

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Design and Analysis of a Coaxial Magnetic Gear with Flux Concentrate Halbach Array

Murat Keleş^{a,*}, Cengiz Baykasoğlu^b

Submitted: 20.07.2024 Revised: 06.11.2024 Accepted: 07.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR02

ABSTRACT

Keywords: Magnetic gear, flux concentrate, Halbach, magnet grade, numerical analysis

^{a,*} TÜBİTAK Defense Industries Research and Development Inst. 06484 - ANKARA, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8453-1287
murat-keles@tubitak.gov.tr

^b Hitit University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 19030 - CORUM, Türkiye
Orcid: 0000-0001-7583-7655
cengizbaykasoglu@hitit.edu.tr

*Corresponding author:
murat-keles@tubitak.gov.tr

Magnetic Gears (MG), which can operate under antifriction and unlubricated conditions, have the potential to meet the needs of many areas, especially the aviation and defense sectors. In this context, it is very important to develop MG designs that can meet the specific requirements in these areas. With this motivation, a coaxial MG with a power transmission ratio of 5.33 has been designed and optimized in this study by incorporating Flux-Concentrated Halbach Array (FCHA) magnets, and a power transmission mechanism that can be utilized especially in Fin Actuation System (FAS) is developed by performing Numerical Electromagnetic Analysis (NEA). Different geometric parameters are determined as variables in the FCHA design and the performance improvement study is carried out by developing various models. Accordingly, by comparing the effects of design parameters on the MG performance, the geometric model in which the Volumetric Torque Density (VTD) reached the highest value is determined. Numerical analysis results showed that the optimized FCHA increases VTD by 32% compared to the Halbach array. As a result of parametric analysis studies, MG system with VTD value of 225.7 Nm/L, which satisfies ideal design criteria, is obtained. Considering the optimized MD design, torque ripple and flux density are examined and also the effects of different magnet grades on the performance and the structural analysis of the middle rotor are investigated.

Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilimli Bir Eş Eksenli Manyetik Dişli Tasarımı ve Analizi

ÖZ

Yağsız ve sürtünmesiz koşullarda çalışabilen Manyetik Dişlilerin (MD) havacılık ve savunma sektörleri başta olmak üzere birçok alanda ortaya çıkan ihtiyaçları karşılama potansiyeli vardır. Bu bağlamda, bu alanlardaki özel gereksinimlere cevap verebilecek manyetik dişli tasarımlarının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu motivasyonla, bu çalışmada Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilimine (AKHD) sahip mıknatıslar ile beraber güç aktarma oranı 5.33 olarak tasarlanmış bir eş eksenli MD'nin Elektromanyetik Sayısal Analizleri (ESA) gerçekleştirilerek özellikle Kanatçık Tahrik Sisteminde (KTS) uygulanabilecek bir güç aktarma mekanizması geliştirilmiştir. AKHD'li tasarımda farklı geometrik parametreler değişken olarak tanımlanıp çeşitli modeller geliştirilerek performans iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, tasarım parametrelerinin MD performansına olan etkileri karşılaştırılarak Hacimsel Tork Yoğunluğunun (HTY) en yüksek değere ulaştığı geometrik model belirlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları en iyilenmiş AKHD'nin, Halbach dizilime göre HTY'yi %32 oranında arttırdığını göstermiş ve parametrik analiz çalışmalarının sonucu olarak ideal tasarım ölçütlerini sağlayan 225.7 Nm/L HTY değerine sahip bir MD sistemi elde edilmiştir. En iyilenmiş MD tasarımı dikkate alınarak performans kriterlerinden tork dalgalanması ve akı yoğunluğu analiz edilerek farklı mıknatıs seviyelerinin performans etkileri incelenmiş ve orta rotorun yapısal davranışı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik dişli, akı konsantrasyon, Halbach, mıknatıs seviyesi, sayısal analiz

1. Giriş (Introduction)

Savunma ve havacılık sektörlerine ilişkin birçok uygulamada sistemlerin veya mekanizmaların yüksek verimlilikte çalışacak şekilde tasarlanmaları oldukça kritik olup, bu tasarımlarda yeni teknolojiler ve yaklaşımların dikkate alınması kaçınılmazdır. Savunma sanayii sektörünün en önemli konuları arasında olan mühimmat teknolojilerinde bu yeni teknoloji ve yaklaşımların izlerini takip etmek mümkündür. Bu bağlamda, gelişmiş menzile sahip, hassas vuruş kabiliyetli ve maliyeti etkin yeni nesil mühimmat teknolojileri özgün tasarımlar ve yaklaşımlar uygulanarak sürekli geliştirilmektedir. Hava platformlarının yüksek maliyetleri ve risklerinden dolayı, havadan karaya atılan mühimmatların hedefi başarılı şekilde imha etmesi istenmektedir. Hedeflerin tek atışta yok edilebilmesi için mühimmatın yönelimini sağlayabilen Kanatçık Tahrik Sisteminin (KTS) kullanımı gereklidir. Öte yandan, mühimmat yöneliminin başarılı olabilmesi için KTS'nin performansını olumsuz etkileyecek tüm parametrelerin kontrolü sağlanarak, olası hataların minimize edilmesi gerekmektedir [1]. Aksi durumda, KTS seviyesinde oluşabilecek bir hata, mühimmat oto pilotunun davranışını değiştireceği için istenmeyen uçuş durumları meydana gelebilir [2]. Bu noktada, KTS'lerden istenilen performansın elde edilebilmesi için mevcut mekanizmaların performansları iyileştirilmiş veya birçok yeni mekanizma geliştirilmiştir [3-6]. KTS gibi sistemlerde güç aktarma organları için yüksek verimliliğe sahip mekanizmaların tasarımı kullanılması gerekmektedir. Bu noktada, mekanik dişliler yüksek aktarma oranı gereken uygulamalarda çoğunlukla tercih edilmektedir. Diğer yandan, mekanik dişlilerin titreşimli, yağlı ve gürültülü şekilde çalışmaları sistem tasarımını zorlaştırmakta olup, bu dişlilerin bakım maliyetlerinin azaltılması, ömürlerinin iyileştirilmesi ve yağsız şekilde kullanımları gibi konularda çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir.

Sistem gereksinimlerinin farklılaşması ve teknolojinin ilerleyişi ile mekanik dişlilerin yetersiz olduğu sistemlerde güç aktarımında kullanılabilecek Manyetik Dişliler (MD) son yıllarda yoğun ilgi çekmektedir [7]. Mıknatısların kimyasal yapısına 1980'li yıllardan sonra ender bulunan toprak elementlerinin eklenmesi ile meydana gelen NdFeB mıknatıslarının keşfi MD'lerin araştırılmasını ileri seviyeye taşımıştır. MD'lerin yağsız ve temassız çalışabilme yetenekleri, düşük titreşim seviyeleri ve sistemi aşırı yükten korumaları gibi özelliklerinden dolayı her geçen gün kullanım alanları genişlemektedir [8,9]. Literatürde en çok araştırılan MD tiplerinden biri olan eş eksenli MD'lerin kullanımında mıknatısların doğasında olan itme ve çekme kuvvetlerinin tork yükü oluşturması sağlanarak belirli aktarma oranında güç aktarımı sağlanmaktadır [10]. Bir eş eksenli MD, İç Rotor (İR), Orta Rotor (OR) ve Dış Rotor (DR) olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 1). DR ve İR'de özel sayılarda ve farklı tasarımlarda mıknatıs çiftleri bulunurken, OR bölümüne DR ve İR ile uyumlu özel tasarıma sahip ferromanyetik malzeme yerleştirilmektedir. MD tasarımlarında genel olarak OR ve İR dönüş ekseninde harekete izin verilecek şekilde mekanik olarak yataklanmakta ve DR kaideye sabitlenmektedir. MD güç aktarımında yavaş dönen kısım OR çıkış ve hızlı dönen kısım İR giriş olarak tanımlanmaktadır. Bazı çalışmalarda ise İR ve DR'de dönüşel hareket izin verilmiş ve OR sabitlenerek güç aktarımı sağlanmıştır [11].

MD'lerin performansının ortaya konmasında en önemli kriterlerinden olan Hacimsel Tork Yoğunluğu (HTY), çıkış kısmından elde edilen torkun, mıknatısların oluşturduğu aktif hacme oranı şeklinden tanımlanmaktadır [12]. HTY'nin artışı ile MD'lerin performansı mekanik dişli performansına yaklaşmaktadır [13]. MD'ler HTY'nin düşük olması sebebi ile başlangıçta çok fazla ilgi görmemişlerdir. Öte yandan, Atallah ve Howe [14], 2001 yılında farklı bir topoloji önererek nispeten yüksek performanslı eş eksenli MD tasarlamışlardır. Bu noktada, diğer güç aktarma organları ile kıyaslandığında HTY değerinin umut verici olması alternatif tasarımların geliştirilmesinde yol gösterici olmuştur [15,16]. Praslicka ve ark. [17], mıknatısların dizilimi, sınıflarının seçimi, sayılarının belirlenmesi üzerinde çalışmışlar ve mekanik tasarım boşluklarının MD performansına etkilerini incelemişlerdir. Başka bir çalışmada, Li ve Bird [18], farklı boy ve çaplarda parametreler belirleyerek MD performanslarını karşılaştırmışlar ve iyileştirme çalışmaları kapsamında optimum parametrelerin belirlenmesine yönelik analizler gerçekleştirmişlerdir.

MD'deki mıknatıs çifti sayısı ve mıknatıs geometrileri ile OR'nin geometrisi HTY'nin en iyilenmesinde dikkate alınacak önemli parametrelerdir [2]. Diğer taraftan, OR'nin ferromanyetik malzemedan imal edilerek akı iletiminin rahat şekilde sağlanması ve manyetik alan geçirgenliğinin yüksek olması arzu edilir [19]. Bu kapsamda, OR'de laminasyonlu çelik kullanılarak manyetik kayıpların azaltıldığı gösterilmiştir [20]. Ayrıca, ferromanyetik malzeme olarak 1008 çelik tasarımlarda sıklıkla tercih edilmektedir. MD'ler de manyetik tasarımın kutup yönlerinin seçimi mıknatısların güney ve kuzey

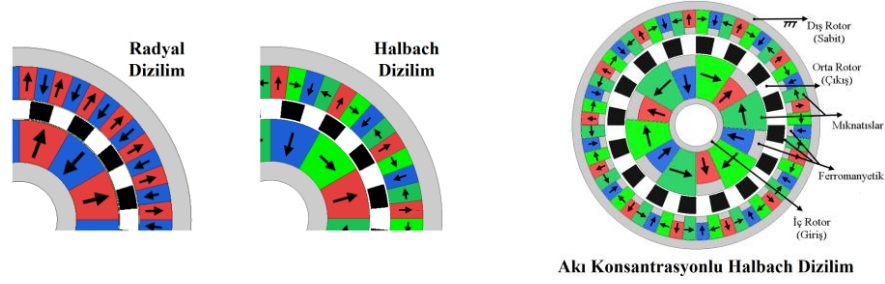
kutuplarının dizilimine göre önem kazanmaktadır. Bu noktada, manyetik alan içerisindeki kayıpların artmaması için mıknatıs diziliminde genel olarak kullanılan Radyal Dizilim (RD) yerine özel Halbach Dizilim (HD) yöntemi alternatif olarak kullanılmaktadır [21]. MD'de HD kullanımı ile RD'ye göre aynı hacim ve geometride daha yüksek çıkış torku elde edilerek HTY'ye olumlu katkısı gösterilmiştir [22]. Ayrıca, literatür çalışmalarında HD'de bulunan Teğet Yönlü (TY) mıknatısların hacim olarak daha fazla olması akı yoğunluğunu arttırdığı için bu tip yapı Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilim (AKHD) olarak adlandırılmaktadır. AKHD'nin aktif hacimde HTY'nin artırılmasına pozitif etkisi sayısal analizlerde gösterilmiştir [23]. MD'ler de mıknatısların oluşturduğu manyetik yönlendirmenin ana kaynağı olan manyetik akının yoğunluğu akademik çalışmalarda sayısal analizler ile irdelenmiştir. Atallah ve ark. [15] akı yoğunluğunu hesaplamak için İR ile OR arasındaki boşluk ve OR ile DR arası kalan boşluk orta noktalarından sayısal analiz ile 360° veri tarayarak uzaysal harmonik analiz ile MD'nin belirlenen kutup çifti sayılarının baskınlığını incelemişlerdir. Mıknatısların doğal yapısında olan akı yoğunluğunun değişkenlik göstermesi MD'de elde edilen tork değerlerinde dalgalanma olmasına sebep olmaktadır. Tork dalgalanması ne kadar az olursa güç aktarımı o kadar pürüzsüz olmakta ve yapılan çalışmalarda çıkış ve giriş tork dalgalanma değerinin genel olarak %0.2 ile %5 arasında olduğu gösterilmiştir [12]. Öte yandan, kimyasal yapılarından dolayı manyetizasyon şiddetleri farklı seviyelerde olan N35 ile N52 arasında mıknatıslar üretilmekte ve mıknatıs seviyelerine göre akı değerleri değişkenlik göstermektedir. Tallero ve ark. [19] NASA'da yapılan çalışmada HD'li farklı seviyelerde mıknatıslar kullanılarak analizler gerçekleştirilmişlerdir. İR ve DR'de N52 kullanarak 278 Nm çıkış torku elde ederken, İR'de N50 ve DR'de N48 kullanarak 311 Nm çıkış torku elde etmişlerdir. Bu sonuç, yüksek seviyeli mıknatıslardan oransal bir iyileşmenin aksine daha düşük çıkış torkunun ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Bu noktada, yüksek seviyeli mıknatısların birbirlerinin manyetikliklerini etkilemesi akı değerini olumsuz etkilemiş ve buda HTY değerini düşürmüştür.

MD'ler de ilk tasarım süreçlerine Elektromanyetik Sayısal Analiz (ESA) ile 2 Boyutlu (2B) elektromanyetik alan ve akı hesaplamaları gerçekleştirilip, mıknatıs kutup çiftlerinin birbirine uyguladığı itme ve çekme kuvvetlerinin analizi gerçekleştirilmektedir. Sayısal analizlerde, genelde ANSYS MAXWELL®, COSMOS® veya JMAG® gibi yazılımlardan faydalanılarak statik veya dinamik elektromanyetik hesaplama yöntemleri ile ESA gerçekleştirilmektedir [17,20,24,25].

Literatürde MD'lerin performanslarına etki eden parametrelerin analizi ile sektörel alanda uygulamalarına yönelik halen çok az sayıda çalışma mevcuttur. Ayrıca, MD'lerin, KTS gibi hassas mekanizmalarda uygulanabilirliği ilgili kapsamlı bir araştırma literatürde mevcut değildir. Bu motivasyonla, bu çalışma kapsamında örnek bir KTS için amaçlanan aktarma oranı ve HTY değerlerine ulaşmaya olanak verecek HD'li ve AKHD'li MD tasarımları geliştirilmiştir. Bu noktada, sayısal hesaplamalar gerçekleştirilerek HD ve AKHD'ye göre mıknatıs yönleri belirlenmiş ve çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak performans iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. MD performansını etkileyen akı ve tork dalgalanmaları analizlerden elde edilmiş ve farklı mıknatıs seviyeli MD konfigürasyonlarından elde edilen HTY değerleri karşılaştırılarak mıknatıs seviyelerinin sonuçlara etkileri incelenmiştir. Ayrıca, MD tasarım çalışmaları kapsamında kritik bileşen olan OR'nin yapısal analizi gerçekleştirilerek ortaya çıkan gerilme ve deformasyon durumu incelenmiştir.

2. Manyetik Dışlı Tasarımları (Magnetic Gear Designs)

Önceki bölümde belirtildiği gibi MD'ler genel çalışma prensibi olarak DR'si sabit bir kaideye bağlanmış, OR ve İR ile beraber iç içe dönüşel hareketi olan sistemlerdir. İR ve DR'deki mıknatısların birbirleri üzerindeki manyetik akı etkisi ile OR'ye güç aktarımı yapılarak belirli bir aktarma oranında dişli kutusu gibi çalışmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Eş eksenli bir MD
(A Coaxial MG).

Bu bölümde MD ana tasarım parametre hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve amaçlanan aktarma oranı için kutup çifti sayıları belirlenmiştir. Ayrıca, parametrik performans iyileştirme çalışmaları yapılmış ve en yüksek HTY değeri için AKHD tasarımı elde edilmiştir. MD sisteminin ana denklemleri mıknatıs kutup çifti ve segment sayılarının arasındaki ilişkilere göre denklemler farklılık göstermezler. Sayılar arasındaki bağıntılar ile güç aktarım sisteminin en önemli performans kriteri olan aktarma oranı belirlenmektedir. MD'ye ait genel denklemler aşağıda sunulmuştur.

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

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

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

Burada, n_2 OR'de bulunan ferromanyetik segment sayısı, p_1 İR'de bulunan mıknatısların kutup çifti sayısı ve p_3 DR'de bulunan mıknatısların kutup çifti sayısıdır. Ayrıca, İR tork değeri T_1 , OR tork değeri T_2 , İR açısal hız ω_1 , OR açısal hız ω_2 ve aktarma oranı G_{12} 'dir. DR sabit olduğunda $\omega_3 = 0$ olmaktadır. Bu noktada, Eş. 2 ve Eş. 3 sadeleştirilerek aktarma oranı hız veya tork değerlerinin oranları şeklinde tanımlamakta ve eş eksenli MD için sürtünme ve manyetik kayıplar ihmal edildiğinde, Eş. 7'ye göre hesaplanmaktadır.

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

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

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

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

Aktarma oranının eksi (-) işaretli bulunması, OR ve İR'nin dönüş yönlerinin birbirine göre ters olduğunu belirtmektedir. Bu çalışmada; OR ve İR merkez eksene göre dönecek ve DR sabit olacak şekilde MD tasarımı gerçekleştirilmiştir. HTY değeri, MD'nin performansı açısından önemli kriterlerden biri olup, çıkış tork değerinin (T_2) aktif hacme bölümünden aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [21].

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

Burada, R_o aktif hacmin dış yarıçap ölçüsü ve l aktif hacmin boyu olarak tanımlanmıştır. KTS uygulamalarında kullanılacak bir güç aktarma elemanından beklenen performans gereksinimleri Tablo 1'de verilmiştir. Burada, aktarma oranı ve HTY değerinin yanı sıra hacim kısıtları açısından Tablo 1'de verilen dış yarıçap ve boy değerleri tasarımlarda dikkate alınmıştır.

Tablo 1. MD performans ve tasarım gereksinimleri (MG performance and design requirements)

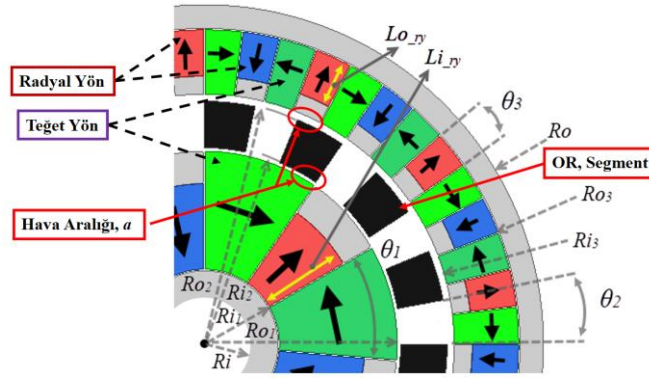
Parametre	Değer	Birim
Dış yarıçap	45	mm
Aktarma oranı	~5-6	
HTY	~210-230	Nm / L
Aktif Boy	50	mm

Amaçlanan aktarma oranının ortaya çıkarılabilir potansiyeli olan p_1 , n_2 ve p_3 parametrelerinin belirlenmesi için farklı tasarım kombinasyonları oluşturulmuştur. Tablo 2'de farklı parametreler için elde edilen aktarma oranları sunulmuştur.

Tablo 2. Kutup çifti sayıları ve aktarma oranı (Number of pole pairs and transmission ratio)

p_1	n_2	p_3	Aktarma Oranı	No	p_1	n_2	p_3	Aktarma Oranı	No
2	7	5	3.5	1	3	18	15	6	20
	8	6	4	2		19	16	6.33..	21
	9	7	4.5	3		20	17	6.66..	22
	10	8	5	4		21	18	7	23
	11	9	5.5	5		22	19	7.33..	24
	12	10	6	6		26	23	8.66..	25
	13	11	6.5	7		32	29	10.66..	26
	14	12	7	8		9	5	2.25	27
	15	13	7.5	9		11	7	2.75	28
3	8	5	2.66..	10	15	11	3.5	29	
	9	6	3	11	17	13	4.25	30	
	10	7	3.33..	12	19	17	4.75	31	
	11	8	3.66..	13	22	18	5.5	32	
	12	9	4	14	23	19	5.75	33	
	13	10	4.33..	15	24	20	6	34	
	14	11	4.66..	16	25	21	6.25	35	
	15	12	5	17	26	22	6.5	36	
	16	13	5.33..	18	27	23	6.75	37	
17	14	5.66..	19						

MD uygulamalarında arzu edilen aktarma oranı ve performansı sağlayacak tasarım parametrelerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken çeşitli hususlara literatürde vurgu yapılmıştır. Bu hususlar ve bunlara göre tasarım parametrelerin nasıl belirlendiği takip eden satırlarda tartışılmıştır. OR segment sayısının n_2 , çift sayı seçildiğinde Radyal Yönde (RY) kuvvetlerin eşit yoğunlukta dağıldığı ve mekanik esnemelerin en aza indirildiği gösterilmiştir [26]. n_2 sayısının çift olduğu tasarım parametreleri Tablo 2'de kırmızı ile gösterilmiştir. Harmonik etkilerin en aza indirilmesi noktasında p_1 ve p_3 kutup çifti sayılarının asal sayı kullanılmasının pozitif etkisi ayrıca çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [26]. Tablo 2'de asal sayı olanlar açık yeşil renk ile belirtilmiştir. Bu iki kriteri aynı anda sağlayan tasarımlar ayrıca Tablo 2'de açık mavi renkli olarak belirtilmiştir. Aktarma oranının kesirli sayı olması durumunda, gürültülerin ve oluşan tork dalgalanmaları azaldığı çeşitli çalışmalarda da gösterilmiştir [26]. Bu kriterleri sağlayan tasarımlar (10, 12, 16, 18, 22, 24, 25 ve 26 nolu) Tablo 2'de koyu renkli olarak belirtilmiştir. Bu bağlamda, sadece p_1 kutup çifti sayısı 3 olan tasarımların isterleri sağladığı Tablo 2'den görülmektedir. Tablo 1'de verilen hedef dış yarıçap kısıtlaması İR ve DR'de düşük sayıda kutup çiftinin seçilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple, p_1 , n_2 ve p_3 değerleri sırasıyla 3, 16, 13 olan 18 nolu tasarım ön tasarım olarak belirlenmiştir. Aktif boy ve dış yarıçap kısıtları dikkate alınarak belirlenen MD ön tasarım parametreleri (Şekil 2) Tablo 3'de sunulmuştur. MD'nin iç içe dönen yapısı gereği birbirine temas etmemesi gerekmektedir. Özellikle, HTY değeri yüksek olan literatür çalışmalarında rotorlar arası dönme boşluğu olarak adlandırılan hava boşluğu en az seviye tutularak yüksek tork çıktıkları ile performansı artırıcı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır [13]. Bu tasarımda, hava boşluğu değeri literatür çalışmaları incelenerek ve geometrik üretilebilirlik dikkate alınarak 0.5 mm seçilmiştir. [27]. Ayrıca, mıknatıs malzemesi olarak, ilk tasarımda literatürde sıklıkla kullanılan N42 kalite grubu yaklaşık 1.24 T akı yoğunluğuna sahip mıknatıs tipi seçilmiştir. Parametrik çalışmalar kapsamında öncelikli olarak Halbach MD tasarım için Tablo 3'te verilen Ro_1 ve Ri_3 parametreleri değişken olarak tanımlanıp performansa etkileri incelenmiş, ardından AKHD için θ_1 , θ_2 , Li_{ry} ve Lo_{ry} değişkenleri dikkate alınarak bu yaklaşımın performansa etkileri araştırılmıştır.



Şekil 2. MD tasarım parametreleri
(Desing parameters of MG)

Tablo 3. Halbach MD tasarım parametreleri (Design parameters of Halbach MG)

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim		
İR	Ri_1	14	mm	DR	Ri_3	31.0	mm
	Ro_1	24	mm		Ro_3	40.0	mm
	p_1	3	-		p_3	13	-
	θ_1	$180/(2p_1)$	°		θ_3	$180/(2p_3)$	°
	Li_{ry}	5	mm		Lo_{ry}	4.5	mm
	Malzeme	1008			Malzeme	1008	
OR	Ri_2	24.5	mm	Diğer	NdFeB	1.24	T
	Ro_2	29.5	mm		Ri	10	mm
	n_2	16	-		Ro	45	mm
	θ_2	$180/(n_2)$	°		a	0.5	mm
	Malzeme	1008			l	50	mm

3. Elektromanyetik Sayısal Analizler (Electromagnetic Numerical Analysis)

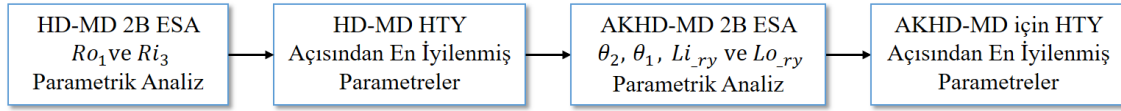
Literatürde 2B ile 3B ESA'dan elde edilen veriler yüksek oranda benzerlik gösterdiğinden parametrik analizlerde hesaplama yükünün düşürülmesi için ilk tasarım ve en iyileme süreçlerinde 2B sayısal modelleme yaklaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Tablo 3'te belirtilen değerler için ANSYS® Maxwell 2D Magnetostatic yazılım modülü kullanılarak oluşturulan katı modelde ilk olarak sınır koşulları ve malzemeler tanımlanmıştır. Mıknatısların RY ve TY yönleri Şekil 2, NdFeB mıknatısın akı yoğunluğu değeri ise Tablo 3'e göre 1.24 T olarak tanımlanmış ve ESA için manyetik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. MD'nin birbirine temas etmeyen bölgeleri vakumlu olarak tanımlanmıştır. OR malzemesi olarak mıknatısların oluşturduğu manyetik akıya hızlı ve iyi tepki verebilen bir ferromanyetik olan demir oranı yüksek AISI 1008 çeliği seçilmiştir. Analiz sınır şartları çerçevesinde İR hızı sıfır alınarak OR dönme eksenini etrafında serbest bırakılmış ve OR'den alınan en yüksek tork değerini veren pozisyona sabitlenmiştir. Sayısal analizlerin tümü bu pozisyon değerinde gerçekleştirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Tablo 3'de verilen parametreler ve RD ve HD dikkate alınarak MD'nin ilk sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'te iki tip MD için hesaplanan en yüksek tork ve HTY değerleri verilmiştir. Tablo 4'den açıkça görülebileceği gibi RD tipli MD performans hedeflerinin uzağında kaldığından parametrik çalışma sonraki bölümde sadece HD dizilim dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. RD ve HD için ESA sonuçları (Numerical electromagnetic analysis results for radial and Halbach arrays)

Parametre	Tasarım		Birim
	RD	HD	
Giriş Tork	6.45	10.2	Nm
Çıkış Tork	-34.2	-54.5	Nm
Aktarma Oranı	~5.3	~5.34	-
HTY	107.5	171.3	Nm/L

3.1. Parametrik çalışma (Parametric study)

MD performansının HTY açısından en iyilenmesi için gerçekleştirilen parametrik çalışmalarının akış şeması Şekil 3'te verilmiştir. İlk aşamada HD'ye etki eden kritik parametrelerin etkisi, sonrasında ise HD tasarımına AKHD yaklaşımı uygulanarak farklı parametrelerin HTY üzerindeki etkileri incelenmiştir.

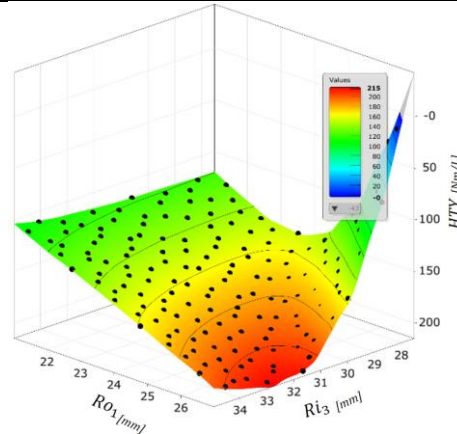


Şekil 3. Parametrik çalışma akış şeması
(Flow chart of parametric study)

MD en iyileme çalışmaları için ilk olarak TY ve RY mıknatısları aynı uzunlukta seçilerek HD mıknatıs modeli incelenmiştir. Bu bağlamda, Ro_1 ve Ri_3 , Tablo 5'te belirtilen aralıklarda değişken parametreler olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 5. HD'li MD analizinde dikkate alınan parametreler (Parameters taken into account in the analysis of MG with Halbach array)

Parametre	Değer Aralığı	Birim
$\dot{I}R, Ro_1$	$21 \leq Ro_1 \leq 27$	mm
DR, Ri_3	$27.5 \leq Ri_3 \leq 35$	mm



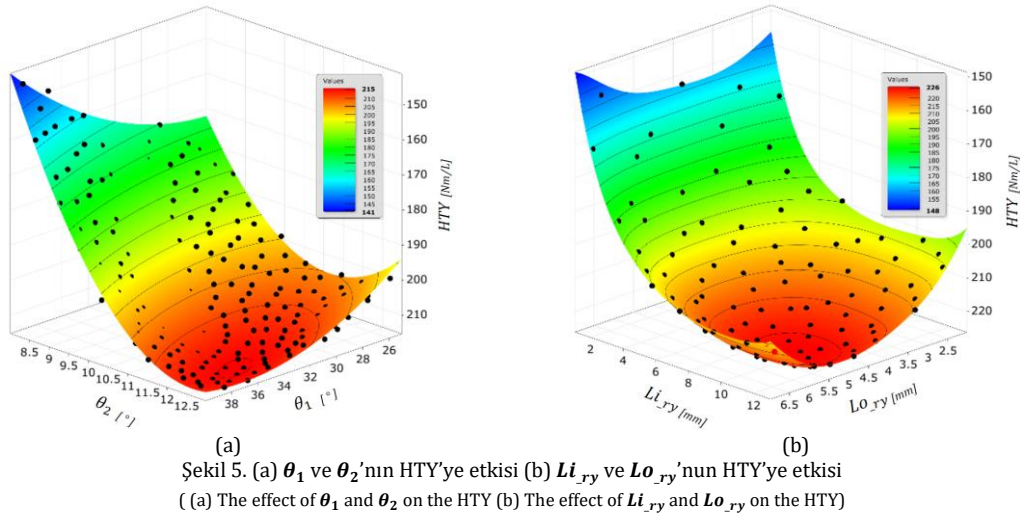
Şekil 4. Ro_1 ve Ri_3 'nin HTY'ye etkisi
(The effect of Ro_1 and Ri_3 on the HTY)

Tablo 5'te belirtilen parametrelerin yaklaşık 300 farklı kombinasyonda sayısal çözümleri elde edilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları Ro_1 parametresinin HTY performansına etkisinin Ri_3 parametresine göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. Dikkate alınan değişken aralığında Ro_1 değerinin artışı HTY'yi dikkate değer ölçüde iyileştirmiş olup, 27 mm civarında HTY en yüksek değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, Ri_3 değerinin artışı HTY'yi dikkate değer ölçüde iyileştirmiş olup, 32 mm civarında HTY en yüksek değerine ulaşmıştır. Halbach dizimli MD'de iki değişkenin HTY'ye etkisi Şekil 4'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar ile HTY değerinin en yüksek olduğu nokta tahmin edilmiş ve o noktadaki parametreler kullanılarak sayısal analiz ile tekrar çözüm elde edilerek %99.5 uyumluluk yakalanmıştır. Bu bağlamda, Halbach dizimli MD'nin optimum parametreleri $Ro_1=26.95$ mm ve $Ri_3=32.65$ mm olarak elde edilmiştir. 214.3 Nm/L'lik HTY'ye sahip eş eksenli MD tasarımı HD-2 olarak Tablo 7'de ifade edilmiştir. Belirlenen parametreler AKHD'li MD'nin TY mıknatıs boyları için başlangıç parametreleri olarak kabul edilip, AKHD MD'nin performans en iyileme çalışmaları kapsamında Tablo 6'daki parametreler dikkate alınarak etkileri incelenmiştir.

Tablo 6. AKHD'li MD tasarım parametreleri (Design parameters of FCHA MG)

Parametre	Değer Aralığı	Birim
İR, θ_1	$25 \leq \theta_1 \leq 38$	°
OR, θ_2	$8 \leq \theta_2 \leq 13$	°
İR, Li_{ry}	$2 \leq Li_{ry} \leq 12$	mm
DR, Lo_{ry}	$2 \leq Lo_{ry} \leq 11$	mm

İlk olarak θ_1 ve θ_2 açıları dikkate alınarak verilen değer aralıkları için parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve HTY'nin θ_1 açısına duyarlılığı %95 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.a'ya göre HTY'nin en yüksek olduğu noktada tasarım parametreleri $\theta_1 = 35.3^\circ$ ve $\theta_2 = 12.18^\circ$ olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin tasarımda uygulanması ile HTY %1.5 oranında (215.3 Nm/L) artmıştır. Uygun θ_1 ve θ_2 açılarının belirlenmesi sonrası Li_{ry} ve Lo_{ry} parametrelerinin en iyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. HTY'nin, İR parametrelerinden Li_{ry} 'ye duyarlılığı %86 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.b'ye göre HTY'nin en yüksek olduğu noktada tasarım parametreleri $Li_{ry} = 9.77$ mm ve $Lo_{ry} = 4.87$ mm olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin tasarımda uygulanması HTY'nin %5 oranında (225.7 Nm/L) artmasına neden olmuştur.



Parametrik en iyileme çalışmalarından elde edilen tahmini değerler ile tekrar sayısal çözümleme yapılmış ve %99.8 uyumluluk yakalanmıştır. Sonuç olarak, AKHD MD parametrik çalışmalarından $Ro_1=26.95$ mm, $Ri_3=32.65$ mm, $\theta_1 = 35.3^\circ$ ve $\theta_2 = 12.18^\circ$, $Li_{ry} = 9.77$ mm ve $Lo_{ry} = 4.87$ mm nihai tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Eş eksenli MD parametrik çalışmalardan farklı tasarımlar için elde edilen sonuçlar Tablo 7'de özetle sunulmuştur.

Tablo 7. Tüm tasarımların performanslarının karşılaştırması (Comparison of performances of all designs)

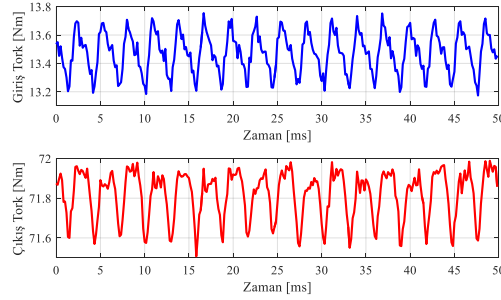
Parametre	Tasarım				Birim
	RD	HD	HD-2	AKHD	
Giriş Tork	6.45	10.2	12.72	13.47	Nm
Çıkış Tork	-34.2	-54.5	-68.16	-71.8	Nm
Aktarma Oranı	~5.3	~5.34	~5.35	~5.34	-
HTY	107.5	171.3	214.3	225.7	Nm/L

3.2. Tork dalgalanması analizi (Torque ripple analysis)

En iyilenmiş tasarım parametrelerine göre oluşturulmuş modele ait giriş ve çıkış tork değerlerinin zamana bağlı ESA çözümleri incelendiğinde tork değerlerinde dalgalanmalar dikkat çekmektedir. Bu dalgalanmalar, MD'nin doğası gereği manyetik alanın dinamik değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır. AKHD MD için zamana bağlı çözümlenmiş tork değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Giriş ve çıkış için tork dalgalanma değerleri Eş. 9 ile hesaplanmıştır. AKHD'li MD çıkış tarafı 100 dev/dk dönerken tork dalgalanması %0.67, giriş tarafı 533 dev/dk dönerken tork dalgalanması %4.67'dir.

Giriş tarafında kullanılan mıknatısların hacimsel açıdan büyük olması, OR segment sayısının İR kutup çifti sayısından daha fazla olması gibi nedenler giriş ve çıkışta farklı tork dalgalanmalarının gözlemlenmesine neden olmaktadır.

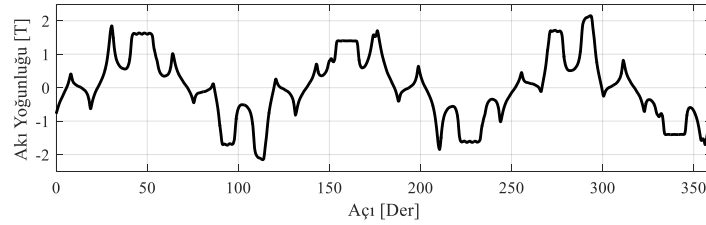
$$T_{dalgalanma} = \frac{T_{en\ yüksek} - T_{en\ az}}{T_{ort}} * 100 \quad (9)$$



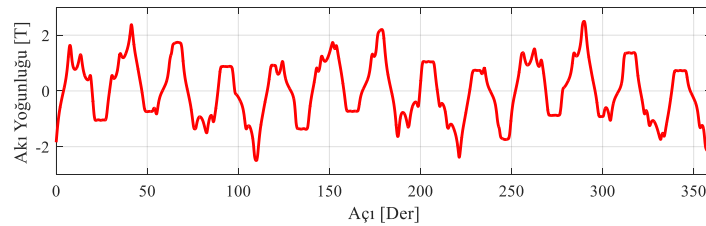
Şekil 6. Giriş ve çıkış için tork dalgalanma analizi (Torque ripple analysis for in and out)

3.3. Akı yoğunluğu (Flux density)

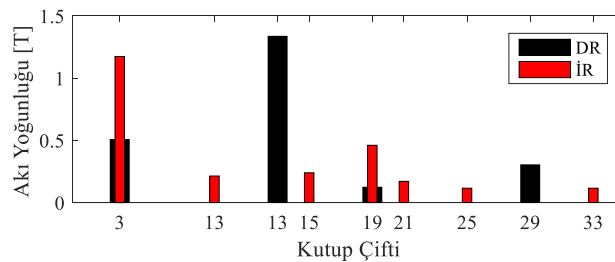
AKHD MD'de İR-OR ve OR-DR arasında Şekil 2'de verilen hava boşluklarının ortasında (27.2 mm ve 32.4 mm) manyetik akı yoğunluğu değerleri ESA yöntemi ile elde edilmiştir. Çözümlemelerden elde edilen radyal akı yoğunluğu, B_r değeri, dönme eksenini etrafında 360° boyunca hesaplanmıştır. MD için belirtilen konumlarda mıknatısların oluşturduğu B_r Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur. İR ve DR için akı yoğunluğunun kutup çifti sayısına bağlı değişimleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Sonuçlar İR'de 3 ve DR'de 13 mıknatıs kutup çiftinin tasarım ile elde edildiğini akı yoğunluğu açısından teyit etmektedir.



Şekil 7. İR ve OR arası B_r grafiği
(Plot of the B_r between the inner and Middle Rotor (MR))



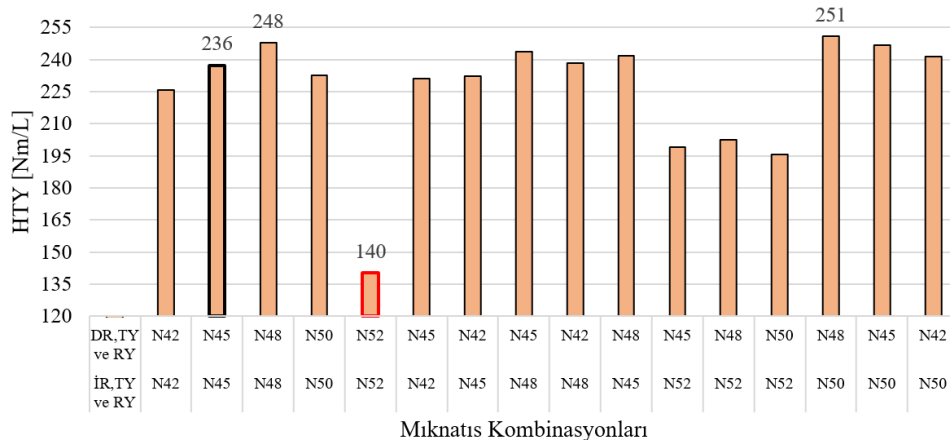
Şekil 8. OR ile DR arası B_r grafiği
(Plot of the B_r between MR and the outer rotor)



Şekil 9. Uzaysal harmonik analiz
(Spatial harmonic analysis)

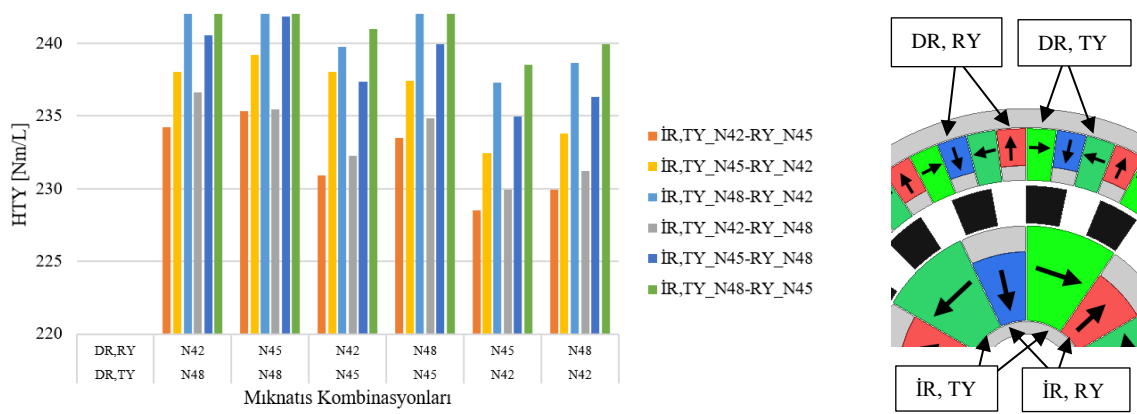
3.4. Farklı seviyeli mıknatıs analizi (Different magnet grade analysis)

Çalışmanın bu bölümüne kadar sunulan ESA'da tek tip seviyeli mıknatıs ile elektromanyetik çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde farklı seviyelerde mıknatıslar ile farklı kombinasyonlarda elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. MD'de farklı seviyelerde mıknatıslar kullanarak aynı veya daha yüksek HTY elde edilebilmektedir. Öte yandan, yüksek seviyeli mıknatıslar kullanıldığında ortaya çıkan en önemli problemlerden biri, mekanik olarak yapıştırma ile montajlanan mıknatısların dönme hareketi esnasında merkezkaç kuvvetinin etkisiyle bütünlüğünün bozulma ihtimalidir. Bu noktada, mekanik bütünlüğün rahat olduğu durumlarda seviyesi yüksek mıknatıslar ve mekanik bütünlüğü bozulabilecek kısımlarda ise seviyesi düşük mıknatıslar kullanarak hedeflenen performansa ulaşılabilmektedir. AKHD MD, silindirik koordinat düzlemine göre TY ve RY tip manyetize olmuş mıknatıslardan oluşmaktadır. MD İR'de RY ve TY, DR'de RY ve TY olmak üzere 4 çeşit farklı tip mıknatıstan meydana gelmektedir. İR ile DR mıknatısları için N42, N45, N48, N50 ve N52 mıknatıs seviyeli kombinasyonlarda analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre mıknatıs seviyeleri arttıkça çıkış tork değerinden elde edilen HTY değeri doğrusal bir artış göstermemiştir. N42, N45 ve N48 seviyelerinde HTY artış gösterirken, N50 seviyeli mıknatısta düşüş olmuş, ardından N52 seviyeli mıknatıs kullanımında Şekil 10'da kırmızı işaretlenen bölgede gösterildiği gibi HTY ani şekilde azalmıştır. N52 seviyeli mıknatıslar birbirlerini olumsuz etkileyerek manyetik yoğunluklarını azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 10 incelendiğinde en yüksek HTY değeri DR N48, İR N50 kombinasyonunda elde edilmiştir.



Şekil 10. İR ve DR'de farklı mıknatıs tiplerinin HTY'ye etkisi
(The effect of different magnet types in the outer and inner rotor on VTD)

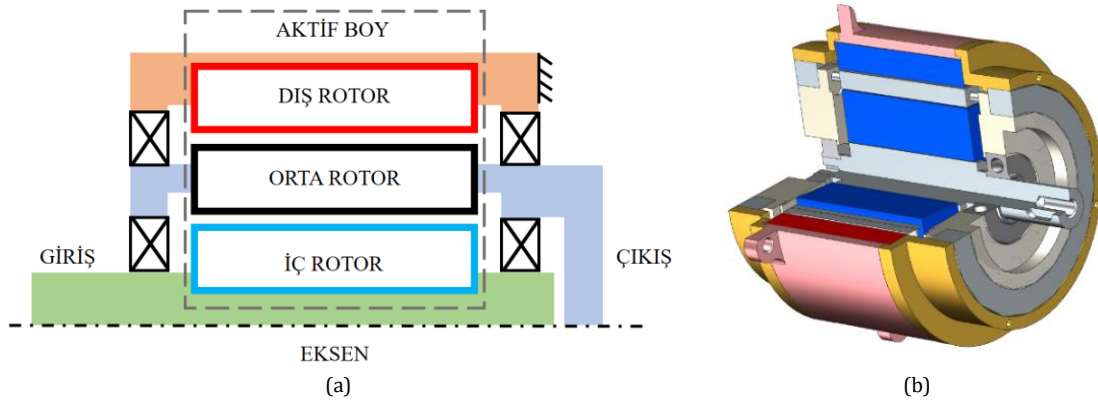
N42, N45 ve N48 mıknatısları MD'ye RY ve TY tipleri olmak üzere 4 farklı kombinasyonda yerleştirilerek ayrıca etkileri incelenmiştir. Bu noktada, İR ve DR için 6 farklı senaryo olmak üzere toplam 36 ayrı senaryo çözümlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 11'de sunulmuştur. Grafikte x eksenini DR-RY ve DR-TY olarak tanımlanan farklı seviyelerdeki mıknatısları, y eksenini ise HTY'yi ifade etmektedir. Farklı renklerde verilen sütunların İR-TY ve İR-RY şeklinde farklı seviyelerde mıknatıslar olarak ifade edilmiştir. Şekil 11'den görüldüğü üzere DR-TY ve İR-TY bölgelerinde N42 kullanımı HTY'yi azaltmıştır. Ayrıca, İR bölgesinde TY'de seviyesi yüksek mıknatıs kullanımının HTY değerini dikkate değer ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, TY tipi mıknatıslarda yüksek seviyeli, RY tipi mıknatıslarda ise TY mıknatıslara göre bir kademe düşük mıknatıs seviyesi seçilmesi durumunda da benzer HTY değerlerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 11. Mıknatıs kombinasyonlarının HTY'ye etkisi
(Effect of magnet combinations on VTD)

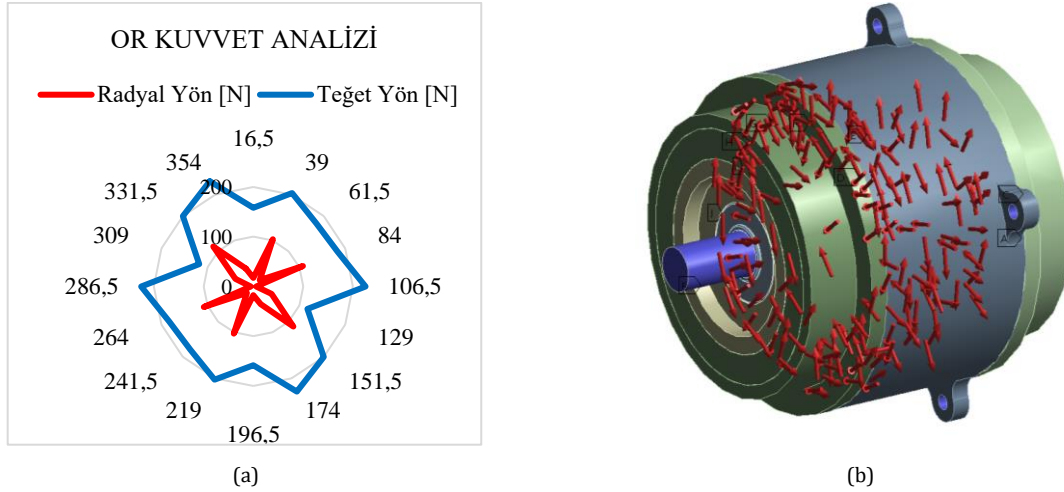
4. Manyetik Dişlinin Yapısal Analizi (Structural Analysis of Magnetic Gear)

MD'nin mekanik çalışma prensibi Şekil 12'de verildiği gibi iç içe dönen millerden oluşmaktadır. MD tasarım çalışmasında DR kısmı kaideye sabitlenerek İR'ye verilecek dönüş hareketi manyetik alanın etkisi ile OR'ye iletilmektedir. Manyetik alanın etkisi ile birbirine güç ve hız aktarımında kayıpları en aza indirebilmek için mümkün olduğunca az parça, basit katı model ve düşük hacme sahip modelin tasarlanması gerekmektedir. Şekil 12'de görüldüğü gibi 4 rulman yatağı kullanılarak iç içe dönüş hareketine izin verebilen tasarım elde edilmiştir. Aktif hacme ait olmayan bölgelerde ferromanyetik özelliği az olan malzeme seçilerek HTY'ye olumsuz etkisinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Malzeme seçimi ve uygun kalınlıklar için tork aktarımında oluşan yükler hesaplanarak tasarıma girdi sağlanmıştır.



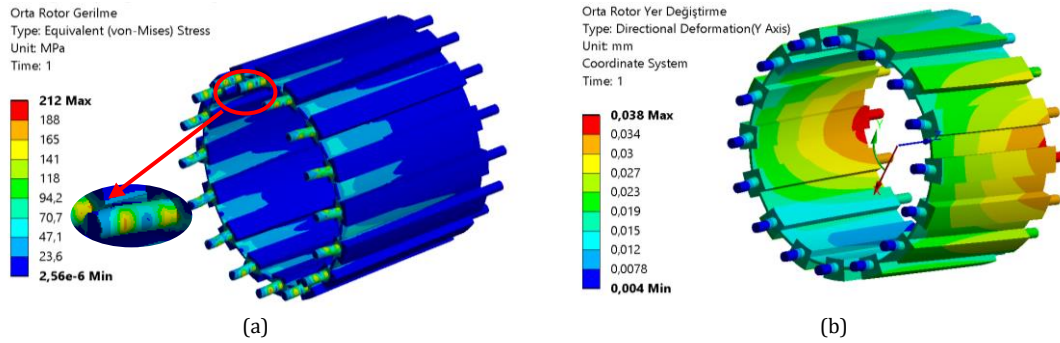
Şekil 12. (a) MD yataklama prensibi (b) 3B modeli
((a) Bearing principle (b) 3 dimensional model of MG)

Manyetik dişli İR, OR ve DR olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır. DR ana kaideye sabitlenerek İR'den verilen giriş tork yükünün elektromanyetik alan altında OR'ye güç aktarılmasıyla çıkış tork yükü oluşmaktadır. Bu yükleri oluşturan her bir mıknatısın oluşturduğu kuvvetlerin RY ve TY bileşenleri elektromanyetik analizler ile hesaplanmıştır. Cidar kalınlığı ve yük oranı karşılaştırıldığında tasarımsal olarak en kritik bileşen OR'dir. Bu noktada, 2B ESA'dan elde edilen OR kuvvet bileşenleri Şekil 13'de gösterilmiştir. En yüksek HTY'nin elde edildiği pozisyon dikkate alınarak sayısal hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. MD 2B modelde OR segmentleri arası boşluk vakumlu bölge olarak tanımlanmıştır (Şekil 2). Yapısal analizlerde ise yapısal bütünlüğün sağlanabilmesi için OR'de ince cidarlı destekler tanımlanmıştır. Bu desteklerin HTY'ye etkisi bu analizlerde ihmal edilerek maksimum yükleme durumu analizlerde dikkate alınmıştır. OR'ye gelen TY yükleri tork yükünü oluşturduğu için toplam TY yükü, 2B analizden hesaplanan çıkış torku ile yakınsamıştır.



Şekil 13. (a) MD'nin en yüksek tork pozisyonunda OR kuvvet analizi (b) MD kuvvet gösterimi
((a) MR force analysis of the highest torque position of MG (b) Force representation of MG)

Yapısal analizlerde Şekil 13'de gösterilen pimlerde hareket kısıtlanıp, Şekil 13'de belirtilen yükler OR'ye uygulanmıştır. Çözüm ağı yakınsama testi yapılarak uygun ağ yapısında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Noktasal yük tanımlamasına bağlı gerilme yığılma durumları göz ardı edildiğinde, analiz sonuçları en yüksek gerilmelerin (140-160 MPa) 3 mm çaplı pimlerin dip bölgelerinde meydana geldiğini göstermiştir. OR malzemesi olarak ferromanyetik özellikli AISI 1008 kullanılmıştır. Bu gerilmeler ilgili malzemenin akma dayanımının oldukça altındadır [28]. Diğer bölgelerde şekilden görüldüğü gibi emniyet faktörünün çok daha yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 14. (a) OR gerilme ve (b) yer değiştirme sonuçları
((a) Stress and (b) Displacement results of MR)

5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, 5,33 aktarma oranına sahip bir eş eksenli AKHD manyetik dişli, savunma ve havacılık sektörlerinde kullanılması muhtemel KTS uygulamaları kapsamında amaçlanan isterler dikkate alınarak tasarlanmıştır. MD karakteristiğine uygun olan aktarma oranı seçilip, tasarım parametrelerine göre sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 2B ESA ile performansları incelenmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle AKHD ile farklı dizilim tipli tasarımların performansları karşılaştırılıp bu yaklaşımın etkinliği gösterilmiştir. Sonrasında ise AKHD'li tasarımda farklı geometrik parametreler değişken olarak tanımlanıp çeşitli modeller geliştirilerek performans iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. AKHD'li MD parametrik en iyilemesi ile elde edilen HTY değerini %32 artış göstermiştir. Ayrıca, MD tasarım parametreleri ile İR'de %4.6, OR'de %0.67 tork dalgalanması hesaplanmıştır. Tasarımı sonlanan MD'nin akı yoğunluğu incelenmiş ve uzaysal harmonik analizi gerçekleştirilerek baskın kutup çifti teyit edilmiştir. Elde edilen parametrik en iyilenmiş MD modelde farklı mıknatıs seviyelerinin performansa etkisi incelenmiştir. TY tipi mıknatıslarda yüksek seviyeli, RY tip mıknatıslarda ise TY mıknatıslara göre bir kademe düşük mıknatıs seviyesi seçilmesi durumunda benzer HTY sonuçları elde edilmiştir. Ardından MD çalışma prensibi göz önüne alınıp modellenen sisteme etkiyen kuvvetler hesaplanmış ve kritik bileşen olan OR'ye tanımlanarak yapısal davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar yapısal analiz sonuçları en iyilenen MD tasarımının mekanik dayanım

isterlerini hedeflenen tork değerinde sağlayabildiği göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda parametrik olarak belirlenmiş en iyi performanslı MD için OR segmentler arası destek modelinin HTY'ye etkisi incelenecektir. Ayrıca, MD'nin katı model tasarımı detaylandırılarak üretimleri ve bütünlemeleri gerçekleştirilecektir. Ardından, deneysel veriler ile elde edilen 2B ve 3B ESA sonuçlar karşılaştırılacaktır. Yine gelecekte, tork dalgalanmasına etki eden faktörler incelenip azaltılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilecektir.

6. Simgeler

Latin Harfleri (Latin Letters)

n_2	:	OR, Ferromanyetik segment sayısı
p_1	:	İR, Kutup çifti
p_3	:	DR, Kutup çifti
T_1	:	İR, Tork değeri
T_2	:	OR, Tork değeri
T_3	:	DR, Tork değeri
G_{12}	:	Aktarma oranı
Ri_1	:	İR, İç yarıçap
Ro_1	:	İR, Dış yarıçap
Li_{ry}	:	İR, RY mıknatis boyu
Ri_2	:	OR, İç yarıçap
Ro_2	:	OR, Dış yarıçap
Ri_3	:	DR, İç yarıçap
Ro_3	:	DR, Dış yarıçap
Lo_{ry}	:	DR, RY mıknatis boyu
Ri	:	İç yarıçap
Ro	:	Dış yarıçap
l	:	Aktif aksel boy
a	:	Hava aralığı
Br	:	Radyal akı yoğunluğu
$T_{dalgalanma}$:	Tork dalgalanma yüzdesi
$T_{en\ yüksek}$:	En yüksek tork değeri
$T_{en\ az}$:	En az tork değeri
T_{ort}	:	Ortalama tork değeri

Yunan Harfleri (Greek Letters)

ω_1	:	İR, Açısal hız
ω_2	:	OR, Açısal hız
ω_3	:	DR, Açısal hız
θ_1	:	İR, Açı
θ_2	:	OR, Açı
θ_3	:	DR, Açı

Teşekkür (Acknowledgment)

Yazarlar, bu araştırma için gerekli olanak ve kaynakları sağladıkları için TÜBİTAK SAGE ve Hitit Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] M. Keleş and C. Baykasoğlu, "Experimental and Numerical Investigation on the Effect of the Structural Characteristics of a Fin Actuation System on System Performance," *GMBD*, vol. 6, no. 1, Apr. 2020. doi: 10.30855/gmbd.2020.01.04
- [2] S. H. Kim and M.-J. Tahk, "Modeling and Experimental Study on the Dynamic Stiffness of an Electromechanical Actuator," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 53, no. 4, pp. 708–719, Jul. 2016. doi: 10.2514/1.A33483
- [3] E. Daş, İ. İ. Delice, and M. Keleş, "Analysis and robust position control of an electromechanical control actuation system," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, no. 3, pp. 628–640, Feb. 2020. doi: 10.1177/0142331218813421
- [4] Ö. Hastürk, "A novel electromechanical actuator for missile jet vane thrust control," in *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 2015. pp. 1298–1302.
- [5] C.-H. Yoo, "Active Control of Aeroelastic Vibrations for Electromechanical Missile Fin Actuation Systems," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 40, no. 12, pp. 3299–3306, Dec. 2017. doi: 10.2514/1.G002821
- [6] Ö. Hastürk, "Applications of slider chain inversion in control actuation systems," in *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 2016. pp. 1579–1584.
- [7] M. Keleş and C. Baykasoğlu, "Manyetik dişli tasarımında orta rotor segment destek parametrelerinin performansa etkilerinin incelenmesi," in *25. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Konya*, 14 Eylül 2024, pp. 371–375.
- [8] P. M. Tlali, R.-J. Wang, and S. Gerber, "Magnetic gear technologies: A review," in *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany: IEEE, Sep. 2014. pp. 544–550. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960233
- [9] J. J. Scheidler, "NASA's Magnetic Gearing Research for Electrified Aircraft Propulsion," in *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, Cincinnati, Ohio: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Jul. 2018. doi: 10.2514/6.2018-4988
- [10] Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi, and P. Alotto, "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 55, no. 5, pp. 4557–4566, Sep. 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2916765
- [11] C. G. C. Neves and A. F. F. Filho, "Magnetic Gearing Electromagnetic Concepts," *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 108–119, Mar. 2017. doi: 10.1590/2179-10742017v16i1874
- [12] K. Li, S. Modaresahmadi, W. B. Williams, J. D. Wright, D. Som, and J. Z. Bird, "Designing and Experimentally Testing a Magnetic Gearbox for a Wind Turbine Demonstrator," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 55, no. 4, pp. 3522–3533, Jul. 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2905838
- [13] K. K. Uppalapati, J. Z. Bird, J. Wright, J. Pritchard, M. Calvin, and W. Williams, "A Magnetic Gearbox with an Active Region Torque Density of 239Nm/L," *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. 54, no. 2, pp. 1331-1338, 2017. doi: 10.1109/TIA.2017.2779418
- [14] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2844–2846, Jul. 2001. doi: 10.1109/20.951324
- [15] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear," *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, p. 135, 2004. doi: 10.1049/ip-epa:20040224
- [16] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a High-Performance Magnetic Gear," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 41, no. 3, pp. 764–770, May 2005. doi: 10.1109/TIA.2005.847319
- [17] B. Praslicka, M. C. Gardner, M. Johnson, and H. A. Toliyat, "Review and Analysis of Coaxial Magnetic Gear Pole Pair Count Selection Effects," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, pp. 1–1, 2021. doi: 10.1109/JESTPE.2021.3053544
- [18] K. Li and J. Z. Bird, "A Review of the Volumetric Torque Density of Rotary Magnetic Gear Designs," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli: IEEE, Sep. 2018. pp. 2016–2022. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507059
- [19] S. Modaresahmadi, D. Barnett, H. Baninajar, J. Z. Bird, and W. B. Williams, "Structural modeling and validation of laminated stacks in magnetic gearing applications," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 192, p. 106133, Feb. 2021. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106133
- [20] S. Modaresahmadi, C. Nichols, and W. Williams, "Mechanical Design of Magnetic Gearboxes Optimized for Assembly," in *Volume 6A: Energy, Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers*, Nov. 2018. p. V06AT08A012. doi: 10.1115/IMECE2018-86878

- [21] D. Som et al., "Analysis and Testing of a Coaxial Magnetic Gearbox With Flux Concentration Halbach Rotors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 1–6, Nov. 2017. doi: 10.1109/TMAG.2017.2715799
- [22] M. Keleş and C. Baykasoglu, "Bir Manyetik Dişli Tasarımının Analizi ve Performans En İyileştirilmesi," in *ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, 26 Kasım 2022.
- [23] H. Baninajar, S. Modaresahmadi, H. Y. Wong, J. Bird, W. Williams, and B. Dechant, "Designing a Halbach Rotor Magnetic Gear for a Marine Hydrokinetic Generator," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 58, no. 5, pp. 6069–6080, Sep. 2022. doi: 10.1109/TIA.2022.3180705
- [24] T. Tallerico, Z. A. Cameron, and J. J. Scheidler, "Design of a Magnetic Gear for NASA's Vertical Lift Quadrotor Concept Vehicle," in *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, Indianapolis, IN*: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 2019. doi: 10.2514/6.2019-4477
- [25] J.-I. Lee et al., "Design and Analysis of the Coaxial Magnetic Gear Considering the Electromagnetic Performance and Mechanical Stress," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, pp. 1–5, Jun. 2020. doi: 10.1109/TASC.2020.2968267
- [26] H. Y. Wong, H. Baninajar, B. Dechant, and J. Bird, "Designing a Magnetic Gear for an Electric Aircraft Drivetrain," in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA*: IEEE, Oct. 2020. pp. 1–6. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9235977
- [27] Y. Kassab, A. Ghanem, and E. Gouda, "Analysis of a coaxial magnetic gear optimally designed using Particle Swarm Optimization," *Mansoura Engineering Journal*, vol. 49, no. 4, Jan. 2024. doi: 10.58491/2735-4202.3206
- [28] A. Aytaç, M. S. Işık, B. Çanakçı, T. Özdemir, K. Aztekin, and H. İpek, "AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi," *Savunma Bilimleri Dergisi*, vol. 17, no. 2, pp. 139–165, Nov. 2018. doi: 10.17134/khosbd.477252

This is an open access article under the CC-BY license

