



Bir Manyetik Dişli Tasarımının Analizi ve Performans En İyileştirmesi

Analysis and Performance Optimization of a Magnetic Gear Design

Murat Keleş¹, Cengiz Baykasoğlu²

¹ Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü
Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
murat.keles@tubitak.gov.tr

²Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Hitit Üniversitesi
cengizbaykasoğlu@hitit.edu.tr

Özet

Sürtünmesiz ve yağsız ortamlarda çalışabilen, nadir element ve hallbach dizilime sahip miktatsızla beraber aktarma oranı 5.33 olan bir eşeksenli manyetik dişli tasarlanmıştır ve 2 boyutlu sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı ile elektromanyetik sayısal analizleri gerçekleştirilerek özellikle kanatçık tahrik sistemlerinde kullanılacak güç aktarım elemanı geliştirilmiştir. Hallbach ile normal dizimli tasarımların performansları ayrıca çalışma kapsamında karşılaştırılmıştır. Performans en iyileştirmesi kapsamında ise hallbach dizimli tasarımda çeşitli geometrik parametreler değişken olarak tanımlanıp belirli bir hacimde farklı modeller geliştirilerek sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, tasarım parametrelerinin sisteme olan etkisi incelenerek en yüksek Hacimsel Tork Yoğunluğu (HTY)'na sahip geometrik model belirlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları ile hallbach dizilimin normal dizilime göre % 56 HTY'nu artırdığı ve en iyileştirme çalışmasının sonucunda hedeflenen tasarım kriterlerini sağlayan 215.5 Nm/L HTY değerine sahip tasarım elde edilmiştir.

Abstract

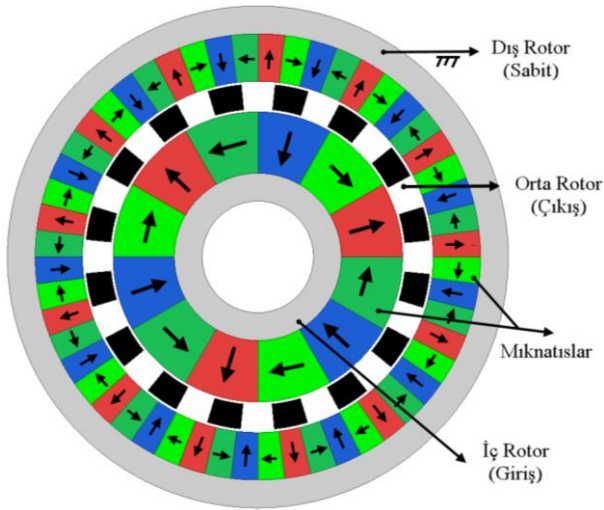
A magnetic gear with a transmission ratio of 5.33 that operates in frictionless and oil-free environments has been designed together with a rare element and hallbach array magnet. Electromagnetic numerical analyses were performed using 2 dimensional finite element modeling approach and the power drivetrain that can be used especially in fin actuation system has been developed. Hallbach and normal array performances were also compared in this study. As a part of performance optimization, different models were developed in a certain volume by defining various geometric parameters as variables in the hallbach array magnet design. In this context, the effects of design parameters on the system were examined and the geometric model with the highest Volumetric Torque Density (VTD) was determined. Numerical analysis results showed that the design with hallbach array has 56% higher VTD than the normal array design. As a result of the optimization study, a new design that meets the design criteria and has VTD values of 215.5 Nm/L was developed.

1. Giriş

Teknoloji alanında yapılan her bir yeni gelişime paralel olarak savunma, uzay ve havacılık sanayisinde yeni gelişmelerin ve yeni ürünlerin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Savunma, uzay ve havacılık uygulamalarında verimliliği yüksek olması gereken mekanizma tasarımlarında sınırlı enerji ile çalışabilen sistemlerin hayata geçirilmesi kritik olup, gereksinimlerin karşılanabilmesi noktasında bu tasarımlarda yeni yaklaşımların veya teknolojilerin dikkate alınması kaçınılmazdır. Savunma sanayii sektöründe bu gelişmelerin izleri özellikle mühimmat teknolojisinde açıkça görülebilir. Bu kapsamda, hassas vuruş kapasitesine sahip, gelişmiş menzilli, yüksek oranda zarar verebilme kabiliyetine sahip ve uygun maliyetli yeni nesil mühimmat tasarımları yeni yaklaşımlar ve teknolojiler dikkate alınarak sürekli olarak geliştirilmektedir.

Uçuş maliyeti ve risklerinden dolayı, havadan karaya atılan mühimmatlarda hedefin tek atış da yok edilmesi istenmektedir. Bu noktada, hedefin tek atışta vurabilmesi için gelen güdüm emirlerini anlık olarak takip edebilen Kanatçık Tahrik Sistemi (KTS)'ne ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan, mühimmatın başarılı bir uçuş yapabilmesi için KTS'nin davranışına etki edecek tüm parametrelerin kontrol edilerek, belirsizliklerin en aza indirgenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, KTS düzeyinde oluşan her hata, doğrudan mühimmat yönelimini etkileyeceği için uçuş başarısız olabilecektir [1]. Bu noktada, KTS'ler den istenilen çıktıların elde edilebilmesi amacıyla birçok yeni mekanizma önerilmiş veya mevcut mekanizmaların performanslarının iyileştirilmesi noktasında birçok çalışma yapılmıştır. KTS ve benzer sistemlerin güç aktarma organları bu bağlamda dikkate alınması gerek unsurlar olup, bu sistemlerde güç aktarımı için verimliliği yüksek mekanizmaların kullanılması gerekmektedir. Bu noktada, mekanik dişliler özellikle yüksek aktarma oranına ihtiyaç duyulan uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Öte yandan, mekanik dişliler yağlı, gürültülü ve titreşimli şekilde çalıştıklarından dolayı mekanik tasarımı güçleştirmekte olup, bu dişlilerin gelişim evrelerinde ömür artırımını, yağsız çalışma ve bakım maliyetlerini azaltma yönünden birçok çalışma yapılmıştır.

Teknolojinin ilerleyişi ve gereksinimlerin farklılaşması ile mekanik dişlilerin yeterli olmadığı sistemlerde güç aktarımı yapabilecek Manyetik Dişliler (MD) son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. 1980'li yıllardan sonra nadir doğal (*ing. rare earth*) elementlerin birleşimi ile meydana gelen NdFeB mıknatıslarının keşfi MD'lerin gelişmesine önemli katkı sağlamıştır. MD sistemleri özellikle temassız ve yağsız çalışabilme özellikleri ile ön plana çıkmakta, bakım maliyetlerini düşürmekte ve düşük titreşim seviyeleri ile sisteme çok fazla yük gelmesini engellemektedir [2], [3]. MD'lerin literatür çalışmalarında en çok karşılaşılan tipi olan eşeksenli (*ing. coaxial*) MD'ler, mıknatısların birbirlerine olan itme ve çekme kuvvetlerinden yararlanılarak belirli bir aktarma oranında güç aktarımı sağlamaktadır [4]. Eşeksenli bir MD şematik olarak Şekil 1 de gösterildiği gibi dış, iç ve orta rotor olarak 3 ana bölüme ayrılmaktadır. Dış ve iç rotorlarda özel hesaplanan sayılarda ve geometrilerde mıknatıs çiftleri bulunmakta ve orta rotor kısmına da tasarımdan çıkan sayıya göre ferromanyetik malzemeden üretilmiş özel geometrik tasarım yerleştirilmektedir. Dış rotor sabit kalacak, orta ve iç rotor dönüsel hareket etmeye izin verecek şekilde mekanik yataklanmaktadır. Bu tip çalışan MD'de güç aktarımı, iç rotor giriş, orta rotor da çıkış olarak belirlenmektedir. Bazı çalışmalarda ise orta rotor sabitlenerek iç ve dış rotorların dönüşüne izin verilerek güç aktarımı sağlanmaktadır [5].



Şekil 1. Hallbach Mıknatıs Dizilimli Eşeksenli Manyetik Dişli.

MD'ler karmaşık manyetik yapıları ve HTY değerlerinin düşük olması nedeniyle başlangıçta çok fazla ilgi görmemişlerdir. Öte yandan, Atallah ve Howe [6], 2001 yılında yeni bir topolojik yaklaşım gerçekleştirerek görece yüksek performanslı eşeksenli MD tasarlamışlardır. Bu noktada, diğer güç aktarma organları ile karşılaştırıldığında elde edilen umut vadeci HTY değeri alternatif tasarımların ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır [7], [8]. Praslicka ve ark [9], çalışmalarında MD'lerin güç aktarım performansında özellikle mıknatısların homojen dizilimlerinin, sınıflarının, sayılarının ve mekanik tasarım boşluklarının etkilerini incelemişlerdir. Başka bir çalışmada, Li ve Bird [10], çeşitli çap ve boylarda MD tasarımları geliştirilerek tasarımların performanslarını karşılaştırmış ve en iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. MD'lerin performansını etkileyen en önemli kriterlerinden olan hacimsel tork yoğunluğu (HTY), çıkış tarafından verilecek tork kuvvetinin, mıknatısların yerleştirildiği aktif hacme oranı olarak tanımlanmaktadır [11]. Bu oranın

artmasıyla MD'ler mekanik dişlilere yakınsamaktadır [12]. MD'lerin HTY'lerinin yüksek olması noktasında mıknatıs çifti geometrisi ve sayıları, orta rotorun geometri ve sayıları ayrıca önemli parametrelerdir [2]. Diğer taraftan, eşeksenli MD'lerin genel çalışma prensibi olarak orta rotorun ferromanyetik malzemeden kullanılarak akı iletiminin sağlanması ve manyetik alan geçirgenliğinin yüksek olması gerekmektedir [13]. Bu kapsamda, orta rotorda laminasyonlu çelik kullanılarak manyetik kayıpların azaltıldığı çalışmalar bulunmaktadır [14]. Ayrıca, MD'ler de mıknatısların kuzey ve güney kutuplarının dizilim yönleri manyetik tasarıma göre önem kazanmaktadır. Bu noktada, manyetik akının kaçmaması için mıknatıs diziliminde normal dizim yerine özel hallbach dizilim metodu alternatif olarak kullanılmaktadır [15].

MD'ler de ilk tasarım süreçleri ve parametrik çalışmalar 2 Boyutlu (2B) sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile manyetik alan hesaplamaları yapılarak, mıknatıs kutup çiftlerinin birbirini çekmesi ya da itmesi ile oluşacak kuvvetlerin sayısal hesaplama çalışmaları ile başlamaktadır. Çalışmalarda genelde JMAG®, COSMOS® veya ANSYS MAXWELL® gibi programlardan faydalanılarak statik veya dinamik manyetik çözümleme yöntemleri ile sayısal analizler gerçekleştirilmektedir [9], [16], [14], [17].

Literatürde halen MD'lerin parametrik optimizasyonları ve uygulamaları konularında kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca, bu MD'lerin KTS uygulamalarında kullanılabilirliği ile ilgili kapsamlı bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu motivasyonla, bu çalışma kapsamında bir KTS için hedeflenen geometri, HTY, aktarma oranı ve çıkış tork değerlerini sağlayabilecek bir hallbach dizilimli mıknatısa sahip eşeksenli MD tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, sayısal ve teorik hesaplamalar gerçekleştirilerek hallbach dizilimli mıknatıs modeli oluşturulmuş ve farklı tasarım parametreleri dikkate alınarak en iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. MD Tasarımları, Analizler ve Bulgular

2.1. Hesaplamalar

Eşeksenli MD'lere ait genel bağıntılar Denklem 1-7'de sunulmuştur. Burada, n_2 orta rotorda bulunan ferromanyetik sayısı, p_1 iç rotorda bulunan mıknatısların kutup çifti sayısı ve p_3 dış rotorda bulunan mıknatısların kutup çifti sayısıdır. Ayrıca, T_1 iç rotor tork değeri, T_2 orta rotor tork değeri, ω_1 iç rotor açısal hız, ω_2 çıkış açısal hız ve G_{12} aktarma oranıdır.

$$n_2 = p_1 + p_3 \quad (1)$$

$$\omega_2 n_2 = \omega_1 p_1 + \omega_3 p_3 \quad (2)$$

$$T_1 \omega_1 + T_2 \omega_2 + T_3 \omega_3 = 0 \quad (3)$$

Dış rotor sabit olduğunda $\omega_3 = 0$ olmaktadır. Bu noktada denklemler sadeleştirilerek aşağıdaki bağıntılar elde edilebilir.

$$\omega_1 = \frac{n_2}{p_1} \omega_2 \quad (4)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2}{p_1} = G_{12} \quad (5)$$

$$T_1 \omega_1 = -T_2 \omega_2 \quad (6)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{n_2}{p_1} = -G_{12} \quad (7)$$

Denklem 7’de görüldüğü gibi giriş çıkış tork ve hız oranları dışlı oranını belirlemekte ve eşeksenli MD için kayıplar yok sayıldığında aktarma oranı doğrudan hesaplanabilmektedir. Aktarma oranının eksi (-) işaretli olması dönüş yönlerinin ters olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada dış rotor sabit, orta ve iç rotor dönecek şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. HTY değeri tasarım için önemli parametrelerden biridir. Bu noktada, HTY Denklem 8 kullanılarak çıkış tork değerinin, T_2 aktif hacme bölümünden hesaplanmıştır [15].

$$HTY = T_v = \frac{T_2}{\pi R_o^2 d} \quad (8)$$

KTS tasarım çalışmalarında kullanılması düşünülen eşeksenli MD’nin hacim ve performans hedef kriterleri Çizelge 1’de gösterilmiştir. Burada, dış çap, boy gibi mekanik kriterlerinin yanı sıra aktarma oranı, çıkış tork değeri ve aktif hacme bağlı HTY değeri performans açısından önemli kriterler olarak seçilmiştir.

Çizelge 1: Performans Hedef Kriterleri

Açıklama	Değer	Birim
Dış çap	90	mm
Aktarma oranı	5.33 ~	
Tork yoğunluğu	200 ~	Nm / L
Çıkış Tork	60	Nm
Boy	50	mm

2.2. Tasarım Parametreleri

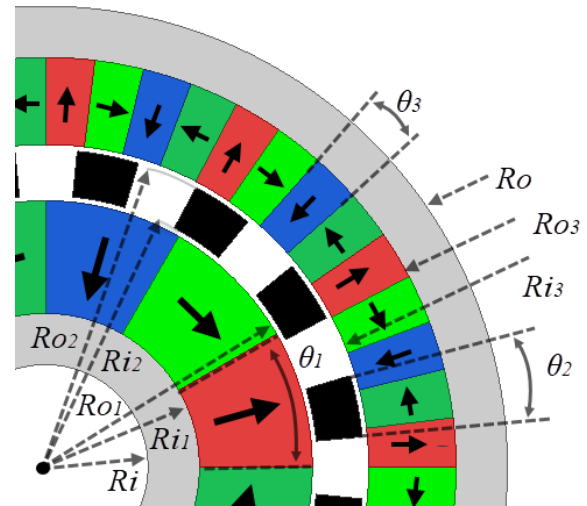
Belirlenen hedef aktarma oranı değerine yaklaşabilmek için p_1 , n_2 ve p_3 sayıları için farklı kombinasyonlarda denemeler yapılmıştır. Aktarma oranının belirleyebilmek için n_2 sayısı çift seçilerek oluşabilecek radyal kuvvetlerin eşit dağılımı düşünülmüş ve mekanik esnemeler en aza indirmiştir. p_1 ve p_3 kutup çifti sayıları asal sayı seçilerek harmonik etkilerin en aza indirilmesi hedeflenmiştir [18]. Aktarma oranının tam sayı olmaması durumunda oluşan tork salınımları ve gürültüleri azaldığı bilgileri kullanılarak tablodaki değerler olan p_1 , n_2 ve p_3 sırasıyla 3, 16, 13 seçilerek tasarım gerçekleştirilmiştir. Seçilen değerler ile aktarma oranı Denklem 7’den 5.33 hesaplanmıştır. Dış çap bilgisi ve boyu hedeflenen tasarıma girdi olmuş ve tasarım başlangıç parametre değerleri belirlenmiştir. Özellikle HTY yüksek olduğu tasarımlarda hava boşluğu en aza indirilerek yüksek tork çıktılar elde edilmeye çalışılmıştır [12]. Hava boşluğu Çizelge 2’deki değer seçilerek üretilebilirlik dikkate alınmıştır. Ayrıca dış ve iç çap parametrelerinin cidar kalınlıkları esnemeler ve üretim yöntemleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Mıknatıs malzemesi seçiminde özellikle hazır ürün olarak kolay tedarik edilebilecek N42 kalite grubu 1.25 T değerine sahip ürün seçilmiştir.

Çizelge 2: Tasarım Parametreleri

	Açıklama	Değer	Birim
İç rotor	İç yarıçap, R_{i1}	14	mm
	Dış yarıçap, R_{o1}	24	mm
	Kutup çifti, p_1	3	-
	Açı, θ_1	$180/(2p_1)$	°
	Elektrik çeliği	1008	
Orta rotor	İç yarıçap, R_{i2}	24.5	mm
	Dış yarıçap, R_{o2}	29.5	mm
	Çelik sayısı, n_2	16	-
	Açı, θ_2	$180/(n_2)$	°
	Laminasyonlu çelik	M19-26G	
Dış rotor	İç yarıçap, R_{i3}	31.0	mm
	Dış yarıçap, R_{o3}	40.0	mm
	Kutup çifti, p_3	13	-
	Açı, θ_3	$180/(2p_3)$	°
	Elektrik çeliği	1008	
Diğer	Mıknatıs NdFeB	1.25	T
	İç yarıçap, R_i	10	mm
	Dış yarıçap, R_o	45	mm
	Hava Boşluğu	0.5	mm
	Eksenel boy, d	50	mm
	Sıkıştırma faktörü	0.96	-

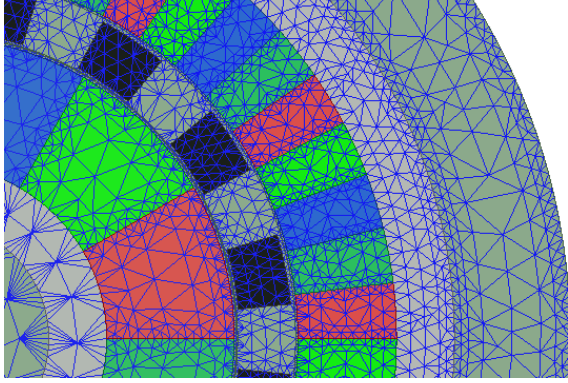
2.3. Elektromanyetik Sayısal Analizler

Literatür çalışmalarında 2B ile 3B sayısal analiz sonuçları benzerlik gösterdiği için çözümleme sürecini azaltmak ve değişkenler arasında daha fazla çözüm elde edebilmek için analizlerde 2B sayısal modelleme yaklaşımı kullanılmıştır [15]. Çizelge 2’den alınan değerler ile ANSYS Electromagnetics Suite 17.2® ‘in Maxwell 2D Design Magnetostatic modülü seçilerek oluşturulan katı modelde ilk olarak belirlenen malzemeler ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Mıknatıs yönleri Şekil 2’ye göre, mıknatıs değerleri de Çizelge 2’ye göre tanımlanarak sayısal analiz için modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Katı model çiziminde boşluk olarak belirlenen yerler vakumlu bölge olarak tanımlanmıştır. Orta rotor malzemesi HTY’nun performansını etkileyen en önemli bölüm olmasından dolayı mıknatısların oluşturduğu manyetik alana iyi tepki verebilen ferromanyetik laminasyonlu elektrik çeliği seçilmiştir.



Şekil 2. Manyetik Dişli Parametreleri.

Ağ yapısını oluştururken yakınsama testi yapılarak, doğruluğun ve çözüm süresinin optimizasyonu noktasında uygun çözüm ağı seçilmiştir. Geometrinin karmaşıklığından kaynaklanan kısıtlardan dolayı analizlerde 2B üçgen tip eleman kullanılmıştır. Sonuç olarak Şekil 3'de görülen ağ yapısı oluşturulmuş ve çözümleme bu ağ yapısı ile devam etmiştir.



Şekil 3. Ağ yapısı.

Analiz sınır şartlarında iç rotora hareket verilmeden orta rotorun dönmesi sağlanarak en yüksek tork kuvvetini veren açı hesaplanmış ve o açı değerinde en yüksek değerler üzerinden tasarım gerçekleştirilmiştir. Başlangıç parametreleri kullanılarak normal ve hallbach dizilimli ilk sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Orta rotordan ölçülen en yüksek tork değerleri ve buna bağlı olarak Denklem 8 kullanılarak hesaplanan HTY değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Çizelge 3'den görülebileceği gibi mıknatıs diziliminde normal ile hallbach dizilimlerinin tork değerinde dikkate değer farklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, sonraki süreçte tasarım parametre en iyileştirme çalışmalarına hallbach dizilimli mıknatıs ile devam edilmiştir. Ayrıca sayısal çözümleme ile çıkış ve giriş tork arasında oluşan aktarma oranları hesaplanmış olup, çizelgeden görülebileceği gibi hedeflenen kriterler sağlanmaktadır.

Çizelge 3: Sayısal Analiz Sonuçları

Açıklama	Tasarım		Birim
	Normal	Hallbach	
Giriş Tork	6.75	10.31	Nm
Çıkış Tork	-35.3	-55.25	Nm
Aktarma Oranı	~5.22	~5.35	-
HTY	110.9	173	Nm/L

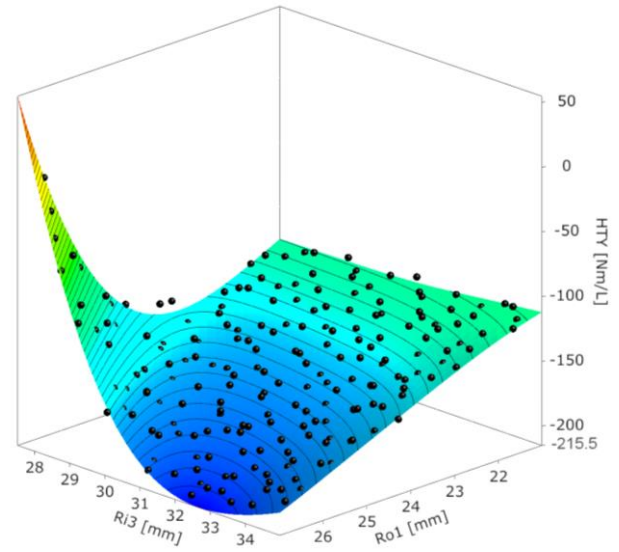
2.4. En İyileştirme Çalışmaları

En iyileştirme çalışmalarında Çizelge 2'de belirlenen değişken parametreler kullanılarak HTY performansının en yüksek olduğu tasarım noktası incelenmiştir. En iyileştirme çalışmasında sadece geometrik değişkenler kullanılarak HTY'nun performans etkileri gözlemlenmiştir. Hallbach dizilimli mıknatıs modeli kullanılarak Ro_1 , iç rotorun dış çapı Ri_3 , dış rotorun iç çapı ve θ_2 orta rotor açısı parametrelerine Çizelge 4'de belirtilen artı eksi değer aralıkları tanımlanmıştır. Tasarımın üretilebilirliği ve işlevselliği için ilk değerlerine göre aralık değeri yaklaşık %10 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4: Sistemi etkileyen parametreler

Açıklama	Değer Aralığı	Birim
İç Rotor, Dış yarıçap, Ro_1	$21 \leq Ro_1 \leq 27$	mm
Orta Rotor, Açısı, θ_2	$10 \leq \theta_2 \leq 13$	°
Dış Rotor, İç yarıçap, Ri_3	$27.5 \leq Ri_3 \leq 35$	mm

Çizelge 4'de belirtilen parametrelerin değer aralıkları içinde farklı kombinasyonlar seçilerek oluşturulan modeller ile 300 farklı sayısal analiz çözümü elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre belirlenen parametrelerin HTY performansına etkilerinde duyarlılık değerleri Ro_1 için en yüksek çıkmıştır. θ_2 'nin etkisinin ise oldukça sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. θ_2 'nin etkisinin sınırlı olduğu göz önüne alınarak, HTY'nun diğer iki değişkene göre değişimi Şekil 4 sunulmuştur.



Şekil 4. Farklı parametre değerlerinin HTY'ya etkisi.

Şekil 4'de elde edilen verilerden en iyileştirilmiş tasarım noktası tahmin edilmiş ve belirlenen bu noktadaki değerler sayısal analiz modeline girdi sağlayarak tekrar çözüm elde edilmiştir. Tahmin edilen değer ile gerçekleşen değer arasında %99,5 uyumluluk yakalanmıştır. Tasarımın en iyileştirilmiş noktası olan $Ro_1=27$ mm, $Ri_3=32.65$ mm ve $\theta_2=11.27^\circ$ alınarak 215.5 Nm/L'lik HTY ve 5.32 aktarma oranına sahip eşeksenli MD elde edilmiştir. Eşeksenli MD tasarım çalışmaları kapsamında mıknatısların normal dizilimli, hallbach dizilimli ve optimum hallbach dizilimli tasarımları için elde edilen bulgular Çizelge 5'de özetle sunulmuştur.

Çizelge 5: Tüm Tasarımların Performanslarının Karşılaştırması

Açıklama	Tasarım			Birim
	Normal	Hallbach	En İyileme Hallbach	
Giriş Tork	6.75	10.31	12.9	Nm
Çıkış Tork	35.3	-55.25	-68.55	Nm
Aktarma Oranı	~5.22	~5.35	~5.32	-
HTY	110.9	173	215.5	Nm/L

3. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, eşeksenli bir MD tasarımı KTS uygulamaları kapsamında hedeflenen kriterler dikkate alınarak gerçekleştirilmiş ve sayısal analiz sonuçları MD kullanımı ile hedeflenen HTY'na ulaşılabileceği gösterilmiştir. Bu noktada, dış geometri sınırları tasarım aşamasında korunarak diğer model parametreleri değişken olarak seçilmiş ve en iyileştirme çalışması sonunda 215.5 Nm/L HTY'na sahip tasarım elde edilmiştir. Hallbach ile normal dizilimli tasarımların performansları ayrıca çalışma kapsamında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hallbach dizilimin normal dizilime göre HTY'nu dikkate değer ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, iç rotor da bulunan mıknatıs kutup çiftlerinin hacimsel büyüklüğünün HTY değerini önemli oranda arttırabileceğini göstermiştir. Gelecek çalışmalarda analizler sonucunda elde edilen optimum parametreler kullanılarak MD imalatının gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların deneysel olarak doğrulanması planlanmaktadır.

4. Kaynaklar

- [1] S. H. Kim ve M.-J. Tahk, "Modeling and Experimental Study on the Dynamic Stiffness of an Electromechanical Actuator", *Journal of Spacecraft and Rockets*, c. 53, sy 4, ss. 708-719, Tem. 2016, doi: 10.2514/1.A33483.
- [2] P. M. Tlali, R.-J. Wang, ve S. Gerber, "Magnetic gear technologies: A review", içinde *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, Eyl. 2014, ss. 544-550. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960233.
- [3] J. J. Scheidler, "NASA's Magnetic Gearing Research for Electrified Aircraft Propulsion", program adı: 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, Cincinnati, Ohio, Tem. 2018. doi: 10.2514/6.2018-4988.
- [4] Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi, ve P. Alotto, "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects", *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, c. 55, sy 5, ss. 4557-4566, Eyl. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2916765.
- [5] C. G. C. Neves ve A. F. F. Filho, "Magnetic Gearing Electromagnetic Concepts", *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, c. 16, sy 1, ss. 108-119, Mar. 2017, doi: 10.1590/2179-10742017v16i1874.
- [6] K. Atallah ve D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear", *IEEE Trans. Magn.*, c. 37, sy 4, ss. 2844-2846, Tem. 2001, doi: 10.1109/20.951324.
- [7] K. Atallah, S. D. Calverley, ve D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear", *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, c. 151, sy 2, s. 135, 2004, doi: 10.1049/ip-epa:20040224.
- [8] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, ve O. Nielsen, "Development of a High-Performance Magnetic Gear", *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, c. 41, sy 3, ss. 764-770, May. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.847319.
- [9] B. Praslicka, M. C. Gardner, M. Johnson, ve H. A. Toliyat, "Review and Analysis of Coaxial Magnetic Gear Pole Pair Count Selection Effects", *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, ss. 1-1, 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3053544.
- [10] K. Li ve J. Z. Bird, "A Review of the Volumetric Torque Density of Rotary Magnetic Gear Designs", içinde *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, Eyl. 2018, ss. 2016-2022. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507059.
- [11] K. Li, S. Modaresahmadi, W. B. Williams, J. D. Wright, D. Som, ve J. Z. Bird, "Designing and Experimentally Testing a Magnetic Gearbox for a Wind Turbine Demonstrator", *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, c. 55, sy 4, ss. 3522-3533, Tem. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2905838.
- [12] K. K. Uppalapati, J. Z. Bird, J. Wright, J. Pritchard, M. Calvin, ve W. Williams, "A Magnetic Gearbox with an Active Region Torque Density of 239Nm/L", s. 7, 2014.
- [13] S. Modaresahmadi, D. Barnett, H. Baninajar, J. Z. Bird, ve W. B. Williams, "Structural modeling and validation of laminated stacks in magnetic gearing applications", *International Journal of Mechanical Sciences*, c. 192, s. 106133, Şub. 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106133.
- [14] S. Modaresahmadi, C. Nichols, ve W. Williams, "Mechanical Design of Magnetic Gearboxes Optimized for Assembly", içinde *Volume 6A: Energy*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Kas. 2018, s. V06AT08A012. doi: 10.1115/IMECE2018-86878.
- [15] D. Som vd., "Analysis and Testing of a Coaxial Magnetic Gearbox With Flux Concentration Halbach Rotors", *IEEE Trans. Magn.*, c. 53, sy 11, ss. 1-6, Kas. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2715799.
- [16] J.-I. Lee vd., "Design and Analysis of the Coaxial Magnetic Gear Considering the Electromagnetic Performance and Mechanical Stress", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, c. 30, sy 4, ss. 1-5, Haz. 2020, doi: 10.1109/TASC.2020.2968267.
- [17] T. Talerico, Z. A. Cameron, ve J. J. Scheidler, "Design of a Magnetic Gear for NASA's Vertical Lift Quadrotor Concept Vehicle", program adı: AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, Indianapolis, IN, Ağu. 2019. doi: 10.2514/6.2019-4477.
- [18] H. Y. Wong, H. Baninajar, B. Dechant, ve J. Bird, "Designing a Magnetic Gear for an Electric Aircraft Drivetrain", içinde *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, Eki. 2020, ss. 1-6. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9235977.