

Farklı Oluk/Kutup Oranlarına Sahip Sıralı Kutuplu Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Analizi

İbrahim AYDIN¹, Onur Özdal MENGİ^{2*}, Serdal ARSLAN³

Öz

Küçük veya büyük güçlü elektrikli araçlarda kullanılan kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında, en büyük maliyet kalemlerinden biri kullanılan kalıcı mıknatıslardır. Rotor yapısındaki kutuplarda kalıcı mıknatısların ve çelik malzemenin bir arada kullanıldığı sıralı kutuplu rotor yapısı incelenmiştir. Öncelikli olarak, elektrikli bisiklet için önceden tasarımı yapılan 250W giriş gücüne, 200 rpm anma hızına sahip Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru (KMFDAM)'nın bazı parametreleri temel alınarak ANSYS RMXprt programında tasarım oluşturulmuştur. Tasarımda sargı tipi olarak, bakır kayıplarının az olduğu, verimin yüksek ve motor imalatının kolay olduğu konsantrik (kesirli) çift kat sargılı yapı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı oluk/kutup sayılarında motor performans verileri ve vuru momentleri incelenmiştir. Oluşturulan bu modeller, Rmxprt ve Maxwell 2D programı yardımıyla analizi gerçekleştirilmiştir. Bu motorların, farklı sarım sayıları ve farklı kutup yayı oranlarında 4 farklı oluk/kutup modelinin geleneksel ve sıralı kutup yapıları için dikkate alınmıştır. Ayrıca vuru momenti analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda geleneksel ve sıralı kutup yapılarında vuru momenti en küçük olduğu modeller tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fırçasız Doğru Akım Motoru, Sıralı Kutup, Ansys Maxwell, Elektrikli Bisiklet.

Analysis of Consequent-Pole Brushless DC Motors with Different Slot/Pole Ratios

Abstract

One of the biggest cost items in permanent magnet brushless dc current (PMBLDC) motors used in small or large power electric vehicles is permanent magnets used. The consequent-pole rotor structure in which permanent magnets and steel material are used together in the poles of the rotor structure has been examined. First of all, a design was created in the ANSYS RMXprt program based on some parameters of a BLDC with 250W input power and 200 rpm rated speed, which was previously designed for the electric bicycle. As the winding type in the design, analyzes were carried out by using a concentric (fractional) double-coil structure with low copper losses, high efficiency and easy motor manufacturing. Engine performance data and cogging moments were investigated in different slot/pole numbers. These models were analyzed with the help of Rmxprt and Maxwell 2D program. These motors have been considered for conventional and consequent pole structures of 4 different slot/pole models with different winding numbers and different pole arc ratios. In addition, cogging moment analyzes were made. As a result of these analyzes, the models with the smallest cogging moment in conventional and consequent pole were determined.

Keywords: Brushless DC Motor, Consequent Pole, Electric bicycle

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Giresun, Türkiye, ibrahim.aydin@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Giresun, Türkiye, onur.ozdal.mengi@giresun.edu.tr

³Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi MYO Elektrik Programı, Şanlıurfa, Türkiye, serdalarслан@harran.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-1027-5230>

²<https://orcid.org/0000-0001-5669-0766>

³<https://orcid.org/0000-0002-1187-5633>

1. Giriş

Günümüzde halen fosil kaynaklı yakıtların kullanımının devam etmesi ve bu rezervlerinin dünya üzerinde zamanla azalması enerji birim fiyatlarını arttırmaktadır. Bu tür yakıtların kullanımı sera gazı emisyonlarının artmasına ve beraberinde küresel ısınmayla birlikte iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Bu durum ülkeleri daha çevreci araçlar üretmeye ve kullanmaya yönlendirmiştir. Gelişen teknolojiyle birlikte dizel ve benzin gibi fosil yakıtı kullanan bu araçların yerini hibrit (benzin-elektrik) ve elektrikli araçlar almaya başlamıştır.

Elektrikli araçlardan olan elektrikli bisikletler, engebeli ve düz gibi çeşitli arazi şartlarından kullanılabilmesi, küçük olması, park sıkıntısının yaşanmaması, kalabalık şehirlerde kolayca hareket ederek trafik sıkışıklığını azaltmaya yardımcı olması gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca bakım maliyetinin az olması ve sürücünün sağlığını korumaya yardımcı olması gibi birçok faydasından dolayı kullanımı her geçen gün artmakta ve doğa dostu araç pazarındaki payı büyümektedir.

Elektrikli bisikletlerin sürülmesinde elektrik motorları büyük bir öneme sahiptir. Elektrikli bisikletlerde Fırçalı Doğru Akım Motoru veya FDAM kullanılır. Fırçalı Doğru Akım Motorları fiyat olarak FDAM'na göre daha ucuzdur. Ancak FDAM'nun sessiz çalışması, bakım maliyetinin ucuz ve küçük boyutlarda olması gibi avantajlardan dolayı bu motorlar tercih edilir. 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.

Özbey ve ark. dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorunun güç, gerilim, anma hızı, tekerlek çapı, sabit mıknatıs, oluk doluluk oranı vb. parametrelerin aynı olmasına özen göstererek 24/18, 24/20, 36/24, 36/28 ve 36/30 oluk/kutup kombinasyonları değişimlerinin motorda meydana gelen bakır ve demir kayıpları ile verim üzerindeki etkilerini Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanmak suretiyle incelemiştir. Benzetim sonuçlarını karşılaştırdıklarında diğer modellere göre, 24/20 oluk kutup oranına sahip modelin veriminin daha yüksek olduğu ve toplam kaybın diğerlerine göre düşük olduğunu göstermişlerdir (Özbay ve ark., 2017).

Analitik modele dayalı olarak 2D parametrik yaklaşım yöntemi kullanılarak elektrikli araçlar için tekerlek içi dıştan rotorlu 6 kW/60V'luk FDAM motor tasarımının Simplorer/Maxwell Co-Simulation Multifizik yaklaşımı ile yapılan analizinde, devir sayısı, sarım alanı ve stator kutup yüksekliği gibi tasarım özellikleri SEY kullanılmak suretiyle motorun performansı incelenmiştir (Uygun ve ark., 2015). Bu yeni tasarımı, Protean Company tarafından tasarlanan ve üretilen ticari bir tekerlekli elektrikli motorla karşılaştırmışlar ve tasarımın tekerlek jantı ile kampanalı fren muhafazası arasındaki muhafazaya

yerleştirilmeye uygun olduğundan dolayı mevcut teknolojilerden farklı olduğunu göstermişlerdir (Uygun & Solmaz, 2015).

Üç fazlı dengeli, 6 kutuplu FDAM'da herhangi bir zıt Elektromotor Kuvveti (EMK) şekli için karşılıklı tork dalgalanmasını azaltmak için DSP yardımı ve Genetik Algoritma kullanarak yeni bir yöntem incelenmiştir (Chen ve ark., 2017). bu yöntemde karmaşık Fourier serisi ayrışımı veya diğer zor analizler olmadan herhangi bir geri EMK'ye uygulanabildiğini, optimum akımların kolaylıkla bulunabildiğini ve bu yönetimin karşılıklı tork dalgalanmasını iyileştirmenin basit ve etkili bir yolu olduğunu göstermişlerdir (Chen ve ark., 2017).

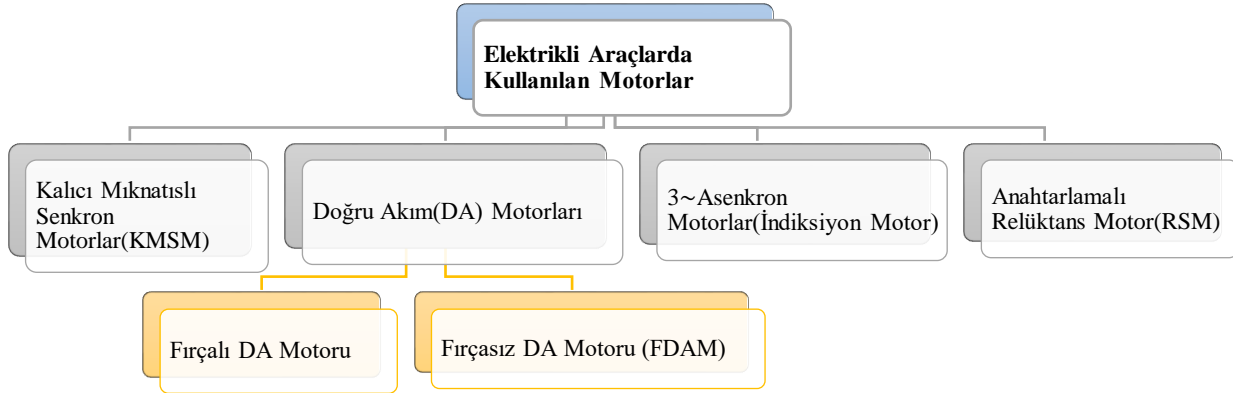
Geleneksel bir FDAM için tasarım parametreleri, manyetik özellikleri, oluk ölçüsü, faz direnci gibi çeşitli analitik hesaplamaları ve performans hesaplamaları dikkate alınarak ANSYS-Maxwell'de parametrik analiz ve optimizasyon gerçekleştirilebilir. Analitik hesaplama, 2D benzetim sonuçları, parametrik analiz, Genetik Algoritma (GA) ve test verilerinin karşılaştırılmasında; GA ile optimizasyon yönetimi uygulandığında gerçek çalışma koşullarındaki verim değerinden % 1,3 daha fazla verim elde edildiği görülmüştür (Tosun, 2021).

Üç fazlı 8 kutup ve 24 oluklu çift sargılı yüzeye monteli kalıcı mıknatıslı (YMKM) motorda 3 farklı mıknatıs şekli kullanmanın tork üzerine etkisi üzerine yapılan çalışmada; iki aşamalı bir mıknatıs kaykısı uygulamayla vurutu torkunun etkili bir şekilde azaltabildiği, sinüs biçimli mıknatısa sahip rotorda en düşük zıt EMK harmonikleri ve en düşük tork dalgalanmasına neden olsa da ortalama torku azalttığını ve mıknatıs kaykısının uygun bir kutup yayı optimizasyonu ile birleştiğinde, mükemmel tork davranışı elde edilebilmektedir(Lin ve ark., 2014).

24 oluk 8 kutuplu sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoruna getirilen yeni bir yaklaşımla; motorun maliyeti, amaç fonksiyonu ve sınırlılıklar (çap ve paket boyu) altında optimize etmek için analitik çözümü bir GA yöntemi ile birleştirilebilir. Ayrıca bu önerilen GA tekniği ile tepe tırmanma ve doğrusal arama algoritma tekniği arasında karşılaştırma yapılmıştır. GA'nın genellikle daha fazla iterasyon gerektirmesine rağmen, doğrusal arama yöntemiyle elde edilenden daha iyi sonuçlar elde edildiğini, diğer yöntemlere göre kullanılan sabit mıknatıs ağırlığında, motorun maliyetinde, demir ve bakır kayıplarında gözle görülür bir düşüş olduğunu ve verimin yükseldiğini gözlemlenmiştir (Bianchi & Bolognani, 1998; Bianchi & Bolognani, 1997).

Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere belirli parametreler ışığında FDAM üzerine ANSY Maxwell ve SEY yönetiyle yapılan analitik, simülasyon ve deneysel çalışma sonucunda, en uygun çalışma değerlerine 22,56 Nm çıkış torkunda, 635,87 d/d hızında ve 1,5 kW çıkış gücünde %87 verime ulaşıldığını, üretilen prototipi elektrikli araca entegre edildiğinde hedeflenen değerler arasında çalıştığını görmüşlerdir(Akar ve ark., 2021).

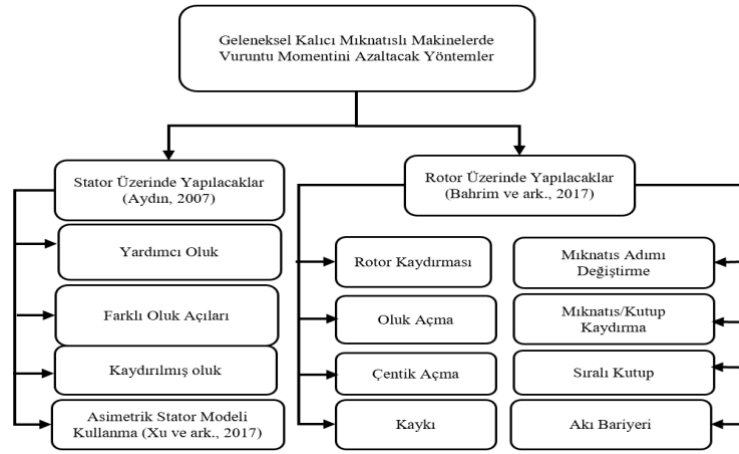
Elektrikli araçlarda ağırlıklı olarak beş temel elektrik tahrik motoru kullanılmakta olup, Şekil 1’de gösterilmektedir(Kaymaz ve ark, 2020).



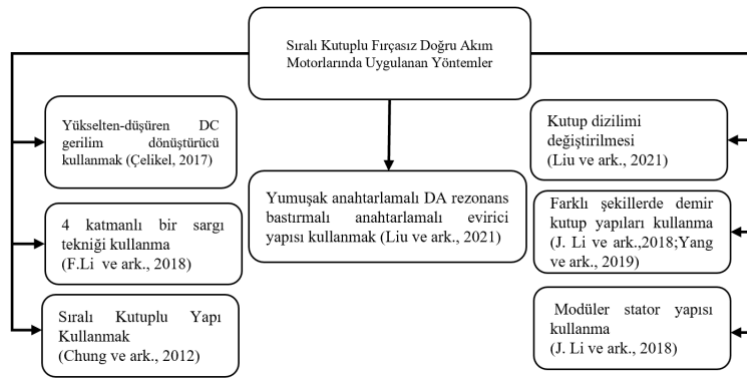
Şekil 1. Elektrikli araçlarda kullanılan motor türleri.

FDAM’ları, sabit mıknatıslı bir rotora sahip ve komütasyon işlemi elektronik olarak gerçekleşen senkron bir motordur. Doğrudan güç kaynağına bağlanarak çalıştırılmazlar. İki veya çok fazlı tipleri bulunsa da yaygın olarak üç fazlı olanları kullanılır. FDAM sargıları; yıldız veya üçgen bağlanabilmektedir. Bu motorların statorunda bulunan oluk sayısı; rotor kutup sayısına, faz sayısına ve sargı şekline (dağıtılmış veya kesirli) bağlı olarak seçilmektedir. FDAM’nun yapısı KMSM olarak da bilinen mıknatıslı Alternatif Akım (AA) motoruna benzemektedir. KMSM’da sargılar sinüzoidal olarak dağılırlar ve indüklenen EMK sinüzoidal biçiminde, FDAM’larında ise stator sargıları trapezoidal biçimde dağılır ve endüklenen emk trapezoidal biçimde olmaktadır (Akın, 2019). Sinüzoidal geri emk’ye sahip motorlar sabit tork elde edecek şekilde kontrol edilebilirken, sinüzoidal olmayan trapezoidal bir zıt emk’ya sahip motorlarda ise invertör boyutlarını küçültür ve aynı güç seviyesi için kayıpları azaltır. Stator faz sargıları DA bir kaynaktan bir mikro-denetleyici üzerinden bir evirici veya güç elektroniği devresi aracılığıyla tetiklenmesiyle çalışır. Evirici içinde bulunan ve kullanılacak olan motorun akım ve gerilim değerlerine göre MOSFET, IGBT veya transistör gibi güç anahtarları kullanılır. Bu anahtarlama elamanları rotor konumuna göre yerleştirilir ve hangi anahtarın konuma bağlı olarak ne zaman açma-kapama yapacağı hall sensörleri tarafından belirlenir. Anahtarların kontrolüyle statora uygulanan gerilim ile akımın yönü ve rotorda dönme hareketi oluşur. Statorda oluşan bu manyetik alan kutupları ile sabit mıknatıslar tarafından rotorda oluşan manyetik alan kutuplarının birbirini itmesi, zıt kutupların birbirini çekmesi sonucu dönme momenti oluşur. Dönme hareketi sonucu konumu değişen rotor sensörler tarafından algılanıp bu veri mikro-denetleyici gönderilir ve bu denetleyici yeni konuma göre hızlı bir şekilde anahtarların konumunu değiştirir ve rotor yine itme ve çekme kuvveti etkisinde kalarak rotorda dönme hareketi meydana gelir (Ulu, 2011). Ancak torktaki dalgalanmanın azaltılması elzemdir. Tork

dalgalanması veya vuruğu momenti, bir motora enerji verildiğinde bu motorun rotorunun dönüşü boyunca meydana gelen düzensiz tork üretimidir. Bu durum meydana gelen elektromanyetik alanlardaki değişimlerden ve rotor ile stator arasındaki etkileşimlerinden kaynaklanır. Geleneksel bir motorda vuruğu torkunda meydana gelen artma veya azalmalar doğrudan tork dalgalanmasını artmasına veya azalmasına neden olmaktadır. Bun nedenle tork dalgalanmasının azaltılmasında seçilecek yollardan biri vuruğu momentinin azaltılmasında kullanılan yöntemlerin kullanılmasıdır. Geleneksel kalıcı mıknatıslı motorlarda vuruğu momentini azaltacak yöntemler Şekil 2’de, Sıralı Kutuplu Kalıcı Mıknatıslı FDAM’unda vuruğu momentini azaltacak yöntemler ise Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kalıcı mıknatıslı motorlarda uygulanan yöntemler.



Şekil 3. Sıralı kutuplu FDAM uygulanan yöntemler.

FDAM’larından, aynı boyut ve hacimdeki DA ve asenkron makinalarına daha yüksek verimler sağlanabilmekte, daha küçük hacim ve ağırlığa sahip bu motorlardan diğer motorlardaki gibi aynı güç ve moment elde edilebilmektedir.

FDAM’nun diğer motorlarla karşılaştırması Tablo 1’de gösterilmiştir (Uygun, 2012).

Tablo 1. FDAM'nun diğer motorlarla karşılaştırılması.

	Asenkron Motor	Senkron Motor	DA Motoru	FDAM	Anahtarlamalı Relüktans Motor(ARM)
Besleme Şekli	Alternatif Akım	Alternatif Akım	Doğru Akım	Doğru Akım	Doğru Akım
Uyarma Durumu	Uyarma Gerekmez	Doğru Gerilimle Uyarma	Doğru Gerilimde Uyarma	Uyarma Gerekmez	Uyarma Gerekmez
Dönüştürücü	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Daima Gerekir	Daima Gerekir
İşletme ve Bakım Masraf	Yok Denebilir	Kısmen Bakım Gerekir	Bakım Gerekir	Yok Denebilir	Yok Denebilir
Motor Maliyeti	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Pahalı	Ucuz
Dönüştürücü Maliyeti	Pahalı	Pahalı	Orta	Pahalı	Pahalı
Verim	Orta	Orta	Orta	İyi	İyi
Çalışma Ortamı	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır	Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmaz	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır
Sağlamlık	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi

Bu çalışmada, çeşitli oluk/kutup yapılarına sahip geleneksel ve sıralı kutuplu FDAM modellerinin her biri için parametrik ve analitik çözümlenmeleri yapılarak çıkış parametreleri ve vuruş momenti açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar aynı açısız hız değerlikleri dikkate alınarak farklı kutup yay oranlarında gerçekleştirilmiştir .

2. Materyal ve Metot

2.1. KMFDAM'nun Modellenmesi

KMFDAM'unda rotorun silindirik bir yapıya sahip olması nedeniyle açılı rotor endüktansı yoktur. Bu nedenle üç fazın öz ve karşılıklı endüktansı eşittir. Stator akımları dengeli olacak şekilde sınırlandırılmıştır, tepe gerilimi motorun maksimum sınır gerilimini aşmadığı sürece kaynak sinüzoidal, kare dalga, trapezoidal veya diğer dalga olarak uygulanabilir. KMFDAM'nun elektriksel ve mekanik denklemleri aşağıda verilmiştir(Ramesh Babu ve ark., 2013).

$$V_a = i_a R_s + (L - M) \frac{d}{dt} i_a + e_a \quad (1)$$

$$V_b = i_b R_s + (L - M) \frac{d}{dt} i_b + e_b \quad (2)$$

$$V_c = i_c R_s + (L - M) \frac{d}{dt} i_c + e_c \quad (3)$$

Burada; L faz indüktansını ($L = L_a = L_b = L_c$), M a-b-c fazlarının karşılıklı indüktanslarını, V_a , V_b ve V_c stator faz gerilimlerini, R_s stator faz direncini ($R = R_a = R_b = R_c$), e_a , e_b ve e_c stator zıt EMK'ları, i_a , i_b ve i_c stator faz akımlarını ifade etmektedir (Ramesh Babu ve ark., 2013).

(1), (2) ve (3) denklemleri KMFDAM modelinin aşağıdaki gibi basitleştirilmesine yol açar:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + (L - M) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2. Elektromanyetik Torkun Matematiksel Modeli

İndüklenen toplam elektromanyetik tork denklem (5) ve (9)'da , her faz için tork değeri ise Eşitlik (6),(7) ve (8)'de gösterilmiştir (Kelek ve ark., 2019).

$$T_e = (e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c) / \omega_m \quad (5)$$

$$T_a = K_t \cdot f(\theta) \cdot i_a \quad (6)$$

$$T_b = K_t \cdot f(\theta - 2\pi/3) \cdot i_b \quad (7)$$

$$T_c = K_t \cdot f(\theta + 2\pi/3) \cdot i_c \quad (8)$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (9)$$

Burada; K_t tork sabiti, ω_m mekanik açısal hız, θ elektrik motor açısını ifade etmektedir.

2.3. Vuruntu Momentinin Matematiksel Modeli

Vuruntu momenti sabit mıknatıslardan kaynaklı EMK harmonikleri ile statordaki iletkenlerden kaynaklı manyetik iletkenlik harmoniklerinin birbirini etkilemesinden dolayı ortaya çıkan ve motor performansını olumsuz yönde etkileyen bir parametredir. Özellikle yüksek hız gerektirmeyen çalışmalarda tasarlanan motorlarda çok düşük olması tercih edilmektedir.

Vuruntu momentinin etkisi analitik yöntemlerle veya Sonlu Elemanlar Yöntemiyle tespit edilebilse de rotor pozisyonu değişimiyle kolayca hesaplanabilmesidir. Vuruntu momentinin Fourier serisi ile hesaplaması Eşitlik 10'da gösterilmiştir (Aydın, 2007):

$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(k \cdot N_c \cdot \theta_m + \varphi_k) \quad (10)$$

Burada; θ_m rotorun pozisyonunu, φ_k k inci harmoniğin faz açısını, T_k ise k inci harmoniğin genliğini ve N_c rotor kutup sayısını ifade etmektedir.

Vuruntu momenti, oluk ve kutup sayısının EKOK değeriyle doğru orantılıdır ve Eşitlik 11'deki gibi tanımlanabilir:

$$P = \text{EKOK}(N_s, N_p) \quad (11)$$

Burada; N_s rotor kutup sayısı ve N_p stator oluk sayısının ifade etmektedir.

Motorun vuruntu momentinin düşük olması için, P değeri büyük olan oluk/kutup kombinasyonu seçilmelidir.

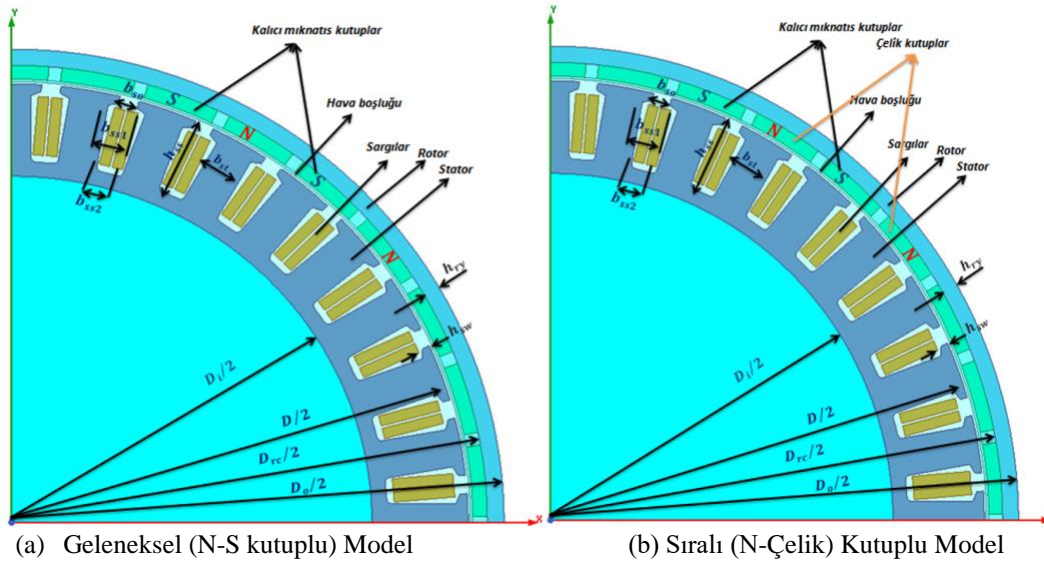
2.4. Ansys Maxwell Yazılımı ile Motorun Modellenmesi ve Analizi

RMxprt paket programı Ansys ana yazılımı içinde yer alan, birçok motor türünü barındıran (Akar ve ark., 2021; Arslan, 2016; Çabuk ve ark., 2019; Ersöz ve ark., 2016; Fenercioğlu & Tarımer, 2019) ve bu motorların tasarımında profesyonel olarak kullanılan, analitik hesaplama tabanlı bir analiz programıdır. Analitik sonuçlar başlı başına uygulamaya yönelik sonuçlar açısından belirli bir hata miktarına sahiptir (Çamcı ve ark., 2022). Bu açıdan motor modeli iki boyutlu veya üç boyutlu elektromanyetik analizi gerçekleştirilmesi önemlidir. ANSYS Maxwell programının asıl faydası; statik veya zamanla değişen elektromanyetik ve elektrik alanları analiz edebilmektir. Modellenen yapının geometrisi, kullanılacak malzemenin özellikleri, giriş parametreleri, çıktı büyüklükleri bilinmelidir (Çabuk ve ark., 2019). ANSYS Maxwell programı, problemin çözümünde kullanıcı tarafından tanımlanan veya program tarafından uygun ağ oluşturularak, daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir (Akar ve ark., 2021; Fenercioğlu & Tarımer, 2019). Bu program ile motorun bütün parametreleri RMxprt ile gerçekleştirilen analitik hesaplama süresi kısa olduğundan giriş parametreleri değiştirilerek tasarım üzerinde yüzlerce olasılık çok kısa süre içerisinde denenmekte ve motora ait verilere kısa zamanda ulaşılmaktadır. Ansys RMxprt programı; analitik tasarımlar, parametrik ve optimizasyon çalışmalarının yapılabilmesine imkân sağlar. Ayrıca RMxprt ile Maxwell uyumlu çalışabilmesinden dolayı tasarlanan motorun 2B veya 3B geometrisi otomatik oluşturabilmektedir (Akar ve ark., 2021; Arslan, 2016; Çamcı ve ark., 2022). Böylece modelin SEY analizinin yapılmasına imkân sağlar. Kullanılacak makine ile gerekli parametreler programa girilip çözüm yaptırdıktan sonra, motora ait istenilen çıkış verilerini (kayıplar, moment, tork vb...) (Akar ve ark., 2021) grafiksel ve sayısal olarak görebilmemize imkan sağlar.

Bu çalışmada temel alınan motor parametreleri ışığında, 4 farklı oluk/kutup modelinin her biri farklı kutup yayı oranı aralıkları ve farklı sipir sayıları için ANSYS/RMxprt yazılımına girilerek

motorların analitik modelleri oluşturulmuş ve performans analizleri yapılmıştır. Sonrasında bu modellerin ANSYS/Maxwell 2D yardımıyla 2 boyutlu modeline geçiş yapılarak parametrik ve analitik olarak çözdürülmüş, en uygun vuruş torkuna sahip modeller tespit edilmiştir. Tespit edilen bu modellerin karşılaştırılmıştır.

36 oluk 34 kutuplu dıştan rotorlu sabit mıknatıslı geleneksel ve sıralı kutuplu FDAM'nun 1/4 kesiti için bazı geometrik parametrelerin gösterimi Şekil 4 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 36 oluk 34 kutuplu Dıştan rotorlu sabit mıknatıslı geleneksel FDAM'nun 1/4 kesiti için bazı geometrik parametrelerin gösterimi (ANSYS Electronics Suite 19.2).

Referans motor olarak elektrikli bisiklet için imal edilen 250W gücünde 36 oluklu, 38 kutuplu modelin parametreleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Referans motorun temel, uyarma devresi özellikleri

Özellik	Değer	Özellik	Değer	Özellik	Değer
Motor Tipi	FDAM	Besleme Gerilimi	48 V	Çalışma Sıcaklığı	75 °C
Oluk sayısı	36	Faz Sayısı	3	Mıknatıs Kalınlığı	3 mm
Kutup Sayısı	38	Bağlantı Şekli	Yıldız	Mıknatıs Türü	NdFeB35
Rotor Türü	Dış Rotorlu	Kontrol Türü	DC	Yığılma Faktörü	0,95
Motor Anma Hızı	200 rpm	Motor Uzunluğu	25 mm	Rotor İç Çapı	192 mm
Stator İç Çapı	150 mm	Stator Çeliği	M19_26G	Rotor Dış Çapı	207 mm

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Modellerin ANSYS/RMxprt İle Analizi

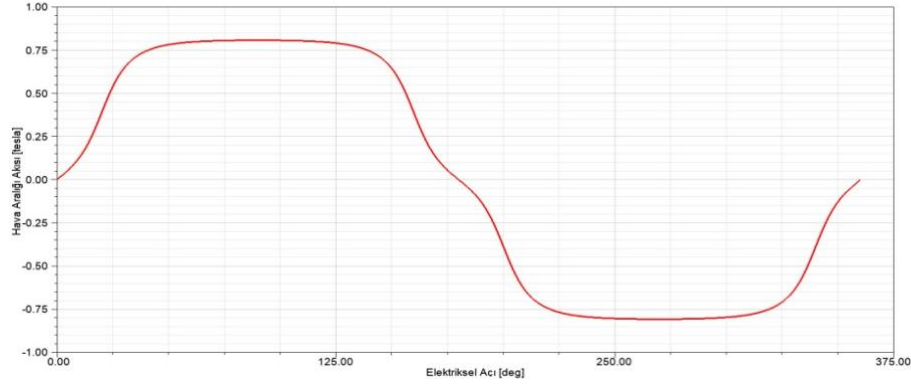
Her bir model için kutup yayı oranı 0,775-0,85 aralığında 0,025 oranında ve sarım sayıları ise 24-30 aralığında değiştirilerek Rmxprt ile yapılan analitik ve parametrik çözüm sonucu alınan veriler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Farklı sarım ve kutup yayı oranı değerleri için motor tasarım sonuçları.

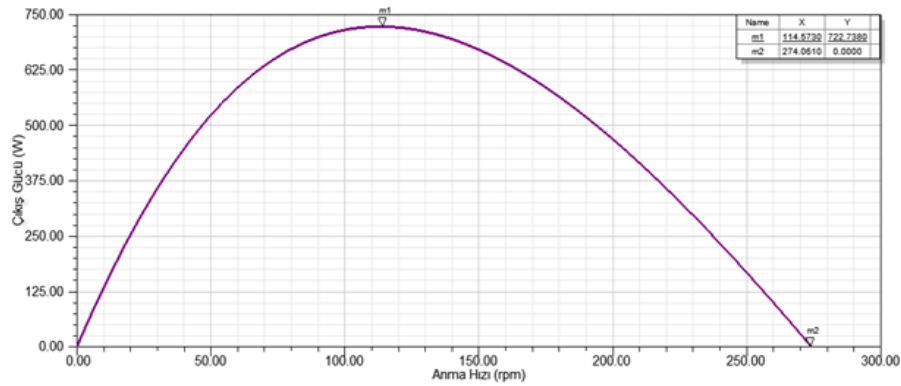
Motor Tasarım Sonuçları													
Kutup Yayı Oranı	Oluk / Kutup (Çift Kat Sarırlı)	36/34			36/38			36/40			36/42		
		24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
0,775	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,156	0,169	0,244	0,156	0,168	0,243	0,158	0,168	0,243	0,155	0,168	0,243
	Endüktans [mH]	0,448	0,525	0,647	0,483	0,567	0,755	0,492	0,578	0,769	0,501	0,588	0,783
	ke [Vs/rad]	1,977	1,297	1,497	1,203	1,303	1,504	1,196	1,296	1,495	1,178	1,276	1,473
	kt [Nm/A]	1,159	1,255	1,465	1,182	1,28	1,486	1,84	1,282	1,485	1,172	1,27	1,468
	Anma Hız [rpm]	314,952	288,031	240,773	310,657	283,867	236,78	311,045	284,109	236,724	314,14	286,792	238,698
	Çıkış Gücü [W]	250,024	250,118	250,059	250,081	250,044	250,065	249,835	250,017	250,11	250,055	250,024	249,907
	Verim [%]	82,79	82,802	81,24	82,7	82,69	81,05	82,76	82,75	81,04	82,89	82,83	81,043
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,625	2,667	2,626	2,52	2,56	2,52	2,513	2,556	2,513	2,508	2,55	2,508	
0,8	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,244	0,169	0,244	0,156	0,169	0,243	0,155	0,168	0,243	0,155	0,168	0,243
	Endüktans [mH]	0,699	0,525	0,699	0,483	0,566	0,754	0,577	0,677	0,901	0,5	0,587	0,782
	ke [Vs/rad]	1,509	1,308	1,509	1,215	1,316	1,519	1,21	1,311	1,512	1,193	1,292	1,491
	kt [Nm/A]	1,472	1,261	1,472	1,19	1,289	1,499	1,195	1,295	1,5	1,186	1,284	1,485
	Anma Hız [rpm]	312,768	286,061	239,158	307,957	281,426	234,802	307,856	281,223	234,373	310,747	289,728	236,205
	Çıkış Gücü [W]	250,042	250,1	250,064	250,085	250,037	250,047	250,055	250,027	250,173	250,053	250,022	250,066
	Verim [%]	81,188	82,717	81,18	82,6	82,61	81	82,7	82,684	81	82,84	82,796	81,04
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,639	2,681	2,634	2,532	2,574	2,532	2,526	2,568	2,526	2,52	2,562	2,52	
0,825	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,156	0,169	0,244	0,156	0,169	0,243	0,156	0,168	0,243	0,156	0,168	0,243
	Endüktans [mH]	0,446	0,524	0,698	0,482	0,566	0,753	0,491	0,576	0,767	0,5	0,586	0,781
	ke [Vs/rad]	1,214	1,316	1,518	1,223	1,325	1,529	1,221	1,323	1,526	1,205	1,305	1,506
	kt [Nm/A]	1,166	1,264	1,476	1,195	1,295	1,506	1,205	1,305	1,513	1,197	1,296	1,5
	Anma Hız [rpm]	311,142	284,589	237,983	306,058	279,712	233,425	305,279	278,892	232,497	307,789	281,055	234,028
	Çıkış Gücü [W]	250,056	250,079	250,091	250,086	250,059	250,043	250,067	250,033	250,102	250,049	250,016	250,086
	Verim [%]	82,6	82,63	81,13	82,51	82,54	80,95	82,63	82,62	80,97	82,8	82,76	81,02
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,652	2,694	2,652	2,544	2,587	2,544	2,538	2,58	2,538	2,532	2,574	2,532	
0,85	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,156	0,169	0,244	0,156	0,169	0,243	0,155	0,168	0,243	0,155	0,1688	0,243
	Endüktans [mH]	0,446	0,523	0,697	0,481	0,565	0,752	0,49	0,576	0,767	0,499	0,586	0,78
	ke [Vs/rad]	1,219	1,32	1,524	1,23	1,333	1,538	1,23	1,333	1,538	1,216	1,317	1,521
	kt [Nm/A]	1,168	1,266	1,479	1,2	1,3	1,513	1,211	1,312	1,523	1,206	1,307	1,513
	Anma Hız [rpm]	310,204	283,762	237,327	304,414	278,228	232,235	303,128	276,947	230,918	305,233	278,744	232,147
	Çıkış Gücü [W]	250,068	250,057	250,112	250,084	250,078	250,037	250,076	250,035	250,087	250,045	250,01	250,098
	Verim [%]	82,511	82,556	81,078	82,42	82,46	80,9	82,566	82,566	80,94	82,766	82,73	81,012
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,665	2,707	2,665	2,558	2,6	2,557	2,55	2,592	2,55	2,544	2,586	2,544	

Tablo 3 genel olarak incelendiğinde; kutup yayı oranı veya sarım sayısı arttıkça anma hızının düştüğü ancak verimde çok yüksek değişimler olmadığı, sabit sarım sayısında kutup yayı artışına bağlı olarak faz direnci değişmemektedir. Ancak 250W çıkış gücü için sarım sayısı artışına bağlı olarak faz direnci ve indüktans artışı beklenen durumdur.

36/34 oluk/kutup oranı, 0,85 kutup yayı oranı ve sarım sayısı 30 olan model için Rmxprt ile alınan grafikler Şekil 5 ile Şekil 8 arasında gösterilmiştir.

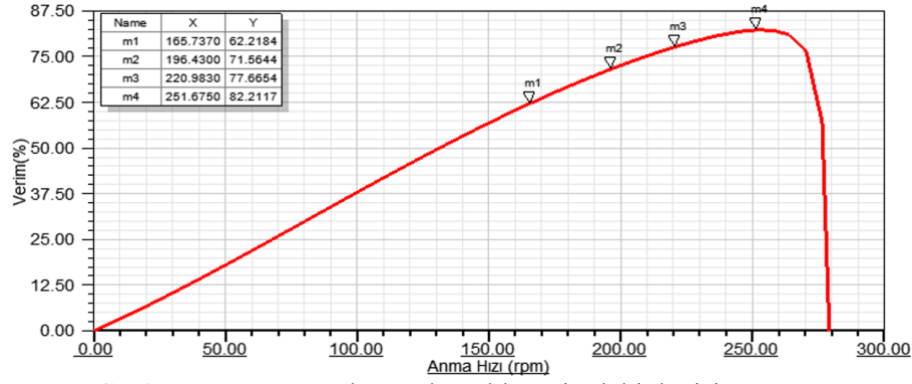


Şekil 5. Elektriksel açıya bağlı olarak hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi.



Şekil 6. Motor hızına karşılık motorun çıkış gücündeki değişim.

Rotor hızı arttıkça çıkış gücü belli bir değere kadar artmakta, belli bir değerden sonra düşüşe geçmektedir. Anma hızı yaklaşık 114,5 rpm ulaştığında çıkış gücü maksimum değerini almaktadır.



Şekil 7. Motor anma hızına karşılık verimdeki değişim.

Anma hızı arttıkça verim belli bir değere kadar artmaktadır. Maksimum verime yaklaşık 251 rpm değerinde ulaşılmaktadır.

3.2. Geleneksel ve Sıralı Kutuplu Modellerin ANSYS/Maxwell 2D ile Analizi

4 kutup modelinin geleneksel ve sıralı kutuplu modeller için ANSYS Maxwell ile yapılan 2B analiz sonuçları Tablo 3 ile Tablo 7 arasında gösterilmiştir.

Tablo 4. 36/34 oluk/kutup yapısı için analiz sonucu.

	Kutup Yayı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
34 KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	7,530	4,270	41,508	13,086	24,840	325,059	87,655
	0,725	7,257	4,350	38,562	12,786	24,840	317,607	88,097
	0,75	7,021	4,410	36,092	12,492	24,840	310,304	88,455
	0,775	6,875	4,460	34,610	12,318	24,840	305,982	88,677
	0,8	6,842	4,491	34,269	12,157	24,840	304,715	88,727
	0,825	6,818	4,522	34,036	12,246	24,840	304,193	88,751
	0,85	6,844	4,547	34,293	12,276	24,840	304,939	88,702
SIRALI KUTUPLU (N)	Kutup Yayı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
	0,7	12,269	3,766	110,203	16,182	24,840	401,972	77,910
	0,725	11,856	3,792	102,904	15,986	24,840	397,106	78,822
	0,75	11,466	3,834	96,251	15,791	24,840	392,241	79,671
	0,775	11,120	3,872	90,535	15,582	24,840	387,059	80,392
	0,8	10,869	3,906	86,490	15,429	24,840	383,270	80,916
	0,825	10,610	3,946	82,415	15,295	24,840	379,923	81,479
	0,85	10,395	3,986	79,112	15,147	24,840	376,248	81,910

Tablo 4’de kutup yayı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde %10 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının %12 daha düşük, çıkış gücünün %27 ve çıkış torkunun ise %20 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 5. 36/38 Kutup Oluk yapısı için analiz sonucu.

	Kutup Yayılı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
38 KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	7,780	4,374	44,312	13,422	24,073	323,092	86,905
	0,725	7,424	4,465	40,349	13,026	24,073	313,561	87,495
	0,75	7,042	4,560	36,299	12,875	24,073	309,943	88,353
	0,775	6,868	4,647	34,539	12,380	24,073	298,013	88,379
	0,8	6,698	4,708	32,843	12,188	24,073	293,396	88,653
	0,825	6,565	4,763	31,558	12,054	24,073	290,175	88,875
	0,85	6,499	4,805	30,925	12,000	24,073	288,882	88,993
	SIRALI KUTUPLU (N)							
	0,7	11,5836	4,014	98,220	15,985	24,073	384,812	79,009
	0,725	12,0314	3,985	105,980	16,003	24,073	385,240	77,794
	0,75	11,6473	4,014	99,322	15,859	24,073	381,779	78,699
	0,775	11,2973	4,047	93,442	15,693	24,073	377,763	79,487
	0,8	10,9841	4,087	88,333	15,556	24,073	374,470	80,205
	0,825	10,7077	4,118	83,943	15,417	24,073	371,120	80,822
	0,85	10,4727	4,147	80,299	15,309	24,073	368,528	81,357

Tablo 5’de kutup yayılı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde %9,75 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının % 12 daha düşük, çıkış gücünün % 25 ve çıkış torkunun ise %25 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 6. 36/40 Kutup Oluk yapısı için analiz sonucu.

	Kutup Yayılı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
40 KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	7,678	4,427	43,164	13,408	24,046	322,407	87,137
	0,725	7,307	4,522	39,086	12,977	24,046	312,057	87,739
	0,75	7,017	4,607	36,048	12,607	24,046	303,152	88,175
	0,775	6,739	4,698	33,253	12,255	24,046	294,696	88,591
	0,8	6,509	4,773	31,023	11,961	24,046	287,627	88,932
	0,825	6,335	4,840	29,386	11,736	24,046	282,216	89,184
	0,85	6,222	4,896	28,344	11,588	24,046	278,654	89,342
	SIRALI KUTUPLU (N)							
	0,7	11,857	4,255	102,931	15,731	24,046	378,271	77,921
	0,725	11,457	4,269	96,096	15,539	24,046	373,656	78,827
	0,75	11,146	4,287	90,962	15,367	24,046	369,515	79,506
	0,775	10,817	4,308	85,670	15,154	24,046	364,392	80,197
	0,8	10,521	4,330	81,036	14,957	24,046	359,656	80,817
	0,825	10,265	4,342	77,145	14,783	24,046	355,484	81,352
	0,85	10,050	4,353	73,949	14,647	24,046	352,198	81,811

Tablo 6 ’da kutup yayılı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde % 9,47 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının % 8 daha düşük, çıkış gücü ve çıkış torkunun ise %23 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 7. 36/42 Kutup Oluk yapısı için analiz sonucu.

	Kutup Yayısı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
42KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	7,638	4,500	42,712	13,234	24,246	320,869	87,173
	0,725	7,259	4,597	38,577	12,801	24,246	310,376	87,788
	0,75	6,921	4,696	35,065	12,366	24,246	299,834	88,291
	0,775	6,665	4,771	32,525	12,008	24,246	291,141	88,644
	0,8	6,452	4,847	30,480	11,700	24,246	283,686	88,926
	0,825	6,209	4,915	28,227	11,416	24,246	276,785	89,306
	0,85	6,057	4,975	26,858	11,217	24,246	271,976	89,522
SIRALI KUTUPLU (N)	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	12,614	4,064	116,489	15,737	24,246	381,557	75,991
	0,725	12,186	4,091	108,718	15,663	24,246	379,766	77,098
	0,75	11,784	4,121	101,669	15,663	24,246	379,766	78,213
	0,775	11,464	4,150	96,228	15,467	24,246	375,024	78,886
	0,8	11,125	4,185	90,616	15,442	24,246	374,417	79,796
	0,825	10,819	4,222	85,701	15,355	24,246	372,307	80,546
	0,85	10,710	4,256	83,963	15,288	24,246	370,681	80,776

Tablo 7 'de kutup yayısı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde % 11 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının % 12 daha düşük, çıkış gücü ve çıkış torkunun ise %28 daha yüksek olduğu görülmüştür.

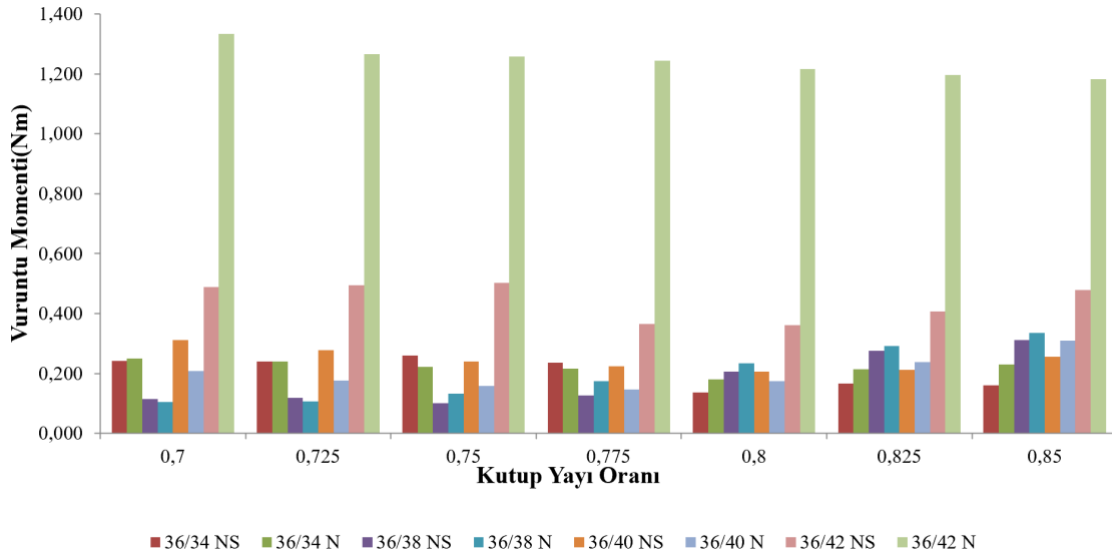
Bu tablolar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, geleneksel modelde verim daha yüksek olsa da çıkış gücü ve çıkış torku açısından sıralı kutuplu yapıların daha avantajlı olduğu görülmektedir.

3.3. Seçilen 4 Modelin Vuruntu Momentinin İncelenmesi

4 farklı rotor konfigürasyonunun çeşitli kutup yayısı oranlarında hem geleneksel hem de sıralı kutuplu modeller için vuruntu momenti analizi ANSYS/Maxwell 2D ile yapılmış olup, sonuçları Tablo 8'de ve karşılaştırması ise Şekil 5'de gösterilmektedir.

Tablo 8. Farklı kutup yayı oranlarında vuruğu momentleri değeri.

	Kutup Yayı Oranı	Vuruğu Momenti (Nm)	Vuruğu Momenti (Nm)	Vuruğu Momenti (Nm)	Vuruğu Momenti (Nm)
GELENEKSEL (ÇİFT NS)	0,700	0,2424	0,1153	0,3106	0,4876
	0,725	0,2394	0,1183	0,2784	0,4952
	0,750	0,2597	0,1009	0,2390	0,5032
	0,775	0,2359	0,1258	0,2238	0,3648
	0,800	0,1357	0,2064	0,2051	0,3617
	0,825	0,1659	0,2765	0,2115	0,4063
	0,850	0,1600	0,3111	0,2563	0,4778
SIRALI KUTUP (TEK N)	Kutup Yayı Oranı	Vuruğu Momenti (Nm)	Vuruğu Momenti (Nm)	Vuruğu Momenti (Nm)	Vuruğu Momenti (Nm)
	0,700	0,2495	0,1045	0,2073	1,3333
	0,725	0,2389	0,1058	0,1765	1,2655
	0,750	0,2223	0,1330	0,1579	1,2591
	0,775	0,2164	0,1738	0,1460	1,2450
	0,800	0,1806	0,2333	0,1742	1,2163
	0,825	0,2132	0,2911	0,2372	1,1972
	0,850	0,2298	0,3346	0,3088	1,1828

**Şekil 8.** Vuruğu Momentlerinin Karşılaştırması.

Yukarıdaki şekil ve tablo incelendiğinde; vuruğu momentinin 36/38 oluk/kutup modelinde en düşük olduğu, 36/42 oluk/kutup modelinde ise en büyük olduğu görülmektedir. Vuruğu momentinin Oluk/Kutup sayısının en küçük ortak katıyla ters orantılı olduğundan dolayı 36/42 modelin en küçük ortak katı en küçük olduğundan vuruğu momentinin en büyük değeri almakta, 36/38 modelin ise en küçük ortak katı en büyük olduğundan dolayı vuruğu momentinin en küçük olmaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada 4 farklı oluk/kutup sayısı kombinasyonlarına sahip dıştan rotorlu geleneksel ve sıralı kutuplu FDAM'ları her biri farklı kutup yayı oranlarında ve farklı sipir sayılarında analitik modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller ANSYS Maxwell Rmxprt ve Maxwell 2D programı yardımıyla çözdürülerek verim, çıkış torku, çıkış gücü ve vuruğu momenti gibi çeşitli açılardan incelemeler ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışması sonucunda;

- Geleneksel FDAM modeli verim açısından daha avantajlı olsa da sıralı kutuplu modellerin çıkış torku, çıkış gücü açısından daha üstün bir yapıda olduğu,
- Kutup yayı oranı arttıkça hem geleneksel hem de sıralı kutuplu yapılarda demir kaybının ve verimin arttığı, çıkış torku, çıkış gücünün ise azaldığı,
- Vuruğu momenti analizinde, en düşük vuruğu momenti açısından 36 oluk ve 38 kutup sayısına sahip sıralı kutuplu tasarımın ön plana çıktığı görülmüştür.
- Kutup yay oranı arttıkça geleneksel modelle sıralı kutuplu modellerin verimleri arasındaki fark azalmaktadır.

Aynı motor ebatları altında mıknatıs maliyetleri düşünöldüğünde kutup çiftlerinden birinin çelik malzeme olarak kullanılması durumunda motor maliyetini azaltması beklenmektedir. Elde edilen veriler göz önüne alındığında, sıralı kutuplu rotor yapısı kullanmanın hem yüksek çıkış torku hem de yüksek çıkış gücü alınmasında, motorlarda maliyeti arttırmadan vuruğu momentinin kutup yayı oranı değiştirilerek azaltılabileceği görülmüştür. Bu açıdan özellikle mıknatıs maliyetlerindeki artış düşünöldüğünde sıralı kutuplu motor dikkat çekicidir. Geleneksel modele nazaran daha yüksek faz akımı gereksinimi nedeniyle sıralı kutuplu modellerde motorun termal yükleme değeri (Elektriksel Yükleme ve Sargı Akım Yoğunluğu Çarpımı) dikkate alınmalıdır. Ayrıca ilerleyen çalışmalarda Şekil 3'te yer alan yöntemler kullanılarak vuruğu moment değişimi ele alınacaktır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu çalışma birinci yazarın yüksek lisans tez çalışması kapsamında ikinci ve üçüncü yazarın danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. 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 University Journal of Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.889877>
- Akın, F. (2019). *Elektrikli Araçlar İçin Geliştirilen Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarım ve Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- ANSYS Electronics Suite 19.2. Programı
- Arslan, S. (2016). Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 403-415.
- Aydın, M. (2007). Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu, 12. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı*, 14-18, Kocaeli.
- Bahrim, F. S., Sulaiman, E., Kumar, R., & Jusoh, L. I. (2017, August). New cogging torque reduction methods for permanent magnet machine. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 226, No. 1, p. 012127). Melaka, Malaysia.
- Bianchi, N., & Bolognani, S. (1997). *Brushless dc motor design: an optimisation procedure based on genetic algorithms*.
- Bianchi, N., & Bolognani, S. (1998). Design optimisation of electric motors by genetic algorithms. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 145(5), 475-483.
- Chen, T.-C., Shieh, S. H., & Ren, T.-J. (2017). Torque ripple reduction of brushless DC motor using genetic algorithm. *Proceedings of the 4th international conference on control, dynamic systems, and robotics, Toronto, ON, Canada*, 21-23.
- Chung, S.-U., Kim, J.-M., Koo, D.-H., Woo, B.-C., Hong, D.-K., & Lee, J.-Y. (2012). *Fractional slot concentrated winding permanent magnet synchronous machine with consequent pole rotor for low speed direct drive*. *IEEE transactions on magnetics*, 48(11), 2965-2968.
- Çabuk, A. S., Sağlam, S., & Üstün, Ö. (2019). *Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures*. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(4), 1975-1985.
- Çamcı, H., Mengi, O. Ö., & Arslan, S. (2022). *Çok Amaçlı Genetik Algoritma Yöntemi Kullanılarak Enine Laminasyonlu Senkron Relüktans Motor Optimizasyonu*. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 841-852.
- Çelikel, R. (2017). Yüksek hızlı fırçasız doğru akım motorlarında moment dalgalanmalarını azaltan bir yöntem. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 485-493.
- Ersöz, M., Öner, Y., & Bingöl, O. (2016). *Akı bariyerli TLA tipi senkron relüktans motor tasarımı ve optimizasyonu*. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 941-950
- Fenercioğlu, A., Tarımer, İ. (2007). *Solution processes of a magnetic system's magneto static analysis with Maxwell 3D field simulator*. *Selçuk University Journal of Technical-Online*, ISSN 1302/6178, Vol. 6, No. 3, pp. 221-240, 2007
- Kaymaz, H., & demir, M. F. (2020). Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi. *International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering*, 2(1), 35-41.
- Kelek, M. M., Çelik, İ., Fidan, U., & Oğuz, Y. (2019). *The Simulation of mathematical model of outer rotor BLDC motor*. *Simulation*, 2687, 5527.
- Li, F., Wang, K., Li, J., & Zhang, H. J. (2018). Suppression of even-order harmonics and torque ripple in outer rotor consequent-pole PM machine by multilayer winding. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-5.

- Lin, H., Wang, D., Liu, D., & Chen, J. (2014). Influence of magnet shape on torque behavior in surface-mounted permanent magnet motors. *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 44-47. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7013448>
- Liu, S., Yao, X., & Shen, Y. (2021). A Method to Reduce Torque Ripple of Brushless DC Motor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1754(1), 012150.
- Mehmet, A. K. A. R., Mustafa, E. K. E. R., & Fazilet, A. K. I. N. (2021). BLDC motor design and application for light electric vehicle. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 326-336.
- Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., & Tektaş, M. (2017). Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(1), 34-50.
- Ramesh Babu, P., Ramprasath, S., & Paranthagan, B. (2013). Modeling and dynamic simulation of permanent magnet brushless DC motor (PMBLDCM) drives. *Communications in Computer and Information Science*, 296 CCIS. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35864-7_86
- Tosun, Ö. (2021). *Fırçasız Doğru Akım Motorunun Tasarım Çalışması İle Motor Parametrelerinin İyileştirilmesine Katkılar*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ulu, B. (2011). *Fırçasız doğru akım motor (BLDC) hız kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Uygun, D. (2012). 5-Fazlı U-Tipi Segmental Rotorlu Bipolar Uyarımlı 10/8 Anahtarlama Relüktans Motorun Tasarımı Ve Uygulaması, ". *Gazi Üniversitesi*.
- Uygun, D., & Solmaz, S. (2015). Design and dynamic study of a 6 kW external rotor permanent magnet Brushless DC motor for electric drivetrains. *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 87-92.
- Xu, M., Liu, G., Zhao, W., & Aamir, N., Minimization of torque ripple in ferrite-assisted synchronous reluctance motors by using asymmetric stator, *AIP Advances*, 8(5), 056606, 2017.
- Yang, H., Zhu, Z.-Q., Lin, H., Li, H., & Lyu, S. (2019). Analysis of consequent-pole flux reversal permanent magnet machine with biased flux modulation theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(3), 2107-2121.