

Fırçasız Doğru Akım Motorunda Mıknatıs Türü ve Oluk Sayısı Değişiminin Tork Dalgalanması Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Changing Magnet Type and Slot Number on Torque Ripple in Brushless DC Motor

Öztürk TOSUN¹, Necibe Füsün OYMAN SERTELLER¹, Uğur DEMİR¹, Bekir GEÇER²

¹Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

²Ataşehir Adıgüzel Meslek Yüksek Okulu, Mekatronik, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışma, fırçasız doğru akım (BLDC) motorlarının elektromanyetik tork karakteristikleri üzerinde mıknatıs tipi ve stator oluk sayısının etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmekte ve özellikle performans ve kararlılığı artırmaya yönelik tasarım optimizasyonuna odaklanmaktadır. Literatürde genellikle bu parametreler ayrı ayrı ele alınırken, bu çalışmada her iki parametrenin birlikte etkisi ANSYS Maxwell ortamında gerçekleştirilen ayrıntılı 2D elektromanyetik simülasyonlarla sistematik olarak incelenmiştir. NdFeB, SmCo ve literatürde görece daha az incelenmiş olan XG196/96 gibi üç farklı mıknatıs malzemesi kullanılarak, manyetik doyma, manyetik akı dağılımı ve tork salınımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, stator oluk sayısının ortalama tork ve tork kararlılığı üzerindeki etkisi analiz edilerek elektromanyetik gürültü azaltımı ve motorun düzgün çalışması açısından önemli bulgular elde edilmiştir. Özellikle XG196/96, daha düşük maliyetli olmasına rağmen NdFe35'e kıyasla %36,3 daha düşük tork üretmiş ve performans-ticari denge gözetilen uygulamalar için potansiyel bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Bunun yanında, stator oluk sayısındaki artışın tork salınımını önemli ölçüde azalttığı ve daha kararlı bir motor çalışması sağladığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın özgün yönü, mıknatıs malzeme özellikleri ile yapısal tasarımı birlikte optimize eden çok parametrelili bir yaklaşım sunmasıdır. Elde edilen sonuçlar, daha verimli ve uygulamaya özel BLDC motor tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: FSDAM, ANSYS/Maxwell, Tork, Verim, Akı Yoğunluğu

Abstract

This study presents a comprehensive parametric analysis of how magnet type and stator slot number influence the electromagnetic torque characteristics of brushless direct current (BLDC) motors, with a particular focus on optimizing design for enhanced performance and stability. Unlike previous studies that treat these parameters in isolation, this work systematically investigates their combined impact using detailed 2D transient electromagnetic simulations performed in ANSYS Maxwell. Three different magnet materials NdFeB, SmCo, and the relatively underexplored XG196/96 were evaluated to assess their influence on magnetic saturation, flux distribution, and torque ripple. Additionally, the effect of stator slot number on torque stability and average output torque was quantified, revealing critical insights into electromagnetic noise mitigation and motor smoothness. Notably, XG196/96, despite its lower cost, exhibited a 36.3% torque reduction compared to NdFe35, positioning it as a potential candidate for cost-sensitive applications where performance trade-offs are acceptable. Furthermore, the results indicate that increasing the stator slot number significantly suppresses torque ripple, promoting a more stable operation. The originality of this work lies in its multi-parameter design perspective, offering a novel optimization approach that couples material properties with structural design to enhance BLDC motor efficiency. The findings contribute to the development of more robust and application-specific BLDC motor designs.

Keywords: BLDC motor, ANSYS/Maxwell, Torque, Efficiency, Flux density

I. GİRİŞ

Günümüzde elektrikli araçlardan endüstriyel otomasyon sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılan fırçasız doğru akım motorları (BLDC), yüksek verimlilikleri, düşük bakım ihtiyaçları ve kompakt

yapıları nedeniyle tercih edilmektedir [1–3]. BLDC motorların performansını etkileyen temel parametreler arasında mıknatıs tipi, stator yapısı, slot sayısı ve kullanılan malzemelerin manyetik özellikleri öne çıkmaktadır [4–6].

BLDC motorlarda kullanılan sabit mıknatıslar, motorun manyetik devresini doğrudan etkileyerek tork üretimini, doygunluk davranışını ve genel verimliliği belirler [7–9]. Özellikle NdFeB, SmCo gibi nadir toprak elementi içeren mıknatıslar, yüksek enerji yoğunlukları sayesinde kompakt motor tasarımlarında avantaj sunmaktadır [10,11]. Bununla birlikte, ferrit bazlı mıknatıslar gibi alternatif malzemeler, maliyet-etkinlik açısından tercih edilse de düşük manyetik özellikleri nedeniyle performansta azalmaya neden olabilmektedir [12].

Stator slot sayısı da BLDC motor performansında kritik rol oynamaktadır. Slot sayısı, stator sargılarının dağılımını ve dolayısıyla üretilen elektromanyetik torkun düzgünlüğünü belirler [13,14]. Uygun slot sayısı seçimi ile tork dalgalanmaları azaltılabilir, gürültü ve titreşim seviyesi düşürülebilir ve motorun çalışma kararlılığı artırılabilir [15–17].

Yapılan çalışmalar, mıknatıs malzemesi ve stator slot sayısının birlikte optimize edilmesinin, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda motor tasarımına önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır [18–20],[23].

Bu çalışma, fırçasız doğru akım motorlarının tasarım sürecinde mıknatıs malzemesi seçimi ve stator oluk sayısının motor performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Öncelikle, XG196/96, NdFeB ve SmCo gibi farklı mıknatıs malzemelerinin manyetik doyma eğilimleri ve tork dalgalanmaları üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu bağlamda, mıknatıs malzemesinin seçiminde manyetik doyma özelliklerinin motor verimi açısından kritik olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, stator oluk sayısının ortalama tork üretimi ve tork dalgalanmaları üzerindeki etkileri değerlendirilerek, motorun çalışma stabilitesine olan katkısı vurgulanmıştır. FSDAM için belirlenen her senaryoda motor dış çapı, motor iç çapı, mıknatıs kalınlığı ve tel çapı sabit tutulmuştur. Oluk başına iletken sayısı, oluk yüksekliği ve oluk genişliği her durum için tekrar hesaplanmıştır. Farklı oluk sayıları için farklı mıknatıs türlerinin stator boyunduruk akı yoğunluğu, stator dış akı yoğunluğu, rotor boyunduruk akı yoğunluğu, ortalama tork, tork dalgalanması ve verim parametrelerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Farklı senaryolar için yapılan elektromanyetik analizler, stator oluk sayısının tork dalgalanmalarını azaltarak motorun daha kararlı çalışmasını sağladığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, FSDAM'ların tasarım

optimizasyonuna yönelik kapsamlı bir değerlendirme sunarak, daha yüksek verimli ve kararlı çalışan motorların geliştirilmesine rehberlik etmektedir. Aynı zamanda, mıknatıs seçimi ve stator oluk sayısının optimizasyonunun, motor performansına doğrudan etkilerini ortaya koyarak, gelecekteki araştırmalara temel oluşturacak önemli bulgular sağlamaktadır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Manyetik Devre Denklemleri

Denklem (1)'den (4)'e kadar statik manyetik alanlar için Maxwell analiz denklemleri verilmiştir[21,22].

$$\nabla \times \frac{B}{\mu} = J \quad (1)$$

B (Wb/m²) ve J (A/m²) sırasıyla; manyetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğudur. μ (H/m) malzeme manyetik geçirgenliğidir.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J, \nabla \times A = B \quad (2)$$

A (Wb/m) vektör potansiyeldir. Denklemler düzenlendiğinde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile sistemi çözecek denklem (3) elde edilerek manyetik ve elektrik devresi analizleri yapılır.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (3)$$

2.2. Tasarımda Kullanılan Temel Denklemler

Elektrik motorunun elektrik ve mekanik çıkış değerleri ve ana boyutları ile ilgili olan denklemleri tasarımda yol gösterir. Tasarım için FSDAM özel çıkarımları denklem (4) ve (7) arasında verilmiştir. Motorun ürettiği çıkış gücü Po(W) rotorda endüklenen zıt emk E(V) ve faz akımı I(A) cinsinden denklem (5) ile verilir[21,22,24].

$$P_o = EI \quad (4)$$

B (Wb/m²) hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, D (m) rotor çapı, L (m) motor eksenel uzunluğu, P toplam kutup sayısı ve ϕ akı (Wb) denklem ile (5) verilmiştir.

$$B_g = \frac{P\phi}{\pi DL} \quad (5)$$

Motorun zıt-emk faz gerilimi E denklem (6) ile bulunur.

$$E = 2NDL\omega_m B_g \quad (6)$$

Elektromanyetik tork denklem (7) ile bulunur.

$$T = 4NDLI B_g \quad (7)$$

Burada; N:faz başına sarım sayısını ifade etmektedir. Sargılardan geçen akımın ısı etkisi ile bakır kayıpları oluşur.

$$P_{cu} = 3I_{rms}^2 R_{ph} \quad (8)$$

Irms: faz başına RMS akımı, Rph: faz başına direnci temsil etmektedir.

Çekirdek kayıpları genellikle histerezis ve fuko (eddy current) kayıplarının toplamıdır:

$$P_{core} = k_h f B_{max}^n V + k_e (f B_{max})^2 V \quad (9)$$

kh: histerezis kaybı katsayısı, ke: eddy akım kaybı katsayısı, f: frekans, Bmax: maksimum manyetik akı yoğunluğu, V: manyetik malzemenin hacmi, n: 1.6-2 arası olan malzemeye bağlı olan sayıdır.

İnvertör kayıpları, iletim ve anahtarlama kayıplarının toplamıdır.

$$P_{cond} = 6I_{rms}^2 R_{on} \quad (10)$$

Ron: yarı iletken direncidir.

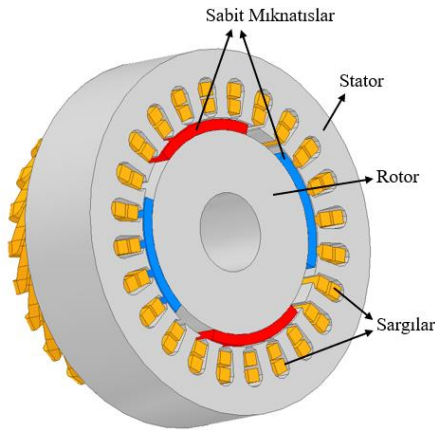
$$P_{sw} = 6f_s (E_{on} + E_{off}) \quad (11)$$

Fs: anahtarlama frekansı, Eon ve Eoff yarıiletken başına anahtarlama enerjileridir.

Çıkış gücü ve kayıplar bilindiğine göre FSDAM verim denklemi elde edilebilir:

$$\% \eta = \frac{P_o}{P_o + P_{cu} + P_{core} + P_{cond} + P_{sw}} 100 \quad (12)$$

Şekil 1’de FSDAM yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. FSDAM yapısı

2.3. Motor Tasarımı

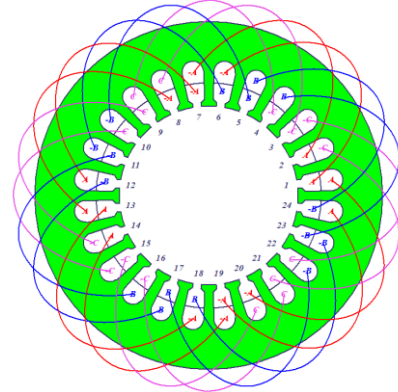
FSDAM’da stator, motorun döner manyetik alanın meydana geldiği duran kısımdır. Çalışmada tasarlanan iç rotorlu motorda stator sargıları dış yüzeyde olduğundan, dış rotorlu yapıya göre statorun soğuması daha kolaydır. Ancak statorun seri üretimde sarılması ve işlenmesi oldukça zordur, aynı zamanda maliyeti ve işçiliği de çok fazladır[25-27].

Statorda her oluğunda alt ve üst olmak üzere iki bobin kenarı bulunan sargılar çift katmanlı, tek kat bobin

kenarı bulunan sargılar ise tek katmanlıdır. Çift katmanlı sargı tipinde katmanlar arasında yalıtım malzemesi konulacağı için tek katmanlı sargı tipine göre oluk doldurma oranı daha düşüktür ve fazlar arası elektriksel risk daha yüksektir. Ancak daha yüksek güç uygulamalarında çift katmanlı sargı tipi kullanılmaktadır [27].

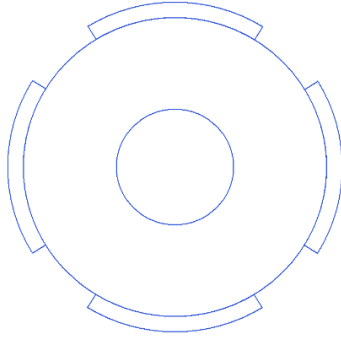
Motorun her bir fazı başına kutup çifti başına sadece bir bobin karşılık gelecek şekilde ortaya çıkacak bağlantı tipini yarım kalıp, birden fazla bobin gelecek şekilde yapılan bağlantı ise tam kalıp sarımdır [28].

Şekil 2’de Tam kalıp iki tabaka konsantre sarım tipi gösterilmiştir.



Şekil 2. FSDAM’da tam kalıp sarım

BLDC motorların rotoru, motorun dönmesini sağlayan ve sabit mıknatıslardan oluşan bileşendir. Rotorda kullanılan mıknatısların düzeni, manyetik akı yoğunluğu, verimlilik, tork dalgalanması ve genel motor performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. BLDC motorlarda rotor tasarımı dış rotorlu ve iç rotorlu iki ana gruba ayrılır. Dış rotorlu tasarımda, mıknatıslar dış çerçevede yer alır ve rotor dışarıda döner. Daha fazla atalet sağladığı için bazı uygulamalarda daha stabil hız kontrolü sağlar. Genellikle fanlar, dron motorları gibi düşük hız ve yüksek tork gerektiren uygulamalarda kullanılır. İç rotorlu tasarımda ise, mıknatıslar rotorun merkezinde bulunur ve stator etrafında sabittir. Daha hızlı tepki süresi ve yüksek hız gerektiren uygulamalar için uygundur. Elektrikli araçlar, CNC motorları, servo motorlar gibi uygulamalarda kullanılır [29]. Bu çalışmada iç rotorlu yüzey montajlı FSDAM incelenmiştir. Şekil 3’te iç rotorlu yüzey montajlı FSDAM tipi gösterilmiştir.



Şekil 3. FSDAM’da yüzey montajlı rotor

Rotordaki demagnetizasyon adı verilen sürekli mıknatısların sağladığı akının stator sargılarından akan akının oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle azalması durumu mıknatıs seçimini önemli ölçüde etkiler[30]. Mıknatısın yüksek demagnetizasyon değerinin yanısıra yüksek akı yoğunluğuna sahip olması, kolay bulanabilir olması ve maliyetinin düşük olması istenir[31]. Bu değerler göz önünde bulundurularak analizler gerçekleştirilirken sıklıkla kullanılan XG196/96, SmCo, NdFeB mıknatıs türlerine yer verilmiştir.

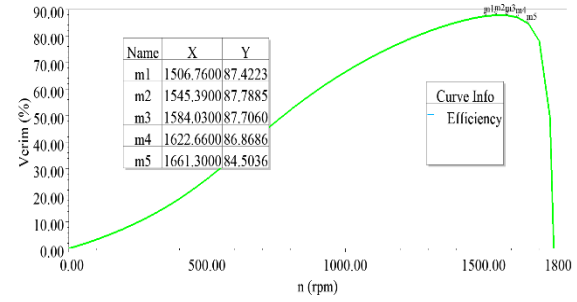
III. ELEKTROMANYETİK ANALİZ

FSDAM’ların elektromanyetik analizi, motorun manyetik alan dağılımını, moment üretimini, verimliliğini ve ısıl performansını değerlendirmek için yapılır. Bu analiz genellikle sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak gerçekleştirilir[32,33]. Bu bölümde 24 oluk 4 kutuplu, 18 oluk 4 kutuplu, 12 oluk 4 kutuplu FSDAM için sırasıyla XG196/96, NdFeB ve SmCo mıknatıslarının etkisi incelenmiştir. x64 tabanlı işlemci, 4 GB RAM özelliklerine sahip bilgisayarda ANSYS Electronics Desktop 2021 R1 versiyonu paket programı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Transient analizi için 40 ms durma zamanı, 0,2 ms adım zamanı belirlenmiştir. FSDAM 4 kutuplu ve hızı 1500 rpm olduğu için bir elektrik periyodu 20 ms olarak hesaplanmıştır. Simülasyon durma zamanı belirlenirken kararlı duruma ulaştığının gözlemlenebilmesi için iki elektrik periyodu boyunca analiz sürdürülmüştür. Her analizin sonuçlanma süresi yaklaşık 30 dakikadır. FSDAM özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. FSDAM Özellikleri

Özellik	Oluk/Kutup sayısı (24/4)	Oluk/Kutup sayısı (18/4)	Oluk/Kutup sayısı (12/4)
Güç	550 W	550 W	550 W
Hız	1500 rpm	1500 rpm	1500 rpm
Dış çap	120 mm	120 mm	120 mm
İç çap	75 mm	75 mm	75 mm
Mıknatıs kalınlığı	3.5 mm	3.5 mm	3.5 mm
İletken sayısı	50	66	106
Tel çapı	0.91 mm	0.91 mm	0.91 mm
Oluk yüksekliği	8.2 mm	7.49 mm	13.87 mm
Oluk tepe genişliği	7.6 mm	9.65 mm	6.13 mm

Şekil 4, 24 oluk 4 kutuplu FSDAM için (XG196/96) verim-hız eğrisini göstermektedir.



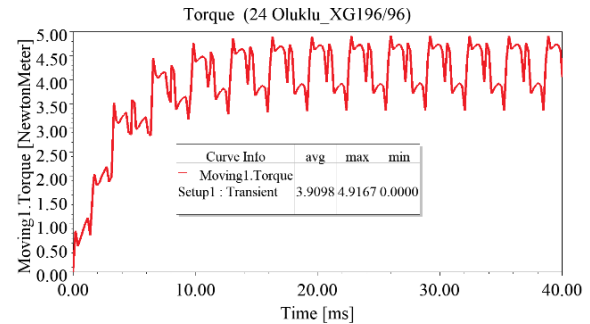
Şekil 4. Verim-hız eğrisi (24 Oluklu_XG196/96)

Motorun farklı hız aralıklarındaki verimlilik durumu incelendiğinde, aşağıdaki eğilimler gözlemlenmiştir: Düşük hızlar (0–500 rpm): Bu hız aralığında motor verimliliği oldukça düşüktür. Düşük hızlarda çalışan motor, daha yüksek oranda kayıplara maruz kalmakta ve bu durum toplam verimi olumsuz etkilemektedir. Orta hızlar (500–1500 rpm): Bu bölgede verimlilik hızla artmakta ve motorun en verimli çalıştığı aralık olarak öne çıkmaktadır. Verim, bu hız aralığında maksimum seviyeye yaklaşmaktadır. Tepe noktası (~1500–1600 rpm): Motor verimliliği bu bölgede maksimum değere ulaşarak yaklaşık %87,8 seviyesinde zirve yapmaktadır. Bu nokta, motorun optimal çalışma noktası olarak değerlendirilebilir. Yüksek hızlar (>1600 rpm): Bu hız seviyesinden itibaren verimlilik düşüşe geçmektedir. Özellikle 1800 rpm civarında ani ve belirgin bir verim kaybı gözlemlenmiştir.

Her oluk/kutup sayısı ve mıknatıs türü için tork dalgalanması denklem (13) yardımı ile incelenmiştir[21]. Tork-zaman grafiğinde maksimum tork ve minimum tork farkı, ortalama tork değerine bölünerek tork dalgalanması hesaplanabilir.

$$\%T_{Dalgalanması} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ort}} 100 \quad (13)$$

Şekil 5’te 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (XG196/96) tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.

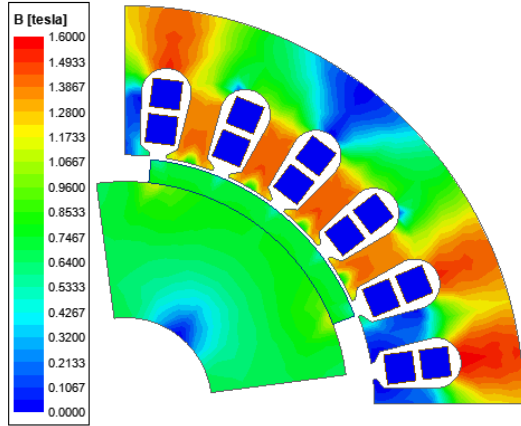


Şekil 5. Tork-zaman eğrisi (24 Oluklu_XG196/96)

0-5 ms zaman aralığında, motor çalışmaya başladığında tork hızla yükseliyor. İlk anlarda dalgalanmalar var, bu geçici rejimde motorun stabil hale gelmeye çalıştığını gösterir. 5-40 ms zaman aralığında kararlı duruma

ulaştığı gözlemlenmiştir. Tork, sürekli dalgalı bir yapıya sahiptir. Maksimum tork 4.91 Nm, ortalama tork 3.9 Nm civarındadır.

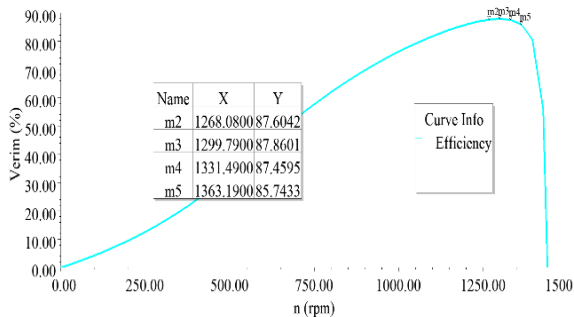
Şekil 6’da 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da XG196/96 mıknatısı ile gerçekleştirilen manyetik analiz sonucunda, stator, rotor, hava aralığı ve mıknatıs bölgelerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir.



Şekil 6. Akı yoğunluğu (24 Oluklu_XG196/96)

Stator oluklarının uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.5 Tesla) gözleniyor. Rotor mıknatıslarının etrafında manyetik akı çizgileri yoğunlaşmış, bu da mıknatısların manyetik devrede etkin olduğunu gösteriyor.

Şekil 7’de 24 oluk 4 kutuplu FSDAM (NdFeB35) verim-hız eğrisi verilmiştir.



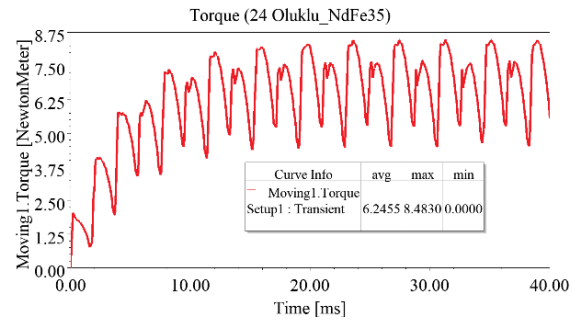
Şekil 7. Verim-hız eğrisi (24 Oluklu_NdFe35)

Motorun farklı devir sayılarındaki verimlilik performansı aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

0–500 rpm: Bu bölgede motor verimliliği oldukça sınırlıdır. Düşük hızlarda artan demanyetizasyon riski, sürtünme ve diğer kayıplar nedeniyle toplam verim önemli ölçüde düşmektedir. 500–1300 rpm: Hız arttıkça verimlilikte belirgin bir iyileşme gözlemlenmektedir. Bu aralık, motorun en verimli çalıştığı bölgeyi oluşturmaktadır. 1300–1350 rpm: Bu aralıkta motor, yaklaşık %87,9'luk maksimum verimliliğe ulaşmaktadır. Optimum performans bu hız bandında elde edilmektedir. >1400 rpm: Bu eşiğin

üzerinde verimlilikte düşüş başlamaktadır. Özellikle 1500 rpm civarında ani bir verim kaybı meydana gelmiştir. Bu durum, yüksek hızlarda artan kayıpların sistem performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

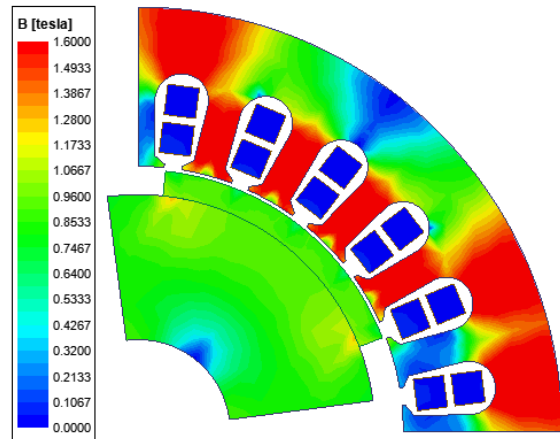
Şekil 8’ 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (NdFe35) elde edilen tork-zaman eğrisi göstermektedir.



Şekil 8. Tork-zaman eğrisi (24 Oluklu_NdFe35)

Motorun çalışmaya başladığı 0–10 ms aralığında tork hızla yükselmiştir. 10–40 ms aralığında ise tork kararlı duruma ulaşmıştır. Maksimum tork 8.48 Nm, ortalama tork 6.24 Nm olup, bu da motorun verimli çalıştığını göstermektedir.

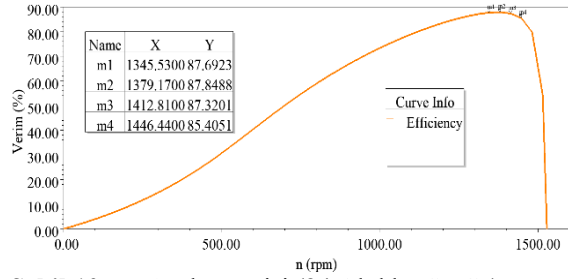
Şekil 9’da 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (NdFe35) manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 9. Akı yoğunluğu (24 Oluklu_NdFe35)

Stator oluklarının uçlarında ve stator dişlerinde yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) gözleniyor.

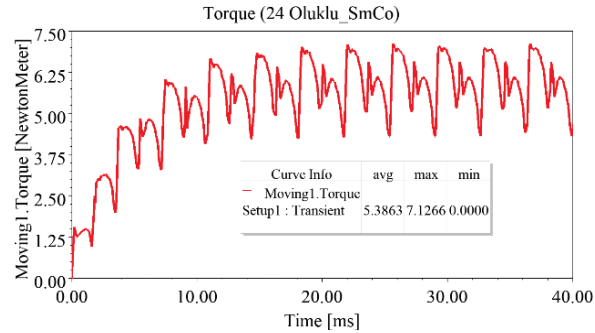
Şekil 10’da 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (SmCo) verim-hız grafiği gösterilmiştir.



Şekil 10. Verim-hız eğrisi (24 Oluklu_SmCo)

0-500 rpm arası hızlarda verim oldukça düşüktür. 500-1350 rpm hız aralığında, verim hızla artarak en yüksek seviyeye ulaşıyor. Motorun en verimli çalıştığı bölge burasıdır. 1350-1400 rpm hız aralığında, maksimum verimlilik (%87.85) seviyesine ulaşıyor. 1450 rpm'den verim düşmeye başlıyor. 1500 rpm civarında ani verim düşüşü gerçekleşmiştir.

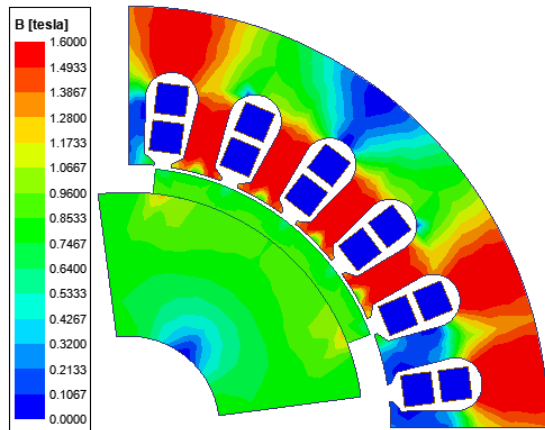
Şekil 11'de 24 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısına ait tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 11. Tork-zaman eğrisi (24 Oluklu_SmCo)

0-5 ms zaman aralığında, motor çalışmaya başladığında tork hızla yükseliyor. 5-40 ms zaman aralığında kararlı durumdadır. Maksimum tork 7.12 Nm, ortalama tork 5.38 Nm civarındadır.

Şekil 12'de 24 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 12. Akı yoğunluğu (24 Oluklu_SmCo)

Stator oluklarının uçlarında ve stator dişlerinde yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

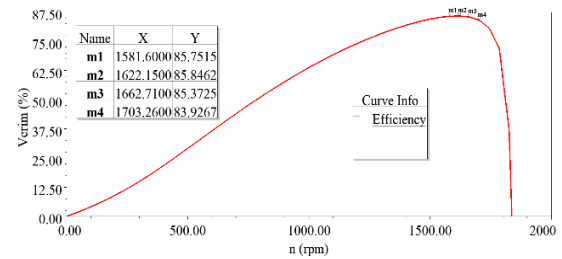
Tablo 2'de 24 oluklu tasarıma göre XG196/96, NdFe35 ve SmCo mıknatılarının simülasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 2. 24 oluklu simülasyon sonuçları

Özellik	XG196/96	NdFe35	SmCo
Verim	%87.78	%87.86	%87.84
Tork	3.90 Nm	6.24 Nm	5.38 Nm
Tork Dalgalanması	%125.89	%135.89	%132.34
Anma Hız	1545 rpm	1299 rpm	1379 rpm

Üç farklı mıknatıs türü için verim değerleri oldukça yakındır (%87.78 - %87.86 - %87.84). NdFe35 mıknatısı en yüksek verimi sağlamış (%87.86), ancak fark çok küçük olduğu için tüm mıknatısların benzer verim sunduğu söylenebilir. NdFe35 mıknatısı en yüksek torku üretmiştir (6.24 Nm). SmCo, 5.38 Nm ile ikinci sırada, XG196/96 ise en düşük torku üretmiştir (3.90 Nm). Bu sonuç, NdFe35'in daha yüksek manyetik özelliklere sahip olduğunu ve motorun daha güçlü çalışmasını sağladığını gösteriyor. NdFe35 mıknatısı %135.89 ile en yüksek tork dalgalanmasına sahiptir. XG196/96 %125.89 ve SmCo %132.34 ile daha düşük dalgalanma değerleri sunuyor. Tork dalgalanması ne kadar düşükse, motorun titreşimi ve gürültüsü o kadar az olur. Bu yüzden SmCo ve XG196/96 mıknatıları, titreşim açısından daha iyi bir performans gösteriyor. XG196/96 mıknatısı ile en yüksek anma hızı elde edilmiş (1545 rpm). NdFe35, 1299 rpm ile en düşük hızı sağlamıştır. SmCo, 1379 rpm ile orta seviyede kalıyor.

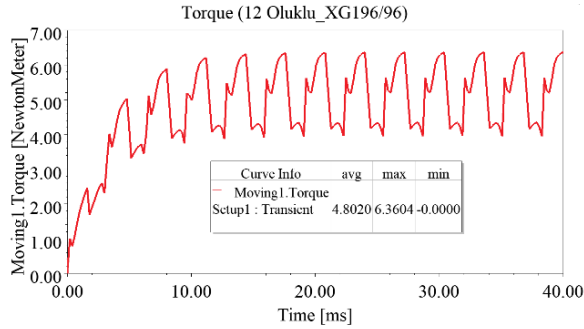
Şekil 13, 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (XG196/96) verimin hıza göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 13. Verim-hız eğrisi (12 Oluklu_XG196/96)

0-500 rpm aralığında verim çok düşüktür. 500-1550 rpm aralığında verim hızla artar ve 1600 rpm civarında %85.6 ile zirveye ulaşır. >1650 rpm hızlarda verim azalmaya başlar, 1800 rpm'de ise ani bir düşüş gözlemlenmiştir.

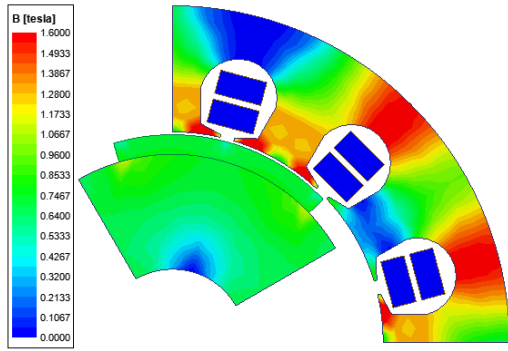
Şekil 14'te 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da XG196/96 mıknatısına ait tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 14. Tork-zaman eğrisi (12 Oluklu_XG196/96)

Motorun çalışmaya başladığı 0–10 ms aralığında tork hızla artmıştır. 10–40 ms arasında ise sistem kararlı duruma geçmiştir. Maksimum tork 6.36 Nm, ortalama tork 4.80 Nm olarak ölçülmüştür.

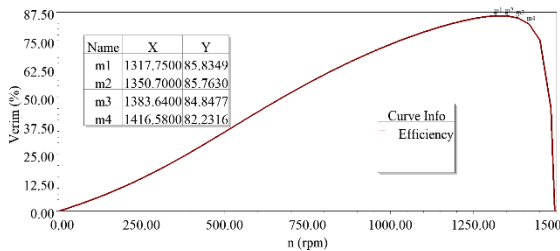
Şekil 15'te 12 oluk 4 kutuplu FSDAM (XG196/96) manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 15. Akı yoğunluğu (12 Oluklu_XG196/96)

Stator oluklarının uçlarında ve stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) olduğu görülmektedir.

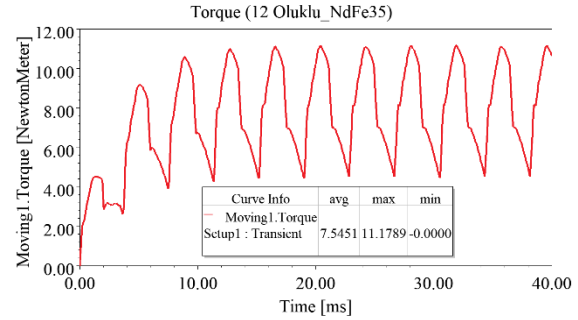
Şekil 16'da 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısının kullanılmasıyla verimin hıza göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 16. Verim-hız eğrisi (12 Oluklu_NdFe35)

0–500 rpm aralığında verim düşüktür. 500–1300 rpm arasında hızla artarak %85.7 ile 1250–1300 rpm civarında maksimum seviyeye ulaşır. 1350 rpm'den yüksek hızlarda verim azalmaya başlar; 1500 rpm'de ise ani bir düşüş görülmüştür.

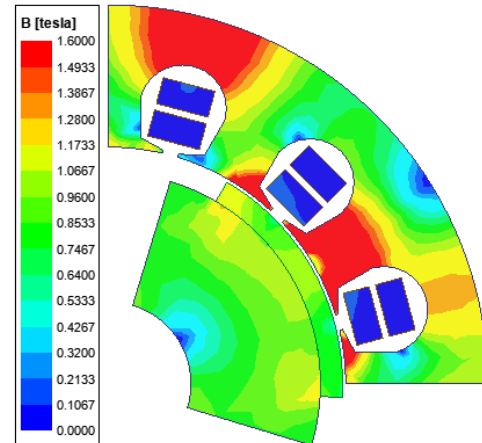
Şekil 17'de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısı için zamana göre göre tork grafiği gösterilmiştir.



Şekil 17. Tork-zaman eğrisi (12 Oluklu_NdFe35)

0-10 ms zaman aralığında, tork hızla yükseliyor. 10-40 ms zaman aralığında kararlı duruma ulaşmaktadır. Maksimum tork 11.17 Nm, ortalama tork 7.54 Nm civarındadır.

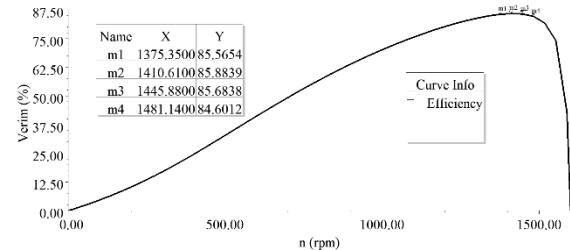
Şekil 18'de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (NdFe35) manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 18. Akı yoğunluğu (12 Oluklu_NdFe35)

Stator dişlerinde ve stator diş uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) görülmektedir.

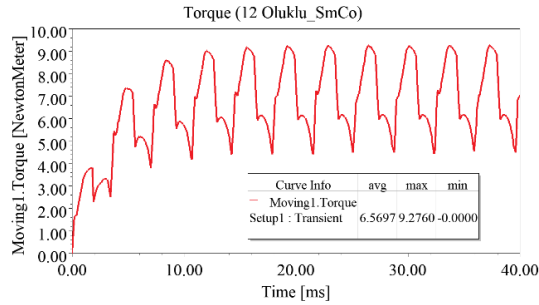
Şekil 19'da 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısının kullanılmasıyla elde edilen verim-hız eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 19. Verim-hız eğrisi (12 Oluklu_SmCo)

0-500 rpm hız aralığında verim çok düşüktür. 500-1410 rpm hız aralığında ise, verim hızla artarak en yüksek seviyeye ulaşıyor. Motorun en verimli çalıştığı bölge burasıdır. Tepe noktasında (1400-1420 rpm civarı) %85.9 seviyesine ulaşıyor. Daha yüksek hızlarda (>1445 rpm), verim düşmeye başlıyor. 1600 rpm civarında ani verim düşüşü gerçekleşmiştir.

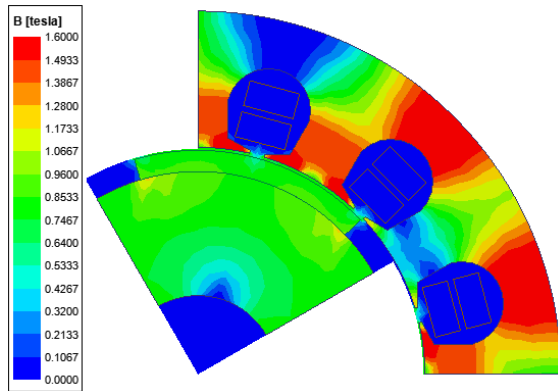
Şekil 20’de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM’da SmCo mıknatısına ait tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 20. Tork-zaman eğrisi (12 Oluklu_SmCo)

0-5 ms zaman aralığında, tork hızla yükseldikten sonra 5. ms’den itibaren kararlı duruma ulaşmaktadır. Maksimum tork 9.27 Nm, ortalama tork 6.56 Nm’dir.

Şekil 21’de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (SmCo) manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.



Şekil 21. Akı yoğunluğu (12 Oluklu_SmCo)

Stator boyunduruğunda ve stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

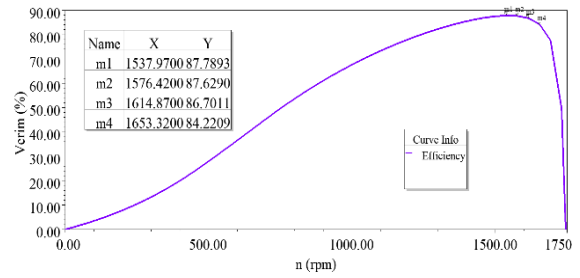
Tablo 3’te 12 oluklu tasarıma göre XG196/96, NdFe35 ve SmCo mıknatılarının simülasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 3. 12 oluklu simülasyon sonuçları

Özellik	XG196/96	NdFe35	SmCo
Verim	%85.84	%85.83	%85.88
Tork	4.80 Nm	7.54 Nm	6.56 Nm
Tork Dalganması	%132.50	%148.14	%141.31
Anma Hız	1622 rpm	1317 rpm	1410 rpm

Tüm mıknatıs türleri için verim değerleri birbirine çok yakındır (%85.83 - %85.88). SmCo en yüksek verimi sağlarken (%85.88), NdFe35 en düşük verime sahip (%85.83), ancak fark çok küçük olduğu için pratikte önemli bir avantaj veya dezavantaj oluşturmaz. NdFe35 en yüksek torku üretmiştir (7.54 Nm). SmCo, 6.56 Nm ile ikinci sırada yer alıyor. XG196/96 en düşük torku sağlıyor (4.80 Nm). NdFe35’in yüksek manyetik özellikleri, en yüksek torku üretmesini sağlamıştır. NdFe35, %148.14 ile en yüksek tork dalgalanmasına sahip. XG196/96 en düşük tork dalgalanmasını sağlamıştır (%132.50). SmCo %141.31 ile orta seviyede yer alıyor. Yüksek tork dalgalanması, motorun titreşim ve gürültü seviyesini artırabilir. Bu nedenle, XG196/96 titreşim açısından en stabil motor performansını sunuyor. XG196/96 en yüksek anma hızını sunuyor (1622 rpm). NdFe35 en düşük anma hızına sahiptir (1317 rpm). SmCo, 1410 rpm ile orta seviyede bulunuyor. NdFe35 yüksek tork ürettiği için daha düşük anma hızı sağlamaktadır.

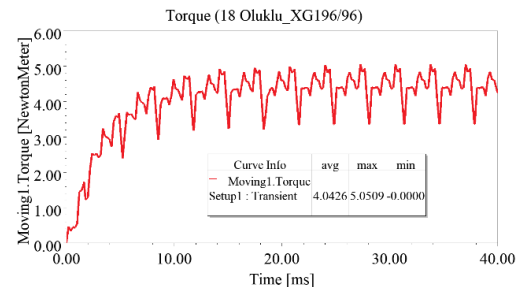
Şekil 22’de 18 oluk 4 kutuplu FSDAM’da XG196/96 mıknatısının kullanılmasıyla elde edilen verim-hız grafiği verilmiştir.



Şekil 22. Verim-hız eğrisi (18 Oluklu_XG196/96)

Düşük hızlarda (0-500 rpm), verim oldukça düşüktür. Orta hızlarda (500-1535 rpm), verim hızla artarak en yüksek seviyeye ulaşıyor. 1520-1540 rpm hız aralığında, %87.78 seviyesine ulaşıyor. 1570 rpm’den yüksek hızlarda verim düşmeye başlıyor. 1650 rpm civarında ani verim düşüşü gözlemlenmiştir.

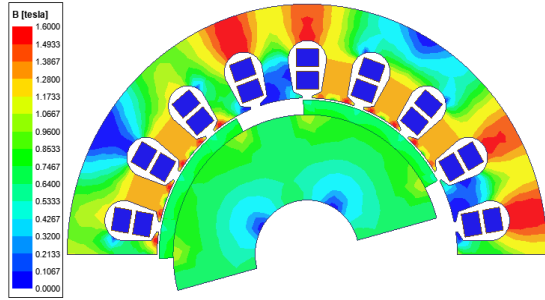
Şekil 23’te 12 oluk 4 kutuplu FSDAM’da XG196/96 mıknatısına ait tork-zaman değişimi gösterilmiştir.



Şekil 23. Tork-zaman eğrisi (18 Oluklu_XG196/96)

Tork-zaman grafiği incelendiğinde, 0-5 ms zaman aralığında, tork artışı görülmektedir. 5-40 ms zaman aralığında kararlı duruma ulaştığı durumda maksimum tork 5.05 Nm, ortalama tork 4.04 Nm seviyesindedir.

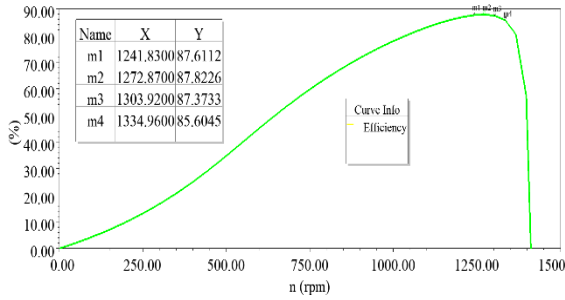
Şekil 24'te 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da XG196/96 mıknatısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 24. Akı yoğunluğu (18 Oluklu_XG196/96)

Stator diş uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

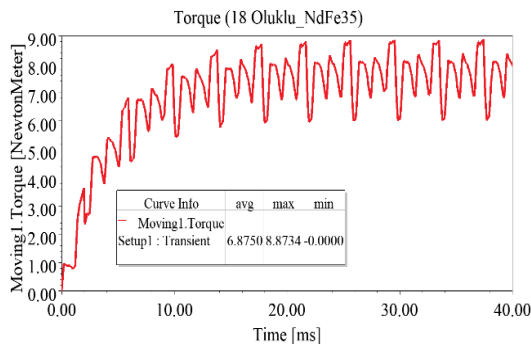
Şekil 25'te 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (NdFe35) verim-hız eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 25. Verim-hız eğrisi (18 Oluklu_NdFe35)

Maksimum verime (%87.82) 1240-1280 rpm seviyesinde ulaşılmaktadır. 1300 rpm'den yüksek hızlarda verim düşmeye başlıyor. 1350 rpm civarında ani verim düşüşü gerçekleşmiştir.

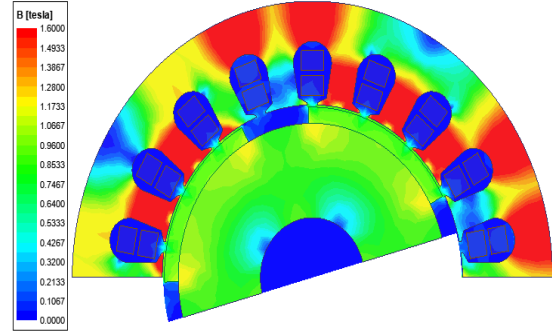
Şekil 26'da 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısı için zamana göre tork değişimi gösterilmiştir.



Şekil 26. Tork-zaman eğrisi (18 Oluklu_NdFe35)

0-5 ms zaman aralığındaki tork artışından sonra kararlı çalışma durumuna ulaştığı görülmektedir. Maksimum tork 8.87 Nm, ortalama tork 6.87 Nm civarındadır.

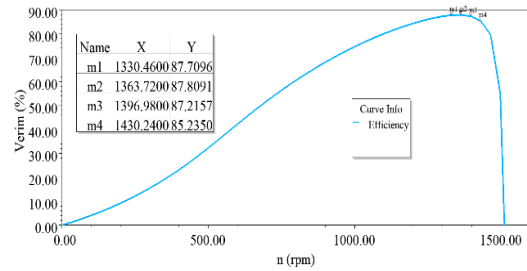
Şekil 27'de 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 27. Akı yoğunluğu (18 Oluklu_NdFe35)

Stator dişlerinde, stator boyunduruğunda ve stator diş uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

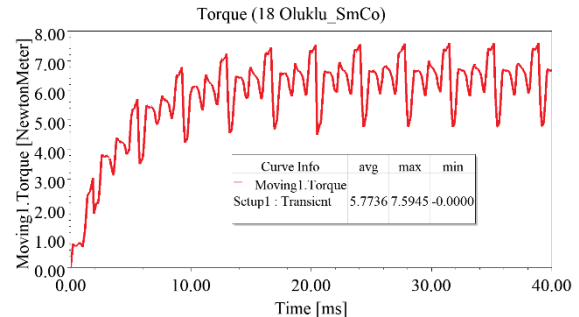
Şekil 28'de 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (SmCo) verimin hıza göre durumu gösterilmiştir.



Şekil 28. Verim-hız eğrisi (18 Oluklu_SmCo)

Motor 500-1330 rpm aralığında verim hızla artarak en verimli çalıştığı bölgeye ulaşıyor. 1340-1360 rpm hız aralığında %87.80 seviyesine ulaşıyor. 1390 rpm'de verim düşmeye başlıyor. 1400 rpm civarında verim hızla düşmektedir.

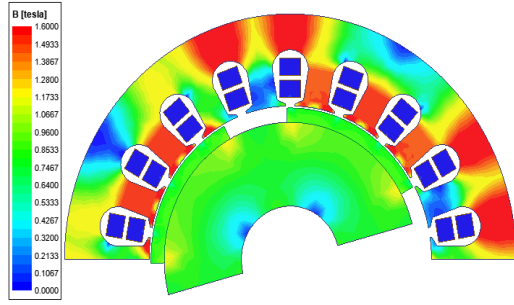
Şekil 29'da 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısına ait tork-zaman grafiği gösterilmiştir.



Şekil 29. Tork-zaman eğrisi (18 Oluklu_SmCo)

Motor çalışmaya başladığında tork hızla yükseliyor. 5-40 ms zaman aralığında kararlı duruma ulaştığı gözlemlenmiştir. Maksimum tork 7.59 Nm, ortalama tork 5.77 Nm civarındadır.

Şekil 30'da 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 30. Akı yoğunluğu (18 Oluklu_SmCo)

Stator boyunduruğunda ve stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

Tablo 4'te 18 oluklu tasarıma göre XG196/96, NdFe35 ve SmCo mıknatılarının simülasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 4. 18 oluklu simülasyon sonuçları

Özellik	XG196/96	NdFe35	SmCo
Verim	%87.78	%87.82	%87.80
Tork	4.04 Nm	6.87 Nm	5.77 Nm
Tork Dalgalanması	%125	%129.11	%131.54
Anma Hız	1517 rpm	1272 rpm	1363 rpm

Verim değerleri birbirine çok yakındır (%87.78 - %87.82 - %87.80). NdFe35 en yüksek verimi sağlıyor (%87.82), ancak fark çok küçük olduğu için üç mıknatıs arasında belirgin bir avantaj oluşturmaz. NdFe35 en yüksek torku üretiyor (6.87 Nm). SmCo 5.77 Nm ile ikinci sırada yer alıyor. XG196/96 en düşük torku üretiyor (4.04 Nm). NdFe35'in yüksek manyetik akı yoğunluğu sayesinde en yüksek tork sağlandığı görülüyor. NdFe35 %129.11 ile en yüksek tork dalgalanmasına sahiptir. SmCo %131.54 ile ikinci sırada yer alıyor. XG196/96 en düşük tork dalgalanmasını sağlıyor (%125). Düşük tork dalgalanması, motorun titreşimini ve gürültüsünü azaltacağı için XG196/96 bu açıdan avantajlıdır. XG196/96 en yüksek anma hızına sahiptir (1517 rpm). NdFe35 en düşük hızda çalışıyor (1272 rpm). SmCo, 1363 rpm ile orta seviyede bulunuyor. Yüksek tork üreten NdFe35'in, motor hızını düşürdüğü gözlemleniyor.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, FSDAM tasarımında mıknatıs malzemesi ve stator oluk sayısının motor performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, hem malzeme seçiminin hem de

geometrik parametrelerin motor performansı üzerinde belirleyici roller üstlendiğini göstermektedir.

Mıknatıs malzemeleri karşılaştırıldığında, NdFeB en yüksek tork değerlerini sunmasına rağmen, tork dalgalanmalarının da en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek güç gerektiren uygulamalarda NdFeB'nin tercih edilebileceğini, ancak motor kontrol stratejilerinde gelişmiş algoritmaların gerekebileceğini ortaya koymaktadır. SmCo, dengeli bir tork üretimi ile birlikte orta seviyede dalgalanma ve hız sunarak, çok yönlü bir performans sergilemiştir. Bu da SmCo'yu hem tork hem de dinamik tepki açısından denge arayan uygulamalar (İnsansız hava araçları, Radar tahrik sistemleri) için uygun hale getirmektedir. XG196/96 ise en düşük tork üretimi ile birlikte en düşük tork dalgalanması ve en yüksek hızı sağlayarak, yüksek hız ve düşük titreşim gerektiren senaryolarda öne çıkmaktadır. Bu bulgular, uygulama bazlı malzeme seçiminde performans kriterlerinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Stator oluk sayısının etkilerine bakıldığında, 12 oluklu yapı daha yüksek tork sunmakla birlikte, tork dalgalanmaları belirgin şekilde artmakta ve hız düşmektedir. Bu yapı, yüksek güç gerektiren ancak dalgalanmanın tolere edilebileceği uygulamalara hitap etmektedir. 18 oluklu yapı, tork seviyesi ile tork dalgalanması arasında makul bir denge kurarak, hem performans hem de kararlılık açısından optimal bir yapı sunmaktadır. 24 oluklu yapı ise tork dalgalanmalarının en düşük olduğu ve kararlılığın yüksek olduğu bir yapı olmakla birlikte, tork seviyesinin görece daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, bu yapının düşük titreşimli ve sessiz çalışan motor uygulamaları (Elektrikli cam açma motorları) için daha uygun olabileceğini düşündürmektedir.

Genel olarak, 18 oluklu yapı, motor tasarımında performans ve kararlılık arasında optimum dengeyi kuran bir yapı olarak öne çıkmıştır. Ayrıca, mıknatıs malzemesi ve oluk sayısı arasında karşılıklı etkileşimlerin olduğu görülmüş; örneğin, düşük torklu ancak kararlı bir mıknatıs malzemesinin (XG196/96), yüksek oluk sayısı ile desteklenerek performansın dengelenebileceği anlaşılmıştır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, FSDAM tasarım sürecinde mıknatıs malzemesi seçimi ve stator oluk sayısının motor performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elektromanyetik analizler doğrultusunda, farklı mıknatıs malzemelerinin (XG196/96, NdFeB, SmCo) manyetik doyma özellikleri ile bu malzemelerin tork dalgalanmalarına etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, mıknatıs malzemesi seçiminde manyetik doyma davranışının motor verimliliği açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmada ayrıca, stator oluk sayısındaki değişimin ortalama tork üretimi, tork dalgalanmaları ve manyetik akı yoğunlukları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Motorun dış çapı, iç çapı, mıknatıs kalınlığı ve tel çapı sabit tutulurken; her senaryoda oluk başına iletken sayısı, oluk yüksekliği ve genişliği yeniden belirlenerek performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, stator oluk sayısının artırılmasının tork dalgalanmalarını azalttığını ve motorun çalışma kararlılığını iyileştirdiğini göstermektedir.

Genel olarak, bu çalışma mıknatıs malzemesi ve stator oluk sayısının FSDAM performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, daha verimli ve stabil motor tasarımları için önemli bir referans sunmaktadır. Bulgular, hem motor tasarımının optimizasyonuna katkı sağlamakta hem de gelecekte yapılacak çalışmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

24 oluklu yapı için: Yüksek tork isteniyorsa, NdFe35 en iyi seçim gibi görünmektedir, ancak bu durumda tork dalgalanması yüksek ve hız en düşük seviyededir. Daha dengeli bir performans isteniyorsa SmCo iyi bir seçenek olabilir çünkü orta seviyede tork üretirken dalgalanma ve hız açısından daha dengeli bir performans sergilemektedir. XG196/96, ise en düşük tork değerine sahip olmasına rağmen en yüksek hızı sunmakta ve tork dalgalanması en düşük seviyede bulunmaktadır. Buradaki seçim, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olacaktır. Yüksek hız ve düşük titreşim gerekiyorsa XG196/96, yüksek tork gerekiyorsa NdFe35 tercih edilebilir.

12 oluklu yapı için: Yüksek tork gerektiren uygulamalarda NdFe35 en iyi seçim olabilir, ancak tork dalgalanması oldukça yüksek ve motor hızıda düşüktür. Daha dengeli bir performans istenirse SmCo uygun olabilir. Tork seviyesi iyi, tork dalgalanması orta seviyede ve hız da uygundur. Yüksek hız ve düşük titreşim gereken durumlar için XG196/96 daha avantajlı performans sergilediği görülmektedir. Ancak tork seviyesi en düşük olduğu için yüksek yük gerektiren uygulamalar için uygun olmayabilir.

18 oluklu yapı için: Yüksek tork gerektiren uygulamalarda NdFe35 en iyi seçim olabilir, ancak tork dalgalanması en yüksek seviyede ve hız en düşüktür. Dengeli bir performans için SmCo uygun olabilir. Tork seviyesi iyi, tork dalgalanması orta seviyede ve hız da uygundur. Yüksek hız ve düşük titreşim gereken durumlar için XG196/96 avantajlı görünmektedir. Ancak düşük tork değerine sahip olduğu için yüksek yük gerektiren uygulamalarda tercih edilmeyebilir.

Genel karşılaştırmalar: 24 oluklu motorla kıyaslandığında, 12 oluklu motor genel olarak daha yüksek tork üretmektedir, ancak tork dalgalanması daha fazladır. Yani, 12 oluklu motor, daha güçlü ancak daha düzensiz bir tork karakteristiği sunmaktadır. 18 oluklu motor, 12 olukluya göre daha düşük tork dalgalanması sağlar, bu da daha stabil bir çalışma sunar. 24 oluklu motorla kıyaslandığında ise tork

seviyesi daha yüksek olmakla birlikte, hız biraz daha düşüktür. Sonuç olarak, 18 oluklu motor, tork ve dalgalanma açısından dengeli bir yapı sunar; bu da hem stabilite hem de güç açısından avantajlı bir seçenektir.

VI. ETİK KURUL ONAYI ve ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Chen, Z., Li, H., & Xu, L. (2021). A review on BLDC motor design and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(4), 3321–3330.
- [2] Song, J., et al. (2022). High-efficiency BLDC motors for electric mobility: Design trends and challenges. Energies, 15(3), 875.
- [3] Ozturk, S. B., & Toliyat, H. A. (2020). Direct torque control of brushless DC motors. IEEE Transactions on Power Electronics, 35(7), 7191–7200.
- [4] Kim, D. Y., et al. (2021). Magnet shape optimization for torque ripple reduction in BLDC motors. IEEE Access, 9, 16501–16510.
- [5] Li, X., et al. (2023). Investigation on slot/pole combinations for performance enhancement in BLDC motors. Electric Power Components and Systems, 51(2), 123–135.
- [6] Bianchi, N., et al. (2020). Design techniques for torque ripple minimization in BLDC motors. IET Electric Power Applications, 14(5), 711–720.
- [7] Park, C., et al. (2021). Influence of magnet material on cogging torque in surface-mounted PM motors. IEEE Transactions on Magnetics, 57(6), 1–4.
- [8] Kwon, J., et al. (2020). Comparison of permanent magnet materials for EV applications. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 499, 166191.
- [9] Zhao, H., et al. (2023). Material impact on electromagnetic performance of BLDC machines. Materials, 16(2), 445.
- [10] Luo, Y., et al. (2021). Performance comparison of SmCo and NdFeB magnets in PM motors. Applied Sciences, 11(6), 2651.
- [11] Ren, Y., et al. (2022). Review of rare-earth-free magnets for BLDC motors. Journal of Materials Science, 57(10), 5672–5690.
- [12] Tan, X., et al. (2023). Investigation on low-cost ferrite magnets in electric motors. IEEE Access, 11, 23022–23032.
- [13] Ersoy, H., & Kose, E. (2020). Slot number optimization in axial flux motors. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 28(4), 2146–2156.
- [14] Aydin, M., et al. (2021). Stator slot/pole number effects on torque ripple in BLDC motors. Electrical Engineering, 103(4), 2207–2216.

-
- [15] Wang, L., et al. (2022). Noise and vibration analysis in BLDC motors with various slot/pole combinations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 172, 108956.
- [16] Sezer, O., & Karabiber, A. (2020). Slot shape and skewing effects in BLDC motors. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(6), 1305–1313.
- [17] Evirgen, S., & Acar, T. (2021). Performance evaluation of different slot/pole configurations in BLDC motors. *International Journal of Energy Research*, 45(12), 17256–17268.
- [18] Gul, I., et al. (2023). Multi-objective optimization of BLDC motor design using finite element method. *IEEE Access*, 11, 129003–129014.
- [19] Kaya, E., & Demir, A. (2022). Parametric study on torque characteristics of BLDC motors. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 28(5), 35–42.
- [20] Ozdemir, M., et al. (2021). Comparative analysis of magnet materials in PM motors. *Acta Physica Polonica A*, 139(4), 520–525.
- [21] Hendershot, J. R. (2010). *Design of brushless permanent-magnet machines*. Venice, Florida :Motor Design Books.
- [22] Hanselman, Duane C. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. Cranston, R.I. :The Writers' Collective.
- [23] Mohanraj, D. et al. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54833-54869.
- [24] Gürdal, O. (2001). *Elektrik Makinaları Tasarımı*, Atlas Yayın.
- [25] G.Tatar, (2017), *Hafif elektrikli araçlar için akıllı FSDAM sürücü ve kontrolör tasarımı*, Yüksek Lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Tosun, Ö., Oyman Serteller, N.F. (2019). Fırçasız Doğru Akım Motoru Stator Oluk Geometrisinin Ve Sargı Yapısının Sey İle Analizi, ISMSIT 2019, Ankara, Türkiye, 105-111.
- [27] Miller, T.J.E. (1989). *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Clarendon Press, Oxford University Press.
- [28] Soyaslan, M. (2023). External Rotor BLDC Motor Design for a Light Electric Vehicle: 24 Slot/22 Pole Combination. in *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2023 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [29] Toren, M. (2022). Comparative analysis of the magnet effects on the permanent magnet BLDC motor performance used in electric vehicles. *Electrical Engineering*, 104(5), 3411–3423.
- [30] Patel, A.N. (2023). Slot opening displacement technique for cogging torque reduction of axial flux brushless DC motor for electric two-wheeler application. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2023(2), 7–13.
- [31] Kıyak, İ., & Kaya, K. Y. (2020). Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan İndüksiyon/Sabit Mıknatıslı Motor Sürücülerinin Simülasyonu ve Motor Dinamiklerinin Analizi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(2), 152-157.
- [32] Kumar, A. et al. (2020). Analysis of Permanent Magnet BLDC Motor Design with Different Slot Type. 1-6.
- [33] Sundaram, J., Raj, K., Stephen, J.E. et al., (2025) Advanced reduction of torque ripple in BLDC motors using polynomial reference stator current generation. *Int J Adv Manuf Technol*.