı olmayabilir.

- FDAM tasarımında belirlenen hedef doğrultusunda elde edilen yüksek tork değeri motosikletin daha yüksek eğimli yollarda kullanılabilirlik oranını artırmaktadır.

- FDAM'ın güç/kütle oranının daha yüksek olması yarışmalar ve endüstriyel ürünlerde önemli bir avantaj sağlar.

Yukarıdaki maddeler göz önüne alındığında, FDAM'ın sunduğu hız kontrol aralığı ve düşük devir sayısı motosiklet hızını ASM'den daha verimli bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Ayrıca güç aktarım sistemine duyulan ihtiyacın ortadan kalkması motosiklet maliyetini düşürür. FDAM daha az enerji kaybı ve düşük ısınma ile daha yüksek verimliliğe sahiptir. ASM'deki fan-soğutma gibi sisteme ihtiyaç duymaz. FDAM'ın düşük kütle ve devir sayısı ile yüksek verimlilik ve tork üretme kapasitesine sahip olması elektrikli motosiklet uygulamalarının performansını artırmaktadır.

FDAM'ın ASM'ye uygunluğu kanıtlandıktan sonra, motorun uygulama bazlı optimize edilmesi için iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Bu iyileştirmelerden biri, kullanıcı konforunu olumsuz etkileyen Cogging torkunun minimize edilmesidir.

Cogging torku, boyutsal ölçüler, malzeme seçimi ve PoleEmbrace değerine bağlıdır. Motor tasarımı, sürekli zamanlı bir mühendislik problemi olduğu için doğru optimizasyon yönteminin seçilmesi kritik öneme sahiptir. Genetik algoritma veya metasezgisel algoritmalar kullanmak, en uygun çözümü elde etmek için etkili bir yaklaşımdır (Şekil 9-10).

ASM tasarımında belirlenen hedeflere göre uygulama bazında dayanıklılık, basit tasarım ve üretim maliyeti gibi avantajları bulunmasına rağmen, motosiklet performansını sağlayan tork ile kolay ve hassas hız kontrolünün zor olduğu sonucuna ulaşılmıştır. FDAM'ın bu konuda uygun olduğu gösterilmiştir.

Literatürde ASM ile aynı stator konstrüksiyonuna sahip senkron relüktans motorların (SRM), FDAM ile yakın sonuçlar verebileceği gözlemlenmiştir. FDAM'ın dezavantajı olan mıknatıs maliyetini incelemek için, üretim maliyeti/performans bazlı yeni bir ikili motor kıyaslaması gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

Yazarların haricinde katkısı olan bulunmamaktadır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akar, M., Eker, M., & Akın, F. (2021). BLDC Motor Design and Application for Light Electric Vehicle. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(2), 326-336. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.889877>
- Apaydın, H., Kara, O., & Serteller, N. F. O. (2022). Investigation of the efficiency improvement on a 1.1 kW three-phase asynchronous motor. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 7(2), 58-66.
- Aydın, İ., Mengi, O. Ö., & Arslan, S. (2023). Farklı Oluk/Kutup Oranlarına Sahip Sıralı Kutuplu Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Analizi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1117-1134. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1296266>
- Boduroğlu, T. (1953). *Elektrik makinaları dersleri:(teori, hesap ve konstrüksiyon)*. Teknik Üniversite Matbaası.
- Boduroğlu, T. (1994). *Elektrik makinaları dersleri, cilt 2, kısım 3, asenkron makinelerin hesap ve konstrüksiyonu*. Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş.
- Boldea, I. (2020). *Induction Machines Handbook: Transients, Control Principles, Design and Testing*. CRC press.
- Buhr Karel, V. P. (2011). *Analysis of the electric vehicle with the BLDC PM motor in the wheel body*. Prague.
- Çabuk, A. S., Sağlam, S., & Üstün, Ö. (2019). Farklı sargı yapılarının tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 1975-1986. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.571649>
- Dusane, P. M. (2016). *Simulation of a brushless DC motor in ANSYS-Maxwell 3D* (Master's thesis). Czech Technical University in Prague, Prague.
- Erdoğan, G., Taşkın, Y., & Tiryaki, H. (2024). HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DÜŞÜK ÇALIŞMA GERİLİMİNDE İÇ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 1243-1256. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1146133>
- Gecer, B., Tosun, O., Apaydın, H., & Oyman Serteller, N. F. (2021). Comparative analysis of SRM, BLDC and induction motor using ANSYS/Maxwell. 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICECCME52200.2021.9591010>
- Gieras, J.F. (2009). *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, Third Edition (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429292736>
- Gürdal, O. (2001). *Elektrik makinalarının tasarımı*. Atlas Yayın Dağıtım.
- Hanselman, D. (2006). *Brushless permanent magnet motor design*. Ohio: Magna Physics Publishing.
- Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (2010). *Design of brushless permanent-magnet motors*. Motor Design Books LLC.
- Hsiao, C. Y., & Htet, S. M. (2024). Multi-Step Design Optimization for the Improvement of an Outer-Rotor Brushless Direct Current Motor. *Applied Sciences*, 14(10), 4302.
- Husain, I. (2003). *Electric and hybrid vehicles design fundamentals*. New York: CRC Press.
- John, H. (1992). Holland. genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1), 44-50.
- Long, B., Lim, S. T., Ryu, J. H., & Chong, K. T. (2013). Energy-regenerative braking control of electric vehicles using three-phase brushless direct-current motors. *Energies*, 7(1), 99-114.
- Mandasari, D. R., Sudiarto, B., Amelia, L., & Suryandi, A. A. (2024). Reducing Cogging Torque in V-Shaped BLDC Motors: A FEA Simulation Study on the Impact of Skew Angle. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 23(1), 64-74.
- NAKHAEI, M. R., & ROSHANFEKR, R. (2021). Optimal Design of 3-phase Squirrel Cage Induction Motors Using Genetic Algorithm Based on the Motor Efficiency and Economic Evaluation of the optimal Model. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(1), 59-68.
- Nugraha, Y. U., Yuniarto, M. N., Herizal, H., Asfani, D. A., Riawan, D. C., & Wahyudi, M. (2018). Design analysis of axial flux permanent magnet BLDC motor 5 kW for electric scooter application. 2018 *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 163-168. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2018.8711225>
- Nürnberg, W. (1952). *Die Asynchronmaschine*. Springer: Berlin.
- Ocak, C., & Yenipınar, B. (2021). Hafif Elektrikli Araçlar için Asenkron Motor Tasarımı ve Uygulaması. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi* (26), 228-233. <https://doi.org/10.31590/ejosat.949092>

- Prakash, T. S. S. S., & Perumallapalli, K. (2024). Performance analysis of an induction motor using Ansys Maxwell RMxpert for various materials (Steel_1010, Ag, Al, Be, Cu, Mg, W, and Zr). *2024 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SCES61914.2024.10652456>
- Pyrhonen, J. (2013). *Design of Rotating Electrical Machines* (Vol. 1). Wiley-VCH.
- Tikhonova, O., Malygin, I., & Plastun, A. (2017). Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by “ANSYS Maxwell.” *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076294>
- Toren, M., & Mollahasanoglu, H. (2021). Investigation of thermoelectric cooler system effect on induction motor performance. *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9503049>
- Tören, M., & Mollahasanoglu, H. (2023). Investigation of the effect of different power degree NdFeB magnets used in interior permanent magnet brushless direct current motor (IPMBLDC) on motor performance. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(3), 1389-1402.
- URL-1: <https://www.unep.org.tr> , (Erişim Tarihi: 10 Ocak 2025).
- URL-2, <https://www.youtube.com/watch?v=X2q6YUGuD6U> , (Erişim Tarihi: 10 Ocak 2025).
- Yaşa, Y. (2023). Design of High-Power Density Spoke-Type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for E-Bikes. *Mühendislik Bilimleri Ve Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 264-271. <https://doi.org/10.46387/bjesr.1300653>