



**T.C.**

**HİTİT ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**EŞ EKSENLİ MANYETİK DİŞLİLERİN TASARIMI, İMALATI VE  
KANATÇIK TAHRİK SİSTEMLERİNE UYGULANMASI**

**Doktora Tezi**

**Murat KELEŞ**

**Çorum - 2025**

**EŞ EKSENLİ MANYETİK DİŞLİLERİN TASARIMI, İMALATI VE  
KANATÇIK TAHRİK SİSTEMLERİNE UYGULANMASI**

**Murat KELEŞ**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Doktora Tezi**

**TEZ DANIŞMANI**

**Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU**

**Çorum 2025**

Murat KELEŞ tarafından hazırlanan “Eş Eksenli Manyetik Dişlilerin Tasarımı, İmalatı ve Kanatçık Tahrik Sistemlerine Uygulanması” adlı tez çalışması 25/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof Dr. Mehmet Fatih IŞIK .....

Başkan

Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU .....

Danışman

Doç Dr. Kürşat GÜLTEKİN .....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin ERDİN .....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK .....

Üye

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve ..... sayılı kararı ile Murat Keleş'in Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Osman ÇUBUK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Murat KELEŞ



**EŞ EKSENLİ MANYETİK DİŞLİLERİN TASARIMI, İMALATI VE  
KANATÇIK TAHRİK SİSTEMLERİNE UYGULANMASI**

Murat KELEŞ

ORCID:0000-0001-8453-1287

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Doktora Tezi

Ocak 2025

**ÖZET**

Havacılık, uzay ve savunma sektörleri başta olmak üzere birçok alanda ortaya çıkan ihtiyaçları karşılayabilecek özelliklere sahip yenilikçi güç aktarım mekanizmalarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda, yağsız ve sürtünmesiz koşullarda çalışabilen bir güç aktarım elemanı olarak Manyetik Dişlilerin (MD) bu alanlarda ortaya çıkan ihtiyaçları karşılama potansiyeli olup, bu konuda araştırmalar özellikle son yıllarda ivme kazanmıştır. Benzer bir motivasyonla gerçekleştirilen bu tez çalışması kapsamında, Kanatçık Tahrik Sistemlerinin (KTS) güç aktarım mekanizmalarında kullanılmak üzere eş eksenli MD'ler, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen Elektromanyetik Sayısal Analiz (ESA) bulguları dikkate alınarak tasarlanmış, performans kriterlerini en üst seviyede sağlayan tasarımlar imal edilmiş ve gerçekleştirilen deneysel performans testleriyle MD'lerin uygulama açısından potansiyelleri ortaya konmuştur. KTS uygulaması için gereksinim duyulan aktarma oranını ve Hacimsel Tork Yoğunluğu (HTY) değerlerini (5-5,5 ve ~230 Nm/L) sağlayabilecek MD tasarımlarının geliştirilmesinde önce uygun kutup çifti ve segment sayıları farklı kombinasyonlar dikkate alınarak belirlenmiştir. Daha sonra, Radyal Dizilim (RD), Halbach Dizilim (HD) ve Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilim (AKHD) olmak üzere üç farklı mıknatıs dizilim tipi dikkate alınarak, arzu edilen performans hedeflerini sağlama potansiyeli en yüksek olan mıknatıs dizilim tipi farklı geometrik parametreler değişken olarak tanımlanıp gerçekleştirilen ESA ile belirlenmiştir. ESA sonuçları, belirlenen performans hedeflerini sağlama potansiyeline en yüksek seviyede sahip tasarımların AKHD MD olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ESA sonuçları, uygun tasarım ve mıknatıs seviyesi parametrelerinin seçimiyle AKHD MD tasarımlarının performansının dikkate

değer mertebede iyileştirilebileceğini göstermiştir. AKHD MD tasarımlarında Orta Rotor (OR) malzemesi olarak ayrıca, AISI 1018 ve laminasyonlu elektrik çeliğinin kullanıldığı iki farklı MD versiyonu dikkate alınmış ve bu tasarımların performansları HTY açısından karşılaştırılmıştır. ESA'dan elde edilen kuvvetler ve MD'nin çalışma prensibine göre mekanik sınır koşulları, sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı kullanılarak AKHD MD tasarımlarına uygulanmış ve gerçekleştirilen yapısal analizlerle MD tasarımlarının mekanik yönden de performansları ortaya konmuştur. Geliştirilen AKHD MD tasarımlarının deneysel olarak da performanslarının ortaya konulması noktasında tasarım bileşenlerinin imalat ve montajları farklı imalat yaklaşımları ve özel olarak geliştirilen yardımcı aparatlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İmal edilen MD'lerin kutup çifti ve segment sayılarından türetilen aktarma oranı, test düzeneği kullanılarak deneysel olarak elde edilip, bulguların sayısal sonuçlarla tutarlılığı gösterilmiştir. AKHD MD versiyonlarının aktarma oranlarının sayısal analizlerle tutarlı şekilde 5,32-5,35 aralığında olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca, MD tasarımlarının performansları, tasarlanan gerçek zamanlı yükleme sistemi ile deneysel olarak detaylı şekilde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. İlk olarak MD versiyonlarının sınırları zorlanarak kendinden emniyetli duruma geçtiği çıkış tork değerleri elde edilmiş ve ardından HTY değerleri her iki versiyon için deneysel olarak ölçülmüştür. Bu noktada, HTY değerleri birinci ve ikinci MD versiyonları için sırasıyla 221,66 Nm/L ve 229,46 Nm/L olarak elde edilmiştir. Ayrıca, farklı hız ve tork yüklemelerinde yapılan testler ile her iki tasarım için verim değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu bağlamda, yüksek çıkış tork değerlerinde %99,9'a varan verim değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra, geliştirilen MD'ler tipik bir KTS mekanizmasına entegre edilerek, performansları deneysel olarak incelenmiştir. Bu noktada, öncelikle KTS mekanizmasının çalışma prensibine göre sınır koşulları, sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı kullanılarak tasarımlara uygulanmış ve gerçekleştirilen yapısal analizlerle tasarlanan sistemin emniyetli şekilde yükleri taşıyabileceği gösterilmiştir. Sonrasında, farklı OR versiyonlarının kullanıldığı MD'li KTS tasarımlarının gerçek zamanlı yükleme sistemi ile performansları incelenmiş ve KTS için hedeflenen HTY değerine ulaşıldığı deneysel olarak gösterilmiştir. Hassas pozisyon kodlayıcılar ile gerçekleştirilen deneysel testlerin sonucunda manyetik tork yay sabitleri elde edilmiş ve bulgular sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Farklı tork yüklerinde çıkış pozisyonunun doğrusal olmayan bir davranış göstermesi, farklı yapıda kontrol algoritmalarının gelişmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar bir güç aktarım elemanı olarak MD'lerin KTS ve benzeri uygulamalar özelinde kullanılabilme potansiyeli ile avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuş olup, bu bağlamda elde edilen bulgular tasarımcılara çalışmalarında yol gösterici olacaktır.

**Anahtar Kavramlar:** Manyetik dişli, Sayısal analiz, Halbach, Deneysel test düzeneği, Kanatçık Tahrik Sistemi (KTS), Manyetik tork yay sabiti

**Bilim Kodu:** 90516, 91419

**DESIGN, MANUFACTURING, AND APPLICATION OF COAXIAL MAGNETIC GEARS  
ON FIN ACTUATION SYSTEMS**

Murat KELEŞ

ORCID:0000-0001-8453-1287

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Doctor of Philosophy Thesis

January 2025

**ABSTRACT**

The necessity for innovative power transmission mechanisms that can satisfy the emerging demands across various domains, particularly in the aviation, space, and defense sectors, is escalating on a daily basis. In this context, as a power transmission element that can operate in oil-free and frictionless conditions, Magnetic Gears (MGs) have the potential to meet the needs arising in these areas. Research on this subject has gained momentum, especially in recent years. The scope of this thesis encompasses the design of coaxial MGs intended for utilisation in the power transmission mechanisms of Fin Actuation System (FAS). These designs have been formulated based on the findings of Electromagnetic Numerical Analysis (ENA), employing a two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) finite element modelling approach. The fabrication of designs that meet the performance criteria at the highest level has been undertaken, and the potential of MGs in terms of application has been demonstrated through experimental performance tests. In the development of MG designs that can provide the required transmission ratio and Volumetric Torque Density (VTD) values (5-5,5 and ~230 Nm/L) for the FAS application, the appropriate pole pair and number of segments were first determined by considering different combinations. In the following study, three distinct magnet array types, namely, Radial Array (RA), Halbach Array (HA), and Flux Concentration Halbach Array (FCHA), were considered. The objective was to determine the magnet array type with the highest potential to meet the desired performance targets. This was achieved by employing 2D and 3D ENA, with different geometrical parameters defined as variables. The ENA results demonstrated that the designs with the highest potential to meet the specified

performance targets were FCHA MG. Furthermore, experimental results obtained from ENA have demonstrated that the performance of FCHA MG designs can be significantly enhanced by the selection of appropriate design and magnet level parameters. In the FCHA MG designs, two different MG versions using AISI 1018 and laminated electrical steel as Middle Rotor (MR) material were also considered, and the performances of these designs were compared in terms of VTD. The performances of the MG designs in the mechanical direction were revealed by the structural analyses performed. In order to demonstrate the experimental performance of the developed FCHA MG designs, the manufacturing and assembly of the components of the designs were carried out using different manufacturing approaches and specially developed auxiliary apparatus. The power transmission ratio, derived from the number of pole pairs and segments of the fabricated MGs, is obtained through experimental means using the test setup. The consistency of the findings with the numerical results is demonstrated. Experimental evidence has demonstrated that the power transmission ratios of the FCHA MG versions are within the range of 5,32-5,35, thereby validating the numerical analyses. Furthermore, an experimental investigation was conducted to compare the performance of the MG designs with that of the designed real-time loading system. Initially, the output torque values at which the two designs are pushed to their limits and enter the intrinsically safe state are obtained. Subsequently, the VTD values were measured experimentally for both designs. At this point, the VTD values were 221,66 Nm/L and 229,46 Nm/L for the first and second MG versions, respectively. Furthermore, experimental testing was conducted to obtain efficiency values for both designs, with variations in speed and torque loadings. In this context, efficiency values of up to 99,9% have been calculated at high output torque values. Subsequently, the developed MGs are integrated into a typical FAS mechanism, and their performance is investigated through experimental means. Subsequent to this, an analysis of the performance of the FAS designs with MG utilizing disparate MR versions was conducted using the real-time loading system. This analysis yielded experimental evidence that the targeted VTD value for the FAS was successfully achieved. As a result of the experimental tests performed with precision position encoders, magnetic torque spring constants were obtained. These findings were then compared with numerical results. The nonlinear behavior of the output position, when subjected to varying torque loads, has underscored the imperative for the development of control algorithms that are characterized by a distinct structural design. The results obtained within the scope of this thesis have revealed the advantages and disadvantages of MGs as a power transmission element with the potential to be used in FAS and similar applications, and the findings obtained in this context will guide the designers.

**Key Terms:** Magnetic gear, Numerical analysis, Halbach, Experimental test setup, Fin Actuation System (FAS), Magnetic torque spring constant

**Science Code:** 90516, 91419

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde, beni yönlendiren, değerli bilgi ve görüşlerini benimle paylaşan ve deneyimlerini aktaran çok kıymetli ve saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübeleriyle bana destek sağlayan ve tez jürisinde yer alan Sayın Prof. Dr. Mehmet Fatih IŞIK'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin ERDİN'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, sabrı, sevgisi ve sonsuz desteğiyle bana güç veren can canım eşim Merve KELEŞ'e en derin minnet ve şükranlarımı sunarım.

Her zaman yanımda olup başarıma inanan, desteğini esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Ömer KOÇ, İbrahim ÖZÇİÇEK, Hüseyin GÖLCÜK ve Dr. Kamil Kamuran YEŞİLKAYA'ya gönülden teşekkür ederim.

Çalışmalarında bana destek olan Mekatronik Sistemler Birimi mesai arkadaşlarım ve birim amir'im Berkay BAYKARA'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, benim için her türlü fedakârlıkta bulunan, beni yüreklendiren ve güvenlerini daima hissettiren sevgili annem Gülsüm KELEŞ' e, babam Reşit KELEŞ' e, kardeşimlerim Büşra ve Ayşenur KELEŞ' e sonsuz teşekkür ederim.

Tez sürecinin zorlu zamanlarında bana hayatın güzelliklerini gösteren, içimi rahatlatan, mutluluk veren ve ailemize neşe katan kızım Zeynep ve oğlum Yusuf İlhan' a minnettarım.

Çalışmalarım boyunca bana maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü (TÜBİTAK SAGE)'ne teşekkür ederim.

Murat KELEŞ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xx
GİRİŞ .....	1
<b>1. BÖLÜM</b>	
<b>MANYETİK DİŞLİ TASARIMI</b>	
1.1. Manyetik Dişlilerin Çalışma Prensibi.....	10
1.2. Kavramsal Tasarım.....	13
1.3. Kutup Çifti Seçimi.....	15
<b>2. BÖLÜM</b>	
<b>ELEKTROMANYETİK SAYISAL ANALİZ ve TASARIM</b>	
2.1. Elektromanyetik Sayısal Analiz.....	17
2.2. Parametrik Çalışma .....	20
2.3. Tasarım Geliştirme .....	37
2.3.1. Akı yoğunluğu analizi.....	37
2.3.2. Mekanik tasarım .....	38
2.3.3. 3B sayısal analiz .....	43
2.4. Yapısal Sayısal Analiz .....	44
2.4.1. Kuvvet analizi.....	45
2.4.1. Yapısal analiz.....	47

### 3. BÖLÜM

#### ÜRETİM ve MONTAJ

3.1. AKHD-2 tip MD V <sub>1</sub> Tasarımının Prototip Üretimi .....	55
3.1.1. Manyetik dişlide kullanılan mıknatıslar .....	55
3.1.2. Giriş kısmı (İR) .....	56
3.1.3. Dış kısım (DR) .....	59
3.1.4. Çıkış kısmı (OR V <sub>1</sub> ) .....	62
3.1.5. V <sub>1</sub> tasarım için montaj aşamaları .....	63
3.2. AKHD-2 tip MD V <sub>2</sub> Tasarımının Prototip Üretimi .....	65

### 4. BÖLÜM

#### PERFORMANS TESTLERİ ve SAYISAL MODEL DOĞRULAMA

4.1. Test Düzenekleri .....	68
4.1.1. Mekanik sistemler ve yapısal bileşenler .....	69
4.1.2. Elektriksel güç ve kontrol sistemleri .....	69
4.2. Aktarma Oranı Testi .....	71
4.3. Yükleme Sistemi Testi .....	72
4.3.1. Deneysel hacimsel tork yoğunluğu .....	75
4.3.2. Performans testleri .....	78

### 5. BÖLÜM

#### KANATÇIK TAHRİK SİSTEMİ

5.1. Mekanizma Analizi .....	84
5.1.1. Mekanizma kinematik analizi .....	84
5.1.2. Mekanizma kuvvet analizi .....	89
5.2. Model ve Yapısal Analiz .....	92
5.3. KTS Performans Test Sonuçları .....	95
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>103</b>

	Sayfa
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>105</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>111</b>
<b>EK-1 .....</b>	<b>112</b>
<b>EK-2 .....</b>	<b>113</b>
<b>EK-3 .....</b>	<b>114</b>
<b>EK-4 .....</b>	<b>115</b>
<b>EK-5 .....</b>	<b>116</b>
<b>EK-6 .....</b>	<b>120</b>



## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 1.1.</b> Performans hedef kriterleri.....	<b>15</b>
<b>Tablo 1.2.</b> Çeşitli kutup çifti ve ferromanyetik sayıları için elde edilen aktarma oranları .....	<b>15</b>
<b>Tablo 2.1.</b> Tasarım parametreleri.....	<b>18</b>
<b>Tablo 2.2.</b> Hedeflenen HTY değerleri.....	<b>21</b>
<b>Tablo 2.3.</b> RD ve HD tip MD tasarımı için sayısal analiz sonuçları.....	<b>22</b>
<b>Tablo 2.4.</b> HD MD tasarımı için değişken parametreler .....	<b>22</b>
<b>Tablo 2.5.</b> Ara tasarım performanslarının karşılaştırması .....	<b>23</b>
<b>Tablo 2.6.</b> OR segment birleşim parametrelerinin değişken aralığı .....	<b>24</b>
<b>Tablo 2.7.</b> AKHD MD tasarım parametreleri.....	<b>26</b>
<b>Tablo 2.8.</b> MD destek ve mıknatis seviyesi için karşılaştırmalı performans sonuçları .....	<b>29</b>
<b>Tablo 2.9.</b> AKHD-2 MD için temel değişken parametreler .....	<b>29</b>
<b>Tablo 2.10.</b> AKHD-2 MD mıknatis boyları değişken parametreleri.....	<b>31</b>
<b>Tablo 2.11.</b> AKHD-2 MD geometrik açısal değişken parametreleri .....	<b>33</b>
<b>Tablo 2.12.</b> AKHD-2 MD hava aralığı değişken parametreleri .....	<b>34</b>
<b>Tablo 2.13.</b> AKHD-2 tip MD en iyilenmiş tasarım değerleri.....	<b>36</b>
<b>Tablo 2.14.</b> Tüm MD tasarım performanslarının karşılaştırması .....	<b>37</b>
<b>Tablo 2.15.</b> 2B ile 3B MD tasarım sonuçlarının karşılaştırması .....	<b>44</b>
<b>Tablo 2.16.</b> Gerilme sonuçları ve emniyet katsayıları.....	<b>54</b>
<b>Tablo 4.1.</b> MD $V_1$ tasarımı için 50 Nm, 360° ortalama değerler .....	<b>74</b>
<b>Tablo 4.2.</b> Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.....	<b>77</b>
<b>Tablo 4.3.</b> MD $V_1$ tasarımı için farklı açısal hız - tork yükünde verim .....	<b>80</b>
<b>Tablo 4.4.</b> MD $V_2$ tasarımı için farklı açısal hız - tork yükünde verim .....	<b>82</b>
<b>Tablo Ek-6.1.</b> MD $V_1$ sabit 200°/sn açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>120</b>
<b>Tablo Ek-6.2.</b> MD $V_1$ sabit 175°/sn açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>120</b>

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo Ek-6.3.</b> MD $V_1$ sabit $150^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>120</b>
<b>Tablo Ek-6.4.</b> MD $V_1$ sabit $125^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>121</b>
<b>Tablo Ek-6.5.</b> MD $V_1$ sabit $100^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>121</b>
<b>Tablo Ek-6.6.</b> MD $V_2$ sabit $200^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>121</b>
<b>Tablo Ek-6.7.</b> MD $V_2$ sabit $175^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>122</b>
<b>Tablo Ek-6.8.</b> MD $V_2$ sabit $150^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>122</b>
<b>Tablo Ek-6.9.</b> MD $V_2$ sabit $125^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>122</b>
<b>Tablo Ek-6.10.</b> MD $V_2$ sabit $100^\circ/\text{sn}$ açısal hız - farklı tork yükü.....	<b>123</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Mıknatıs diziliminin manyetik alan üzerindeki etkisinin temsili bir gösterimi.....	10
Şekil 1.2. Manyetik dişli ana bölümleri .....	11
Şekil 1.3. Mıknatıs manyetizma yönlerinin gösterimi.....	12
Şekil 1.4. Mıknatıs dizilim durumlarına göre MD tipleri.....	13
Şekil 1.5. Ters krank biyel mekanizması gösterimi (Keleş and Baykasoğlu 2020) .....	14
Şekil 1.6. MD için sınırlandırılan aktif hacim .....	14
Şekil 1.7. Kutup çiftinin gösterimi .....	16
Şekil 2.1. HD tip manyetik dişli parametreleri.....	18
Şekil 2.2. MD ESA için genel ağ yapısı .....	19
Şekil 2.3. HD MD tasarımı için en yüksek çıkış tork pozisyonu.....	19
Şekil 2.4. Tasarım gelişimi ana akış şeması .....	20
Şekil 2.5. RD ve HD tip MD tasarım şemaları .....	21
Şekil 2.6. HD MD tasarımı için $R_{i3}$ ve $R_{o1}$ parametre değerlerinin HTY'ye etkisi.....	23
Şekil 2.7. OR segment tasarım parametreleri.....	24
Şekil 2.8. Segment destek parametrelerinin HTY'ye etkisi .....	25
Şekil 2.9. Giriş ve çıkış ortalama tork değerlerinin $a$ ve $b$ parametrelerine göre değişimi .....	25
Şekil 2.10. AKHD MD tasarım parametreleri .....	26
Şekil 2.11. İR ve DR'de farklı mıknatıs tiplerinin HTY'ye etkisi .....	27
Şekil 2.12. Farklı mıknatıs seviyelerinin HTY'ye etkisi .....	28
Şekil 2.13. AKHD-MD-2 parametrik çalışma akış şeması .....	29
Şekil 2.14. $R_{i1}$ ve $Li_{ty}$ parametrelerinin HTY'ye etkisi.....	30
Şekil 2.15. $R_{o3}$ ve $Lo_{ty}$ parametrelerinin HTY'ye etkisi .....	31
Şekil 2.16. $Li_{ty}$ ve $Lo_{ty}$ parametrelerinin HTY'ye etkisi.....	32
Şekil 2.17. $Li_{ry}$ ve $Lo_{ry}$ parametrelerinin HTY'ye etkisi .....	32
Şekil 2.18. $\theta_1$ ve $\theta_2$ parametrelerinin HTY'ye etkisi .....	33

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.19. AKHD-2 MD hava aralığı şematik gösterimi .....	34
Şekil 2.20. $C_i$ ve $C_R$ hava aralığı parametrelerinin HTY'ye etkisi .....	35
Şekil 2.21. AKHD-2 MD mıknatıslar arası mekanik boşluk.....	36
Şekil 2.22. İR ve OR arası 28,75 mm'de açığa göre radyal akı yoğunluğu .....	37
Şekil 2.23. OR ile DR arası 35,7 mm'de açığa göre radyal akı yoğunluğu .....	38
Şekil 2.24. Uzaysal harmonik analiz.....	38
Şekil 2.25. Manyetik dişli mekanik yapısının şematik gösterimi .....	39
Şekil 2.26. DR (Sabit kısım).....	40
Şekil 2.27. İR (Giriş kısmı) .....	40
Şekil 2.28. OR için iki farklı tasarım gösterimi (Çıkış kısmı).....	41
Şekil 2.29. Manyetik dişli ana kısımları .....	41
Şekil 2.30. 3B katı modeli oluşturan parçaların detaylı görünümü .....	42
Şekil 2.31. Manyetik dişli 3B tasarımı görseli .....	42
Şekil 2.32. AKHD-2 MD $V_1$ 3B modeli (sadece aktif hacim).....	43
Şekil 2.33. AKHD-2 MD $V_1$ 3B modeli (gerçek model) .....	44
Şekil 2.34. AKHD-2 MD tasarımı için en yüksek çıkış tork pozisyonunun gösterimi.....	45
Şekil 2.35. Elektromanyetik analizde hesaplanan kuvvet yönlerinin gösterimi.....	45
Şekil 2.36. İR kuvvet analiz .....	46
Şekil 2.37. DR kuvvet analizi .....	46
Şekil 2.38. OR kuvvet analizi .....	47
Şekil 2.39. MD üzerine etkiyen kuvvet tanımlaması.....	48
Şekil 2.40. Manyetik dişli tasarımı ve ağ yapısı .....	48
Şekil 2.41. MD ve dış çerçeve sayısal analiz sonuçları.....	49
Şekil 2.42. Dış destek sayısal analiz sonucu.....	49
Şekil 2.43. Giriş mili ve mıknatıs sayısal analiz sonucu.....	49
Şekil 2.44. Manyetik dişli $V_1$ ve $V_2$ tasarımları .....	50

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.45. AKHD tip MD $V_1$ tasarımı OR kuvvet ve ağ yapısı gösterimi .....	50
Şekil 2.46. OR $V_1$ destek parçası.....	51
Şekil 2.47. OR $V_1$ gerilme sayısal analiz sonucu.....	51
Şekil 2.48. OR $V_1$ yer değiştirme sayısal analiz sonucu .....	51
Şekil 2.49. AKHD tip MD $V_2$ tasarımı OR kuvvet ve ağ yapısı gösterimi .....	52
Şekil 2.50. OR laminasyonlu ve destek parçası yapısal analiz sonucu .....	53
Şekil 2.51. OR $V_2$ gerilme sayısal analiz sonuçları .....	53
Şekil 2.52. OR $V_2$ yer değişim sayısal analiz sonuçları .....	53
Şekil 3.1. AKHD-2 tip MD $V_1$ tasarımının 3B katı modeli.....	55
Şekil 3.2. Radyal yönlü bir mıknatısın teknik resmi ve görüntüsü .....	56
Şekil 3.3. AKHD-2 tip MD'nin İR kısmı.....	57
Şekil 3.4. MD İR montajı için mıknatıs tutma aparatı.....	57
Şekil 3.5. Araldite 2015-1 yapısal yapıştırıcı .....	57
Şekil 3.6. Giriş mili mıknatıs montajlama aparatı .....	58
Şekil 3.7. Giriş mili ve mıknatısların montajlanarak kutup yönlerinin gösterimi .....	59
Şekil 3.8. AKHD-2 MD'de DR'nin bileşenleri .....	59
Şekil 3.9. DR'de sabit bulunan dış kovan ve dış destek montajı .....	60
Şekil 3.10. DR mıknatıs aparatı yerleşimi.....	60
Şekil 3.11. MD tasarımında belirlenen AKHD ile uyumlu şekilde montajı yapılan DR.....	61
Şekil 3.12. DR mıknatıslarının aparat ile montajlanması .....	61
Şekil 3.13. AKHD-2 tip MD için DR'nin nihai durumu.....	62
Şekil 3.14. AKHD-2 tip MD $V_1$ için OR üretimi.....	62
Şekil 3.15. OR ve İR arasında kullanılan rulmanların montajı .....	63
Şekil 3.16. AKHD-2 tip MD $V_1$ için İR ile OR'nin montajı.....	63
Şekil 3.17. AKHD-2 tip MD $V_1$ tasarımında OR ile DR'nin montajı.....	64
Şekil 3.18. AKHD-2 tip MD $V_1$ nihai prototipi.....	64

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.19. AKHD-2 tip MD V <sub>2</sub> tasarımınının 3B katı modeli .....	65
Şekil 3.20. AKHD-2 tip MD V <sub>2</sub> laminasyonlu OR.....	65
Şekil 3.21. Laminasyonlu OR sac paketi aparatı.....	66
Şekil 3.22. Laminasyonlu OR ve destek parçası.....	66
Şekil 3.23. AKHD-2 tip MD V <sub>2</sub> için laminasyonlu OR montajı .....	67
Şekil 3.24. AKHD-2 tip MD V <sub>1</sub> prototipinden sökülen İR ve DR.....	67
Şekil 3.25. AKHD-2 tip MD V <sub>2</sub> nihai prototipi.....	67
Şekil 4.1. OR'ye göre MD V <sub>1</sub> ve V <sub>2</sub> tasarımları.....	68
Şekil 4.2. Yükleme test sistemi şematik gösterimi.....	69
Şekil 4.3. Yükleme test sistemi elektriksel şeması.....	70
Şekil 4.4. Aktarma oranı test sistemi.....	71
Şekil 4.5. MD V <sub>1</sub> tasarımı için pozisyona göre aktarma oranı testi .....	72
Şekil 4.6. Yükleme test sistemi.....	72
Şekil 4.7. MATLAB®-Simulink kontrol blokları.....	73
Şekil 4.8. MD V <sub>1</sub> tasarımı için 50 Nm 360° pozisyon emrinde tork ve hız grafikleri .....	74
Şekil 4.9. MD V <sub>1</sub> tasarımı için 71,74 Nm tork yükü altında aşırı yükte koruma testi.....	75
Şekil 4.10. MD V <sub>2</sub> tasarımı için 75,36 Nm tork yükü altında aşırı yükte koruma testi.....	75
Şekil 4.11. MD V <sub>1</sub> tasarımı için 70,51 Nm tork yükü altında test .....	76
Şekil 4.12. MD V <sub>2</sub> tasarımı için 72,92 Nm tork yükü altında test .....	76
Şekil 4.13. Farklı hızlarda zamana bağlı pozisyon emri.....	78
Şekil 4.14. 65 Nm tork yükü altında 200°/sn açısal hızda MD V <sub>1</sub> tasarımı için performans testi .....	79
Şekil 4.15. MD V <sub>1</sub> tasarımı için farklı açısal hız ve tork yükü altında verim .....	80
Şekil 4.16. 68 Nm tork yükü altında 200°/sn açısal hızda MD V <sub>2</sub> tasarımı için performans testi .....	81
Şekil 4.17. MD V <sub>2</sub> tasarımı için farklı açısal hız ve tork yükü altında verimi.....	82
Şekil 4.18. MD V <sub>1</sub> ve MD V <sub>2</sub> tasarımları için verim .....	83

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.1. Ters krank biyel mekanizması kinematik çizimi .....	85
Şekil 5.2. $\theta_{14}$ 'ün $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi .....	86
Şekil 5.3. Somun hareketinin $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi .....	87
Şekil 5.4. Mekanizma aktarma oranının $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi.....	88
Şekil 5.5. Motor açısal hızı $\omega_m$ 'nin $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi.....	89
Şekil 5.6. Mekanizma uzuvlarının serbest cisim diyagramları .....	90
Şekil 5.7. Somun üzerine düşen kuvvetin $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi.....	91
Şekil 5.8. Motor tork gereksiniminin $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi.....	92
Şekil 5.9. MD KTS tasarımı ve malzemeleri .....	92
Şekil 5.10. Ana yatak yapısal analiz.....	93
Şekil 5.11. Ana yatak gerilme analizi.....	93
Şekil 5.12. Ana yatak yer değişimi.....	94
Şekil 5.13. Aktarma kolunun yapısal analizi ve toplam yer değiştirmesi .....	94
Şekil 5.14. Aktarma kolunun gerilme analizi.....	95
Şekil 5.15. Manyetik dişlili kanatçık tahrik sistemi prototipi .....	95
Şekil 5.16. MD KTS prototip ve TKYC .....	96
Şekil 5.17. MD V <sub>1</sub> KTS tasarımı için performans testi.....	97
Şekil 5.18. MD V <sub>1</sub> KTS tasarımı için 60 Nm altındaki harekette motor akım grafiği .....	98
Şekil 5.19. MD V <sub>1</sub> KTS tasarımı için farklı yük pozisyon değişimi.....	99
Şekil 5.20. MD V <sub>1</sub> KTS tasarımı için sayısal ve deneysel tork-pozisyon karşılaştırması.....	100
Şekil 5.21. MD V <sub>2</sub> KTS tasarımı için farklı yük pozisyon değişimi.....	100
Şekil 5.22. MD V <sub>2</sub> KTS tasarımı için sayısal ve deneysel tork-pozisyon karşılaştırması.....	101
Şekil 5.23. MD KTS tasarımı için manyetik tork yay sabiti .....	102
Şekil Ek-1.1. Mıknatıs kalite kontrol raporu ve B-H eğrisi .....	112
Şekil Ek-2.1. Elektrik çeliği malzeme sertifikası .....	113
Şekil Ek-3.1. Torkmetre.....	114

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil Ek-4.1.</b> Kodlayıcı.....	<b>115</b>
<b>Şekil Ek-5.1.</b> 65 Nm tork yükü altında 175°/sn açısal hızda MD V <sub>1</sub> performans testi.....	<b>116</b>
<b>Şekil Ek-5.2.</b> 65 Nm tork yükü altında 150°/sn açısal hızda MD V <sub>1</sub> performans testi.....	<b>116</b>
<b>Şekil Ek-5.3.</b> 65 Nm tork yükü altında 125°/sn açısal hızda MD V <sub>1</sub> performans testi.....	<b>117</b>
<b>Şekil Ek-5.4.</b> 65 Nm tork yükü altında 100°/sn açısal hızda MD V <sub>1</sub> performans testi.....	<b>117</b>
<b>Şekil Ek-5.5.</b> 68 Nm tork yükü altında 175°/sn açısal hızda MD V <sub>2</sub> performans testi.....	<b>118</b>
<b>Şekil Ek-5.6.</b> 68 Nm tork yükü altında 150°/sn açısal hızda MD V <sub>2</sub> performans testi.....	<b>118</b>
<b>Şekil Ek-5.7.</b> 68 Nm tork yükü altında 125°/sn açısal hızda MD V <sub>2</sub> performans testi.....	<b>119</b>
<b>Şekil Ek-5.8.</b> 68 Nm tork yükü altında 100°/sn açısal hızda MD V <sub>2</sub> performans testi.....	<b>119</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$n_2$	OR, Çelik 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
$Li_{ty}$	İR, TY 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
$Lo_{ty}$	DR, TY mıknatis boyu
$R_i$	İç yarıçap
$R_o$	Dış yarıçap
$l$	Aktif aksenal boy
$a$	Segment destek kalınlığı
$b$	Segment destek kalınlığı
$C_i$	İR, hava aralığı
$C_r$	DR, hava aralığı

$B_r$	Radyal akı yoğunluğu
$B_\theta$	Teğetsel akı yoğunluğu
$a_1$	Çıkış ile motor dönme eksenine arasındaki yatay uzaklık
$a_2$	Kuvvet kolu uzunluğu
$c$	Çıkış ile motor dönme eksenine arasındaki eksantriklik
$s$	Somunun, motor dönme eksenine uzaklığı
$s_0$	Açı $0^\circ$ 'de iken somunun, motor dönme eksenine uzaklığı
$N$	Mekanizmanın anlık aktarma oranı
$T_{kmax}$	Çıkış en yüksek torku
$p$	Bilya vida adımı
$F_a$	Bilya vidanın dönme ekseninde gelen aksel yük
$\theta_{12}$	Çıkış kuvvet kolunun yatay eksenle yaptığı açı
$\theta_{14}$	Bilya vida – motor bütününe yatay eksenle yaptığı açı
$\omega_1$	İR, Açısal hız
$\omega_2$	OR, Açısal hız
$\omega_3$	OD, Açısal hız
$\theta_1$	İR, Açı
$\theta_2$	OR, Açı
$\theta_3$	DR, Açı
$\omega_g$	Deneysel giriş açısal hız
$\omega_\zeta$	Deneysel çıkış açısal hız
$T_g$	Deneysel giriş tork değeri
$T_\zeta$	Deneysel çıkış tork değeri

### Kısaltmalar

AKHD	Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilim
ASME	American Society of Mechanical Engineers

DR	Dış Rotor
ESA	Elektromanyetik Sayısal Analiz
GD&T	Geometric Dimensional and Tolerance
İR	İç Rotor
HD	Halbach Dizilim
HTY	Hacimsel Tork Yoğunluğu
KTS	Kanatçık Tahrik Sistemi
MD	Manyetik Dişli
OR	Orta Rotor
RD	Radyal Dizilim
RY	Radyal Yön
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
TY	Teğet Yön
2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu

## GİRİŞ

Teknoloji ve bilimin gelişimine yön veren havacılık, uzay ve savunma sanayi her geçen gün yeni gelişimlerin çıkış merkezi olmaktadır. Bu alanlardaki mühendislik uygulamalarında verimliliği yüksek ve sınırlı enerji ile çalışabilen mekanizmaların hayata geçirilmesi kritik bir öneme sahip olup, hedeflenen tasarımların gereksinimleri gün geçtikçe artmakta ve sistemlerin yenileştirilmesi ya da yeni fikirlerin uygulamaya geçirilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Savunma sanayiinin başlıca unsurlarından biri olan mühimmat teknolojilerinde bu yeniliklerin izleri açıkça görülebilmektedir. Bu kapsamda, hassas yönelim ve yüksek oranda zarar verebilme kabiliyetine sahip, menzili arttırılmış ve uygun maliyetli yeni nesil mühimmatlar sürekli olarak geliştirilmektedir. Uçuş maliyeti ve risklerinden dolayı, havadan karaya atılan mühimmatlarda hedefin tek atışta tahrip edilmesi istenmektedir. Bu doğrultuda, hedefin tek atışta vurulabilmesi için yönelim hareketine bağlı olan güdüm emirlerini anlık olarak uygulayıp takip edebilen ve güvenilirliği yüksek Kanatçık Tahrik Sistemine (KTS) ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan, mühimmatın başarılı bir uçuş yapabilmesi için KTS'nin davranışına etki edecek tüm parametreler kontrol edilerek, belirsizliklerin en aza indirgenmesi gerekmektedir (Keleş ve Baykasoğlu, 2020; Kim ve Tahk, 2016; Siouris, 2006). Aksi takdirde, KTS düzeyinde oluşan her hata, doğrudan mühimmat yönelimini etkileyeceği için uçuş başarısız olabilecektir (Kim ve Tahk, 2016). Bu noktada, KTS'lerden istenilen çıktıların elde edilebilmesi amacıyla birçok yeni mekanizma önerilmiş veya mevcut mekanizmaların performanslarının iyileştirilmesi noktasında birçok çalışma yapılmıştır (Yoo, 2017; Yerlikaya ve Balkan, 2017; Shelan ve ark., 2020). KTS veya benzer sistemlerin güç aktarma organları bu bağlamda dikkate alınması gereken 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 dişlilerin yağlı ortamda gürültülü ve titreşimli şekilde çalışmaları mekanik tasarımı güçleştirmekte olup, bu dişlilerin ömürlerinin artırılması, yağsız çalışmaları ve bakım maliyetlerinin azaltılması gibi konularda halen araştırmalar devam etmektedir. Bu noktada, uzun çalışma sürelerinde mekanik dişlilerin profillerinde aşınma dolayısıyla bozulmalar meydana gelmekte ve dişlilerin alıştırma işlemi uygulanmadan kullanılması verimliliği düşürmektedir. Ayrıca, istenmeyen aşırı yüklenme durumlarında mekanik dişliler zarar görebilmekte ve fonksiyonlarını yerine getiremeyebilmektedir. Bu bağlamda, mekanik dişlilere alternatif olabilecek Manyetik Dişli (MD) tasarımları son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. 1980'li yıllardan sonra nadir toprak elementlerin birleşimi ile meydana gelen NdFeB mıknatıslarının keşfi MD'lerin gelişmesine önemli katkı sağlamıştır. MD sistemleri karakteristik olarak temassız ve yağsız çalışabilme özellikleri ile ön plana çıkmakta, bakım maliyetlerini düşürmekte ve düşük titreşim seviyeleri ile sisteme fazla yük gelmesini engelleyerek emniyeti sağlamaktadır (Tlali ve ark., 2014; Scheidler, 2018). Ayrıca, MD'ler aşırı yüklenme durumlarında kendinden emniyet yeteneği ile sistemin zarar görmesini engellemektedir (Bird, 2021). İlk elektromanyetik dişli patenti Armstrong (1901) tarafından düz mekanik dişli çalışma prensibine benzer bir yapı ile

alınmıştır. Bu yapı mıknaş ve çelik rotordan oluşan iki ana bileşene sahiptir. Tork aktarımı sadece birkaç diş arasındaki manyetik etkileşimden sağlandığından dolayı önerilen dişlinin verimi ve tork yoğunluğu diğer sistemlere göre yetersiz kalmıştır. MD gelişimi için bir diğer önemli patent ise Martin ve ark. (1968) tarafından alınmıştır. Bu bağlamda, eş eksenli MD tasarımı ile düz mekanik dişli yapısından daha fazla tork yükü elde edilmiştir. Ancak, o dönemde mıknaş malzeme sınırlamaları nedeniyle MD'ler mekanik dişliler ile rekabet edememiştir (Hesmondhalgh ve Tipping, 1980; Tsurumoto ve Kikuchi, 1987). Devam eden süreçte, Ackermann ve Hond (1997), Martin'in çalışmasına ek olarak yüzeye montajlı eş eksenli MD tasarlamış ve çelik parçalarının birbirine daha mukavemetli bağlanması ile dişlinin mekanik performansını iyileştirmişlerdir. Mıknaş malzemeleri ve seviyelerinin farklılaşması MD performanslarının büyük ölçüde gelişmesine katkı sağlamıştır. Atallah ve Howe (2001), yeni topolojik yaklaşımla aktarma oranı 5,5 ve dış çapı 140 mm olan bir eş eksenli MD tasarlamışlardır. Bu yeni topolojik yaklaşım yüksek performansı ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Bu çalışmada hesaplanan Hacimsel Tork Yoğunluğu (HTY) değerinin diğer güç aktarma organları ile kıyaslanabilir seviyelerde olması yeni çalışmalarını tetiklemiştir. Atallah ve ark. (2004), akı yoğunluğu denklemlerini türeterek aktarma oranları birbirinden farklı olan eş eksenli MD'ler tasarlamışlardır. Ayrıca, sayısal benzetimler ile mıknaş kutup çifti sayısının tork dalgalanmasına etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında ayrıca 5,75 aktarma oranına sahip bir MD'nin prototipi üretilerek yükleme testleri yapılmış ve çıkış tork değerinin sayısal benzetimle hesaplanan değerden %30 düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılığın üretimden gelen boşluklar ve geometrik uyumsuzluklar gibi nedenlerden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Rasmussen ve ark. (2005), aktarma oranı 5,5 ve dış çapı 160 mm olan bir eş eksenli MD tasarımı geliştirmişlerdir. MD'nin 2 Boyutlu (2B) modeli ile Elektromanyetik Sayısal Analizler (ESA) gerçekleştirilerek 27 Nm çıkış tork değeri hesaplanırken, deneysel testlerin sonucunda en fazla 16 Nm çıkış tork değeri ölçülmüştür. Ayrıca, farklı tiplerde mekanik dişli sistemleri ile MD'ler verimlilik açısından kıyaslanarak MD'nin mekanik dişlilere göre avantajları sunulmuştur. Yukarıda bahsi geçen bulgular ışığında MD üzerine yapılan çalışmaların sayısı özellikle son 20 yılda dikkate değer mertebede artış göstermiştir.

MD'ler çalışma prensiplerine göre eş eksenli (*ing. coaxial*), eksenel (*ing. axial*) ve sikloit (*ing. cycloid*) olarak 3 ana gruba ayrılmaktadır (Bird ve Williams, 2015; Halim ve ark., 2022; Wang ve ark., 2019). MD'lerin yapısında bulunan mıknaşların farklı şekilde yerleşimleri ile bu tip ana gruplar oluşmuştur. Eş eksenli MD'de iç içe geçmiş mıknaşlar dönme eksenini etrafında dönerken, eksenel MD'de mıknaşlar alın altına çalışarak kuvvet aktarımı sağlamakta ve tork iletmektedir. Sikloit MD'de ise iç içe geçmiş mıknaşların eksenleri kaçık şekilde yataklanarak dönüşüne izin verilmiş ve bu sayede 16:1, 32:1 gibi yüksek aktarma oranları elde edilmiştir (Gardner ve ark., 2018). Ana gruplar hariç farklı konfigürasyonlarda da MD kavramsal tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiş ve performansları literatürde sunulmuştur (Mateev ve ark., 2023). Öte yandan, literatür çalışmaları incelendiğinde performans ve uygulanabilirlik açısından en çok incelenen MD tipinin eş eksenli MD'ler olduğu görülmektedir. Eş eksenli MD,

çalışma prensibi açısından incelendiğinde aynı eksen etrafında iç içe dönebilen Dış Rotor (DR), Orta Rotor (OR) ve İç Rotor (İR) olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır (Kim ve ark., 2017; Penzkofer ve Atallah, 2014; Neves ve Filho, 2017). DR ve İR mıknatıs yapısını, OR ise iç ve dış mıknatıslar arası manyetik akı geçişini sağlayan ferromanyetik yapıyı oluşturmaktadır. DR ve İR'de belirli kurallara göre dizilmiş mıknatıs kutup çiftleri manyetik alan oluşturmaktadır. Bu manyetik alan ferromanyetik özellikli OR'de dönüş ekseninde kuvvet oluşturarak tork yüküne dönüştürülmektedir. Böylece, tork aktarımı sırasında İR ile OR arasında tasarlanan aktarma oranına göre açılma hız ve tork değişimi, toplam güç sabit kalacak şekilde yüksek verim ile gerçekleşmektedir (Wang ve ark. 2019; Ruiz-Ponce ve ark., 2023). Eş eksenli MD çalışmalarında genel olarak DR sabitlenirken, İR ve OR'nin iç içe aynı eksende yataklanarak dönüş hareketine izin verilmektedir. Bu şekilde çalışan MD'nin güç aktarımında İR giriş ve OR çıkış olarak tanımlanmaktadır. Bazı çalışmalarda ise OR sabitlenerek İR ve DR'nin dönüşüne izin verilmiş ve güç aktarımı bu şekilde sağlanmıştır (Neves ve Filho, 2017). Li ve Bird (2018), MD ile etkin bir güç aktarımı için mıknatıs kutup çiftlerinin dizilimi, sınıfı, sayısı, tasarım boşlukları ve tork yoğunluğu gibi parametreleri optimize etmişlerdir. Praslicka ve ark. (2021), çeşitli çap ve boylarda MD tasarımları geliştirerek imal etmiş ve performans testleri gerçekleştirmişlerdir. MD için belirlenen aktarma oranına göre DR ve İR'ye uygun sayılarda ve geometrilere mıknatıs kutup çiftleri yerleştirilmekte ve OR, belirlenen mıknatıs kutup çifti sayılarına göre tasarlanan ferromanyetik malzemeli segmentlerden oluşmaktadır (Gardner ve ark., 2019). Mıknatıs kutup çiftlerinin manyetik alan tasarımında dikkate alınması gereken en önemli hususlardan biri malzemenin kimyasal bileşimidir. Uppalapati ve ark. (2014) ferrit, NdFeB ve hibrit kimyasal bileşimli mıknatısların MD'nin performansına etkilerini incelemişler ve deneysel olarak NdFeB ile en yüksek çıkış torku elde etmişlerdir. Bu bağlamda, eş eksenli MD uygulamalarında genellikle NdFeB elementli mıknatıslar tercih edilmektedir (Wong ve ark., 2023; Bird ve Williams, 2015). Diğer yandan, mıknatıs kullanılan uygulamalarda kutup yönlerinin birbirini tamamlaması ve aynı yön döngüsünü bir kere tekrar etmesi kutup çifti olarak adlandırılmaktadır. MD'de kutup çifti sayısı aktarma oranını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. DR ve İR için seçilen kutup çifti sayılarının toplamı OR segment sayısını belirlemektedir. Alosa ve ark. (2022), OR segment sayısının çift tam sayı seçilmesi durumunda radyal kuvvetlerin ve mekanik esnemelerin daha homojen dağıldığını göstermişlerdir. Wong ve ark. (2020) ise mıknatıs kutup çifti sayısının asal sayılardan belirlenmesinin manyetik alanın harmonik etkilerini en aza indirdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Shoaie ve ark. (2024), aktarma oranının tam sayı yerine kesirli sayı olması durumunda MD'de tork salınımı ve gürültülerin azaldığını göstermişlerdir. Benzer şekilde, Todorova ve ark. (2023), farklı aktarma oranlı eş eksenli MD tasarımlarını dikkate alarak performanslarını karşılaştırmış ve kutup çifti sayılarının seçiminin MD performansını ve tork karakteristiğini doğrudan etkilediği sonucuna varmışlardır. Öte yandan, MD'de kullanılan mıknatısların kuzey ve güney kutuplarının dizilim yönlerinin sıralaması manyetik tasarım yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu noktada, manyetik akının doğru yönlendirilmesi için yön tayininin bir döngü içinde yapılması gerekmektedir. Dönüş hareketinde kullanılan mıknatıs yapılarında genel

olarak merkeze ya da dışa doğru Radyal Dizilim (RD) tipi kullanılmaktadır. Manyetik akının kaçmaması için RD mıknatıs dizilim tipi yerine daha sinüsoidal akı geçiş karakteristik özelliğine sahip Halbach Dizilim (HD) metodu da alternatif olarak kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2023). Öte yandan, MD'de, HD'nin RD'ye göre aynı hacim ve geometride yüksek çıkış torku sağlayarak performansı arttırdığı sayısal analizler ile gösterilmiştir (Keleş ve Baykasoğlu, 2022). Diğer yandan, Huang ve ark. (2019) aksenal, eş eksenli ve sikloit MD modellemesinde HD tipli mıknatıs kullanarak etkilerini ESA ile incelemiş ve HD tip tasarımların performansının daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, literatürde HD'de bulunan Teğet Yönlü (TY) mıknatısların hacim olarak fazla olmasının akı yoğunluğunu arttırdığı gösterilmiş ve bu tip dizilim, Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilim (AKHD) olarak adlandırılmıştır. Baninajar ve ark. (2022c), AKHD'nin aktif hacimde HTY'yi arttırdığını ESA ile göstermişlerdir. Som ve ark. (2017), HD mıknatıs tipli MD'nin performansını incelemiş ve AKHD tasarım ile manyetik akı yoğunluğunun ve OR'de tork değerinin arttırılabileceğini göstermişlerdir. Öte yandan, mıknatısların kimyasal yapısı ve manyetizasyon durumu göz önüne alınarak NdFeB mıknatıslar akı yoğunluklarına göre ASTM standartlarında farklı seviyelerde (N35-N52) sınıflandırılmaktadır (Anonim, 2024a). Mıknatıs seviyelerine göre manyetik özellikler dikkate değer ölçüde değişebilmekte ve akı değerleri doğrudan MD performansını etkilemektedir (Park ve ark., 2020). Bu noktada, Tallerico ve ark. (2019a), NASA'da gerçekleştirilen çalışmalarında HD'li MD için farklı seviyelerde mıknatıslar kullanmış ve İR-N52/DR-N52 kullanarak 278 Nm çıkış torku elde ederken, İR-N50/DR-N48 kullanarak 311 Nm çıkış torku elde etmişlerdir. Bu bağlamda, yüksek seviyeli mıknatıslarla daha yüksek tork elde edilmesi beklenirken daha düşük çıkış torku elde edilmiştir. Bu noktada, yüksek seviyeli mıknatıslar birbirlerinin manyetik alanlarını etkileyerek HTY'yi düşürmüştür (Gardner ve ark., 2021). Öte yandan, eş eksenli MD'lerin çalışma prensibi göz önüne alındığında OR'nin ferromanyetik malzeme kullanılarak tasarlanması gerektiği görülmektedir. %Fe alaşım oranı ne kadar yüksek olursa malzeme o kadar ferromanyetik özellik göstermekte ve bu durum performansa olumlu yansımaktadır. Bazı çalışmalarda AISI 1018 malzemedен üretilmiş yekpare OR tasarımları incelenirken (Park ve ark., 2019), bazı çalışmalarda elektrik çeliği saclarının üst üste dizilerek laminasyonlu şekle getirilip bir bütün halinde kullanımları incelenmiştir (Uppalapati ve ark., 2016). Ayrıca, Modaresahmadi ve ark. (2021) eş eksenli MD tasarımında manyetik alan kayıplarını azaltmak için OR'de laminasyonlu elektrik çeliği olan M235 ferromanyetik malzeme kullanmışlardır. Afsari (2021) ise M400-50A laminasyonlu elektrik çeliği malzeme kullanarak OR'nin en iyilenmesini ESA ile gerçekleştirmiştir.

MD'ye eşdeğer güç aktarım mekanizmaları ile karşılaştırılabilecek en önemli performans kriterlerinden biri olan HTY, çıkış tarafından elde edilen tork yükünün, mıknatısların yerleştirildiği aktif hacme oranı olarak tanımlanmaktadır (Li ve ark., 2018). MD'de bu oran ne kadar yüksek olursa, mekanik dişli performanslarına o kadar yakınsanmaktadır. MD'lerde kullanılan mıknatıs kutup çifti sayısı, OR'nin geometrisi ve segment sayısı gibi tasarım parametreleri HTY'yi doğrudan etkilemekte olup bu konuda literatürde çeşitli çalışmalar

gerçekleştirilmiştir. Li ve ark. (2019), dış çapı 92 mm ve aktif boyu 40 mm olan eş eksenli bir MD tasarlayarak 12 farklı OR modeli için 2B ESA gerçekleştirmiş ve ardından HTY'si en yüksek olan OR modeli için prototip üreterek performansını incelemişlerdir. Ayrıca, Uppalapati ve ark. (2014), HTY'si 239 Nm/L olan eş eksenli AKHD tip bir MD tasarımını parametrik bir çalışma ile elde etmiş ve deneysel veriler ile doğrulamışlardır.

MD tasarım çalışmalarında manyetik alanın değişiminin ve tasarım parametrelerinin performansa etkilerinin değerlendirilmesi için sayısal analizlerden sıklıkla faydalanılmaktadır. Literatürde ESA ile 2B elektromanyetik alan ve akı hesaplamaları ve mıknatıs kutup çiftlerinin birbirine uyguladığı itme ve çekme kuvvetlerinin analizi gerçekleştirilmektedir (Filippini, 2023; Kucuk ve Mousavi, 2017; Başaran, 2020). Bu bağlamda, JMAG®, COSMOS® veya ANSYS MAXWELL® gibi yazılımlardan faydalanılarak statik veya dinamik elektromanyetik hesaplama yöntemleri ile analizler gerçekleştirilmektedir. Bu noktada, Todorova ve Marinova (2023), özgün bir eş eksenli MD tasarımında, ANSYS MAXWELL® ile 2B modellenen yapıda farklı tip kutuplu mıknatıslar kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal analiz sonuçlarını birbirleri ile kıyaslayarak elde edilen performans sonuçlarını incelemişlerdir. Diğer yandan, 2B modelleme ile ilk tasarımlarda her zaman istenilen performansa ulaşılması mümkün olmamaktadır. Bu noktada, en iyilenmiş model parametrelerine ulaşılabilmesi için çok sayıda ESA gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, 2B modellerde çeşitli parametreler değişken tanımlanarak yapılan parametrik analizler ile optimum tasarımlara ulaşılabilir. Modaresahmadi ve ark. (2018), en yüksek çıkış tork değerini elde etmek için laminasyonlu elektrik çeliklerinin farklı geometrilerini dikkate alarak parametrik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Praslicka ve ark. (2021), farklı sınıflarda mıknatıslar kullanarak tork yüklerindeki değişimleri incelemişler ve kutup çiftleri dizilim şeklinin farklı durumlarını dikkate alarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Kassab ve ark. (2024), RD'li eş eksenli bir MD modelini dikkate alarak hava boşluklarını ve dış çapı sabit tutup 5 değişken parametre için 2B ESA ile torku en yüksek tasarımı elde etmeye çalışmışlardır. Baninajar ve Bird (2023), akı odaklı HD'li bir MD'yi 2B ESA ile çözümlenerek en iyileme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Wong ve ark. (2022b), özgün HD'li bir MD için performans en iyileme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, İR'nin iç çapı ve DR'nin dış çapı ilk olarak değişkenler olarak belirlenmiş, sonrasında HTY'yi en iyileme çalışmasına mıknatısların kalınlıkları değişken olarak tanımlanıp devam edilerek optimum MD parametreleri elde edilmiştir. Sheshaprasad ve ark. (2023), akı konsantrasyonlu eş eksenli HD'li bir MD tasarımını dikkate alarak, en yüksek HTY için mıknatıs kalınlıklarının yanı sıra OR kalınlıklarını ve boylarını değişken parametreler olarak belirleyerek 2B ESA gerçekleştirmişlerdir. Masoudi ve Afsari (2024), mıknatıs boylarını, mıknatıs açılarını ve OR'de bulunan ferromanyetik segment malzemelerin açısını değişken parametre olarak belirlemiş ve en iyileme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Cansiz ve Akyerden (2019), RD'li bir MD için 2B sayısal model tasarlayarak farklı eksenel boylarda çıkış torkunu ve verimi incelemişlerdir. Bu çalışmada, eksenel boyun verime dikkate değer bir etkisinin olmadığı ama eksenel boy artışının çıkış torkunu pozitif etkilediği gösterilmiştir. Ayrıca, Lee ve

ark. (2020), eş eksenli bir MD tasarımında 2B ve 3B ESA gerçekleştirerek tork yüklerini karşılaştırmış ve hesaplamalar sonucunda 2B ve 3B ESA sonuçlarının mertebeleri farklı olsa da benzer eğilimlerde olduğunu göstermişlerdir. Literatürde 2B ile 3B ESA çözümlerinden elde edilen HTY değerleri karşılaştırıldığında, 3B ESA'dan elde edilen HTY değerlerinin 2B'ye göre yaklaşık %5 - %30 arası düşük çıktığı görülmektedir. Wong ve ark. (2019), eş eksenli bir MD'nin 2B ve 3B sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırmışlar ve sırasıyla HTY'yi 180 Nm/L ve 166 Nm/L olarak elde etmişlerdir. Bu noktada, çözüm zamanının düşürülerek en iyileme çalışmalarının hızlandırılması için parametrik analizlerde 2B ESA avantajlı olmaktadır. Öte yandan, en iyilenmiş 2B tasarım parametrelerin belirlenmesinden sonra eş eksenli yapıya uygun 3B katı model çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Manyetik akıdan etkilenmeyecek %Fe oranı çok az olan yataklama ve destek malzemelerinin kullanılması, kayıpları en aza indirmekte ve alüminyum alaşım malzemeler bu noktada kullanılmaktadır (Tallerico ve ark., 2019b). Tallerico ve ark. (2019c) çalışmalarında, MD'nin eş eksenli şekilde çalışabilmesi için ana kısmın iç içe dönmesi ve aynı ekseninde üç bölümün, biri sabit diğerleri yataklama elemanları ile eksenlenerek birbirini içinde dönebilen 3B tasarım geliştirmişlerdir. Dönüşsel hareket esnasında rotorların birbirlerine sürtünmemesi için İR-OR ve OR-DR arası hava boşluklarının uygun şekilde ayarlanması MD'nin performansı açısından oldukça önemlidir. Bu noktada, imalat teknikleri ve toleranslar dikkate alınarak hava boşlukları tasarlanmalıdır. Tasarım değerlerinin kontrol edilebilmesi için ASME standardından GD&T kullanımı ile boyutsal ölçülerin istenilen aralıkta gelmesi sağlanmaktadır (Anonim, 2024g). Katı model tasarım noktasında düşünülmesi gereken önemli konulardan biri de bütünlenebilir bir tasarımın ortaya konulmasıdır. Modaresahmadi ve ark. (2018) çalışmalarında, montaj esnasında yaşanabilecek olumsuzluklara hazırlık için mıknatısların çekim kuvveti 2B ESA ile hesaplanmış ve el işçiliği ile yapıştırma işlemi yapılamayacak kuvvetlerin ortaya çıkması ve montaj aparatı gibi yardımcı araçlar tasarlanarak bütünlenebilir işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Tallerico ve ark. (2019a), 3B ESA ile aktarma oranı 4:1 olan MD'leri yukarıda bahsi geçen hususları dikkate alarak tasarlamış, prototiplerini üreterek performanslarını test etmiş ve MD ile mekanik dişlilerin performansına ulaşabileceğini göstermişlerdir. Praslicka ve ark. (2021), 50:1 aktarma oranına sahip eş eksenli bir sikloit MD tasarımını 3B ESA ile en iyilenmiş ve bulguları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda eksen kaçıklığı, hava aralığı ve ana boy parametreleri en iyilenerek sayısal olarak 193,8 Nm, deneysel olarak ise 171,8 Nm çıkış tork değeri elde edilmiştir.

MD tasarım parametrelerinin belirlenmesinden sonra sayısal hesaplama yöntemleri uygulanarak tork dalgalanması ve akı yoğunluklarının dağılımları ayrıca incelenmektedir. MD karakteristik yapısı gereği mıknatıs kutup çiftlerinden meydana geldiğinden giriş ve çıkış tork değerinde tork dalgalanması oluşmaktadır. Atallah ve ark. (2004), hazırladığı test düzeneği ile tork dalgalanmasının MD'deki aktarma oranından etkilendiğini göstermişlerdir. Bu noktada, tork dalgalanmasının, aktarma oranı tam sayı olduğunda daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Li ve ark. (2019), kutup çifti sayılarının asal sayı olması durumunda tork

dalgalanmasının daha az olduğunu göstermişlerdir. MD'lerde mıknatısların oluşturduğu manyetik yönlendirmenin ana kaynağı olan manyetik akının yoğunluğu, çalışmalarda sayısal analizler ile irdelenmiştir. Atallah ve ark. (2001), akı yoğunluğunu hesaplamak için İR ile OR arasındaki boşluk ve OR ile DR arası kalan boşluk orta noktalarından sayısal analiz ile 360° veri tarayarak MD'nin kutup çifti sayılarının baskınlığını uzaysal harmonik analiz ile incelenmişlerdir. J. Wang ve ark. (2024), hibrit özgün bir MD tasarımı geliştirerek farklı mıknatıs dizilim tipleri ile akı yoğunluklarını incelemiş ve kaçak akı yönünden karşılaştırmışlardır.

MD bileşenlerine radyal ve teğetsel yönlerde uygulanan kuvvetler ESA ile hesaplanabilmektedir. Bu yükler altında MD tasarımının yapısal davranışı genellikle 3B Sonlu Eleman Analizi (SEA) ile incelenmektedir. Lee ve ark. (2020), ESA'dan kuvvet büyüklük ve yönlerini elde etmiş ve bunları bileşenlere uygulayarak SEA ile MD'nin yapısal davranışını incelemişlerdir. Çalışmada OR'nin yapısal olarak en kritik parça olduğu gözlemlenmiştir. Modaresahmadi ve ark. (2021), MD'de kritik parça olarak görülen OR segment destek parçalarına etkiyen kuvvetleri ESA'dan elde ederek, MD'nin yapısal davranışını incelenmişlerdir. Çalışmada en yüksek yük gelen pozisyon belirlenerek mıknatıslar yerleştirilmiş ve yer değişimleri deneysel olarak ölçülerek sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Sayısal analiz sonuçlarından elde edilen verilerin, deneysel veriler ile karşılaştırılması için gerçek zamanlı test sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada, ilk olarak MD tasarımında belirlenen parametrelerden biri olan aktarma oranı için deneysel doğrulama gerekmektedir. Bu sebeple, aktarma oranının tasarlanan değer ile karşılaştırılması için MD giriş ve çıkış açılal pozisyonları hassas olarak ölçülmelidir. Bu amaçla, MD giriş kısmına elektrik motoru bağlanarak istenilen pozisyona getirilmeli ve çıkış kısmına çözünürlüğü yüksek kodlayıcı yerleştirilerek açı değişimi ölçülmelidir. Bu bağlamda, aktarma oranı giriş kısmının açılal yer değişiminin çıkış kısmına oranı şeklinde hesaplanmaktadır (Dragan ve ark., 2019). MD'nin farklı hız ve tork yükünde performans davranışının incelenmesi için yüklemeli test düzeneği gerekmektedir. MD giriş kısmı için pozisyon kontrolü yapabilen ve tasarım yüklerine çıkabilecek elektrik motoru kullanılmalı, çıkış kısmında ise tasarım tork yüklerine o hızlarda çıkabilecek elektrik motoru bulunmalıdır (Baninajar ve ark., 2022a). Yükleme sisteminde pozisyon kontrolü yapılabilmesi için yüksek çözünürlüklü kodlayıcı ve çıkış kısmında tork kontrolü için hassasiyeti yüksek tork okuyucu bulunmalıdır. Ayrıca, giriş kısmında tork okuyucu olması avantaj sağlamakta ve giriş çıkış tork değerleri elde edilerek sistemin verimi incelenmektedir. Alotto ve ark. (2022), yukarıda bahsi geçen test sistemine benzer bir test düzeneği ile MD'nin performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Wong ve ark. (2019), 5,67 aktarma oranı ve N48 mıknatıs seviyesine sahip HD'li MD tasarımını geliştirmişlerdir. 2B sayısal analizden 188 Nm, 3B'den 160,6 Nm ve deneysel verilerden 147,8 Nm çıkış torku elde etmişlerdir. Deneysel olarak HTY'yi aktif hacimde en yüksek 262 Nm/L, tam hacimde ise 73,2 Nm/L hesaplamışlardır. HTY bakımından 2B ESA ve deneysel sonuçlar arasında %27 oranında

fark olduğu gösterilmiştir. Wong ve ark. (2022b), OR'de geometrik iyileştirmeler yaparak HD'ye sahip bir eş eksenli MD'nin 3B ESA ile HTY değerini 284 Nm/L olarak hesaplamışlardır. Deneysel çalışmaların sonucunda çıkış torkunu 189,5 Nm ve aktif hacme göre HTY değerini ise 279 Nm/L olarak hesaplamışlardır. HTY bakımından 3B ESA ile deneysel sonuçlar arasında sadece %1,79 oranında fark olduğunu göstermişlerdir. Baninajar ve ark. (2022b), 7,67 aktarma oranına sahip, İR'de bir kutup çiftinde 12 mıknatıs olan HD'li MD tasarlamış ve HTY'nin iyileştirilmesi açısından parametrik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yükleme sistemine bağlanan MD'de en yüksek tork 1796 Nm ölçülmüş ve aktif hacimde HTY 221 Nm/L olarak hesaplanmıştır. Sistem, farklı yük ve açısal hızlarda test edilerek verim analizi gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak %95'e yakın verim hesaplanmıştır. Mıknatısların laminasyonlu kullanımının kaçak akıları azalttığı gösterilmiştir. Baninajar ve ark. (2022a), aktarma oranı 63,3 olan 2 kademeli HD'li MD tasarımı gerçekleştirerek kritik bölgelerin kuvvet analizini yapmış ve yapısal davranışlarını incelemişlerdir. İki tarafında elektrik motoru ve tork sensörü bulunan test düzeneğine MD bağlanarak 1200 Nm giriş torkundan 19,3 Nm çıkış torku elde edilmiştir. Ayrıca, farklı hız ve tork değerlerinde MD verim değerlerinin değişimi bu çalışmada incelenmiştir.

MD'nin uygulama alanları incelendiğinde literatürde çoğunlukla enerji alanında çalışmalara rastlanmaktadır (Esnoz-Larraya ve ark., 2017). Havacılık ve savunma sanayi tarafında ise bu tip sistemler yeni yeni uygulama alanları bulmaya başlamıştır. Bu bağlamda, KTS'nin çıkış kısmına MD entegrasyonu ile daha küçük hacimli sistemlerin tasarlanma potansiyeli vardır. KTS'ler farklı güç aktarım mekanizmaları kullanılarak kanatçıklara etkiyen aerodinamik menteşe kuvvetlerine karşı kanatçık hareketini sağlamaktadır. Genelde ters krank biyel türünden mekanizmalar ve bazı patentli ürünler bu sistemlerde kullanılmaktadır (Wingett ve ark., 2009). Hastürk (2015), çalışmasında elektromekanik ters krank biyel mekanizması ve doğrusal hareketi dönüşsel harekete çevirebilen hassas bilya vida kullanmıştır. Bir başka çalışmada, Hastürk (2016), elektromekanik KTS'lerde ters krank biyel ile İskoç boyunduruğu mekanizmalarını karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, ters krank biyel mekanizmasının yük altındaki hareketinin İskoç boyunduruğu mekanizmasına göre daha fazla olduğu, ters krank biyel mekanizmasının sürtünmesinin daha düşük ve veriminin daha yüksek olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Daş ve ark. (2020), KTS için özgün eksantrik bir ters krank biyel mekanizması modelleyerek, kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Benzer bir çalışmada, Frankovský ve Hroncová (2015), herhangi bir ters krank biyel mekanizmasının kinematik analizi için analitik denklemler türetmiştir. Tombul (2016), KTS için gerçek zamanlı kontrol ile elektromekanik Kanatçık Yükleme Cihazı (KYC) tasarımı gerçekleştirmiştir. Tombul (2016), KTS'nin belirlenen uçuş senaryolarında farklı açılardan performansını incelemiştir.

Yukarıda bahsedildiği gibi MD üzerine yapılan çalışmaların sayısı özellikle son yıllarda büyük artış göstermiştir. Öte yandan, hem 2B ve 3B sayısal analizlerle hem de deneysel olarak MD'lere etki eden parametrelerin kapsamlı şekilde incelenip, bu elemanların uygulama bazlı performanslarının ortaya konduğu literatürde oldukça kısıtlı sayıda çalışma mevcuttur. Ayrıca,

MD'lerin KTS gibi hassas mekanizmalarda uygulanabilirliğine yönelik literatürde kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu motivasyonla hazırlanan tez kapsamında, KTS'nin güç aktarım mekanizmalarında kullanılmak üzere yağsız ve sürtünmesiz koşullarda çalışabilen bir güç aktarım elemanı olan eş eksenli MD'ler, 2B ve 3B sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen ESA bulguları dikkate alınarak tasarlanmış, performans kriterlerini en üst seviyede sağlayan tasarımlar imal edilmiş ve gerçekleştirilen deneysel performans testleriyle MD'lerin uygulama açısından potansiyelleri ortaya konmuştur. Bu bağlamda, KTS uygulaması için gereksinim duyulan aktarma oranını ve HTY değerlerini (5-5,5 ve ~230 Nm/L) sağlayabilecek MD tasarımlarının geliştirilmesinde önce uygun kutup çifti ve segment sayıları farklı kombinasyonlar dikkate alınarak belirlenmiştir. Daha sonra, RD, HD ve AKHD olmak üzere üç farklı mıknatis dizilim tipi dikkate alınarak, arzu edilen performans hedeflerini sağlama potansiyeli en yüksek olan mıknatis dizilim tipi, farklı geometrik parametreler değişken olarak tanımlanarak gerçekleştirilen 2B ve 3B ESA ile belirlenmiştir. Ayrıca, ESA sonuçlarına göre belirlenen performans hedeflerini sağlama potansiyeline en yüksek seviyede sahip olduğu tespit edilen AKHD MD tasarımlarında OR malzemesi olarak AISI 1018 ve laminasyonlu elektrik çeliğinin kullanıldığı iki farklı MD versiyonu dikkate alınmış ve bu tasarımların performansları, HTY açısından karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, ESA'dan elde edilen kuvvetler ve MD'nin çalışma prensibine göre mekanik sınır koşulları, sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı kullanılarak AKHD MD tasarımlarına uygulanmış ve gerçekleştirilen yapısal analizlerle MD tasarımlarının mekanik yönden de performansları ortaya konmuştur. Geliştirilen AKHD MD tasarımlarının deneysel olarak da performanslarının ortaya konulması noktasında tasarım bileşenlerinin imalat ve montajları farklı imalat yaklaşımları ve özel olarak geliştirilen yardımcı aparatlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve MD tasarımlarının performansları, tasarlanan gerçek zamanlı yükleme sistemi ile deneysel olarak detaylı şekilde incelenmiştir. Son olarak, geliştirilen MD'ler tipik bir KTS mekanizmasına entegre edilerek, performansları deneysel olarak incelenmiştir. Bu noktada, öncelikle mekanizma kuvvet analizinden elde edilen yükler ve KTS mekanizmasının çalışma prensibine göre sınır koşulları sonlu elemanlar modelleme yaklaşımı kullanılarak tasarımlara uygulanmış ve gerçekleştirilen yapısal analizlerle tasarlanan sistemin emniyetli şekilde yükleri taşıyabileceği gösterilmiştir. Sonrasında, farklı OR versiyonlarının kullanıldığı MD'li KTS tasarımlarının gerçek zamanlı yükleme sistemi ile performansları incelenmiş ve KTS için hedeflenen HTY değerine ulaşıldığı deneysel olarak gösterilmiştir. Hassas pozisyon kodlayıcılar ile gerçekleştirilen deneysel testlerin sonucunda manyetik tork yay sabitleri elde edilmiş ve bulgular sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular bir güç aktarım elemanı olarak MD'lerin KTS ve benzeri uygulamalar özelinde kullanılabilme potansiyeli ile avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuş olup, ilgili alanda tasarımcılara yol gösterici olacaktır.

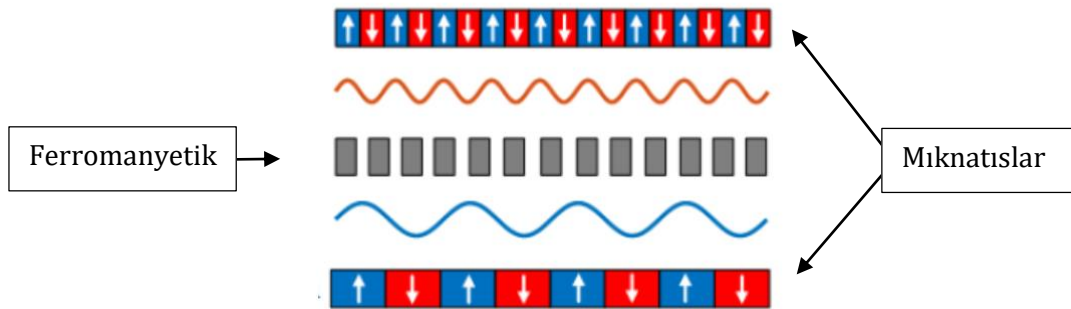
## 1. BÖLÜM

### MANYETİK DİŞLİ TASARIMI

Bu bölümde, güç aktarımı yapabilen sistemlerden biri olan manyetik dişlilerin temel çalışma prensipleri ve KTS'nin güç aktarım mekanizmalarında kullanılmak üzere geliştirilen eş eksenli manyetik dişlinin ana tasarım bileşenlerinin belirlenme aşamaları tartışılmıştır.

#### 1.1. Manyetik Dişlilerin Çalışma Prensibi

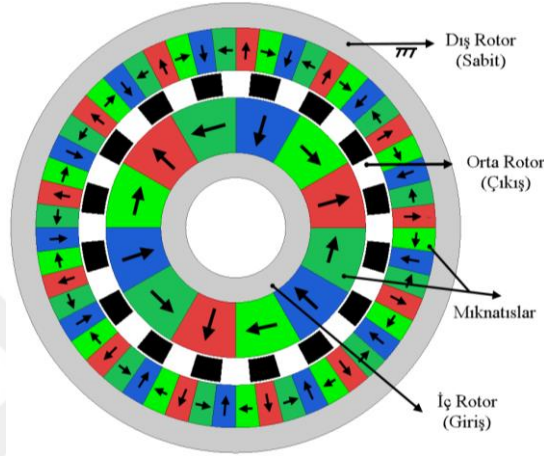
Manyetik Dişli (MD), geometri ve işlevsellik açısından geleneksel mekanik dişlilere benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Mekanik dişlilerde tork, dişlerin fiziksel teması yoluyla iletilirken, manyetik dişlilerde bu iletim, mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik alan etkileşimi aracılığıyla sağlanmaktadır. Manyetik alanın yoğun olduğu bölgelere yerleştirilen ferromanyetik malzemeler, manyetik akıyı yönlendirerek tork aktarımına katkıda bulunmaktadır. Eş eksenli MD sistemlerinde, iç ve dış bölgelere mıknatıslar yerleştirilirken, aradaki ferromanyetik malzeme manyetik akıdan etkilenerek belirli bir aktarma oranında güç iletimini mümkün kılmaktadır. İki farklı şekilde dizilmiş mıknatısların arasına yerleştirilen ferromanyetik malzemenin manyetik alan üzerindeki etkisi, Şekil 1.1'de sembolik olarak gösterilmektedir. MD manyetik özellikleri, mıknatısların kutup sayısı ve yönlerine bağlı olarak değişmekte olup, bu parametreler tork iletimi sürecinde önemli farklılıklar yaratmaktadır.



**Şekil 1.1.** Mıknatıs diziliminin manyetik alan üzerindeki etkisinin temsili bir gösterimi

Eş eksenli MD, İç Rotor (İR), Dış Rotor (DR) ve Orta Rotor (OR) olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bu sistemler, iç içe yerleştirilmiş ve ortak bir merkez eksenli etrafında dönebilen mekanizmalar şeklinde tasarlanmaktadır. DR, dış mıknatısların yerleştirildiği bölgeyi; İR, iç mıknatısların konumlandırıldığı bölgeyi; OR ise ferromanyetik segmentlerin bulunduğu bileşeni ifade etmektedir (Şekil 1.2). Eş eksenli MD'nin işlevsel olarak çalışabilmesi için üç rotordan birinin sabitlenmesi gerekmektedir. Güç aktarma sistemlerinin temel amaçlarından

biri, düşük tork ve yüksek hızla dönen bir sistemin hızını düşürerek tork kapasitesini artırmaktır. Bu bağlamda, İR genellikle düşük tork ve yüksek hız gerektiren giriş kademesine bağlanmaktadır. Aktarma oranı ve çıkış torku, OR veya DR'nin sabitlenmesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Özellikle DR sabitlendiğinde, OR'den elde edilen tork yükü daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle, bu tez kapsamında yürütülen tasarım çalışmalarında DR'nin sabitlendiği yapı tercih edilmiştir.



Şekil 1.2. Manyetik dişli ana bölümleri

Eş eksenli MD tasarımında, mıknatısların kutup sayısı ile ferromanyetik segment sayısı arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Mıknatis kutup çifti sayısının aktarma oranı ile olan ilişkisi Denklem 1.1-1.6'da ifade edilmiştir. Ayrıca, tork ve hız ile olan ilişki dikkate alınarak Denklem 1.7'de eş eksenli MD'ye ait genel matematiksel ifadeler sunulmuştur.

$$n_2 = p_1 + p_3 \quad (1.1)$$

$$\omega_2 n_2 = \omega_1 p_1 + \omega_3 p_3 \quad (1.2)$$

$$T_1 \omega_1 + T_2 \omega_2 + T_3 \omega_3 = 0 \quad (1.3)$$

$$\omega_1 = \frac{n_2}{p_1} \omega_2 \quad (1.4)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2}{p_1} = G_{12} \quad (1.5)$$

$$T_1 \omega_1 = -T_2 \omega_2 \quad (1.6)$$

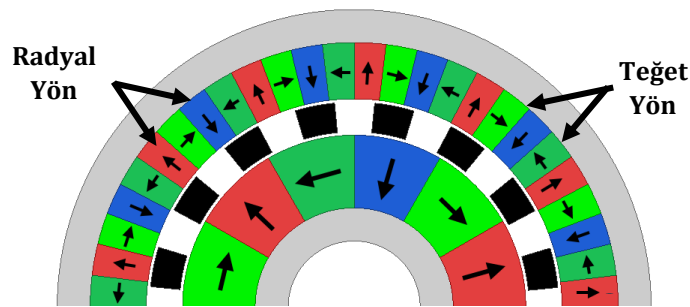
$$\frac{T_2}{T_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{n_2}{p_1} = -G_{12} \quad (1.7)$$

Burada,  $n_2$ , OR'de bulunan ferromanyetik sayısı;  $p_1$ , İR'de bulunan mıknatısların kutup çifti sayısı ve  $p_3$ , DR'de bulunan mıknatısların kutup çifti sayısıdır. Ayrıca,  $T_1$ , İR tork değeri;  $T_2$ , OR tork değeri;  $\omega_1$ , İR açısal hız;  $\omega_2$ , OR açısal hız ve  $G_{12}$ , aktarma oranıdır. DR sabit olduğunda  $\omega_3 = 0$  olmaktadır. Bu bağlamda, Denklem 1.1 ve Denklem 1.2 sadeleştirilerek, aktarma oranı, hız veya tork değerlerinin oranları şeklinde tanımlanmaktadır. Eş eksenli MD için sürtünme ve manyetik kayıplar ihmal edildiğinde, aktarma oranı Denklem 1.7'de verilen ifade kullanılarak hesaplanmaktadır. Aktarma oranının negatif (-) işaretli olması, OR ve İR dönüş yönlerinin birbirine göre ters olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, OR ve İR'nin merkez eksen etrafında dönecek şekilde tasarlandığı ve DR'nin sabit tutulduğu bir MD konfigürasyonu oluşturulmuştur. MD'nin performans değerlendirmesinde önemli bir kriter olan HTY değeri, çıkış torkunun ( $T_2$ ) aktif hacme oranı olarak tanımlanmakta olup, Denklem 1.8'de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır (Som ve ark., 2017).

$$HTY = \frac{T_2}{\pi R_o^2 l} \quad (1.8)$$

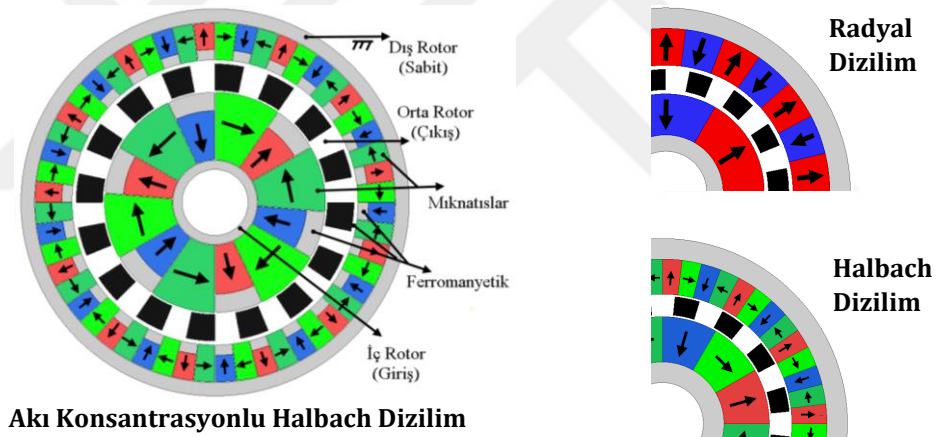
Burada,  $R_o$ , aktif hacmin dış yarıçap ölçüsü ve  $l$ , aktif hacmin boyudur. Eş eksenli MD tasarımında, DR ve İR'de, belirli hesaplamalar sonucunda elde edilen kutup çifti sayıları göz önünde bulundurularak özel geometrik yapılara sahip mıknatıslar yerleştirilmektedir. OR bölgesine ise, tasarım sürecinde belirlenen sayıda ferromanyetik malzemeden üretilmiş, özel geometriye sahip segmentler yerleştirilmektedir. Bu konfigürasyonda, DR sabit tutulurken, OR ve İR'nin dönmesine izin verecek şekilde mekanik yataklama sağlanmaktadır. Bu tip bir MD tasarımının güç aktarımında, İR giriş, OR ise çıkış roturu olacak şekilde belirlenmiştir.

Mıknatısların kutup yönleri, manyetik alanın yönüne bağlı olarak farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Eş eksenli MD sistemlerinde, mıknatısların dizilimi, tork aktarımı açısından kritik bir öneme sahiptir. Şekil 1.3'te gösterildiği üzere, manyetik alan yönü dönme eksenine dik olan mıknatıslar Radyal Yönlü (RY), dönme eksenine teğet manyetik alan oluşturan mıknatıslar ise Teğet Yönlü (TY) olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1.3. Mıknatis manyetizma yönlerinin gösterimi

Mıknatısların dizilim şekilleri, eş eksenli MD performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, farklı dizilim tipleri bulunmaktadır: Radyal Dizilim (RD), Halbach Dizilim (HD) ve Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilim (AKHD). RD tipinde, yalnızca RY mıknatıs kutup çiftleri yer almaktadır. HD tipinde, RY ve TY mıknatıslar aynı hacimde bir arada kullanılarak manyetik alan yönlendirilmekte ve güç yoğunluğu artırılmaktadır. TY yönelimi, MD'nin HTY değerini artırıcı bir etkiye sahip olduğundan, RY'ye kıyasla hacim değişimi sağlayarak manyetik akıyı daha verimli bir şekilde yoğunlaştırmakta ve tork aktarım kapasitesini iyileştirmektedir. Bu optimizasyon yaklaşımıyla birlikte, akı yoğunluğunun daha etkin bir şekilde yönlendirilmesini sağlayan AKHD tipinde MD geliştirilmiştir. AKHD tipinde, mıknatıs dizilimi sayesinde manyetik akı kaybı minimize edilerek manyetik alanın belirli bölgelere yönlendirilmesi sağlanmakta, böylece tork iletim verimi artırılmakta ve MD'nin genel performansı iyileştirilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, AKHD tipinin, geleneksel HD'ye kıyasla daha yüksek tork yoğunluğu ve daha düşük kayıplar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, AKHD tip MD'ler yüksek tork gereksinimi duyulan uygulamalar için önemli bir alternatif sunmaktadır. Mıknatıs dizilimlerine bağlı olarak eş eksenli MD tipleri Şekil 1.4'te sunulmuştur.

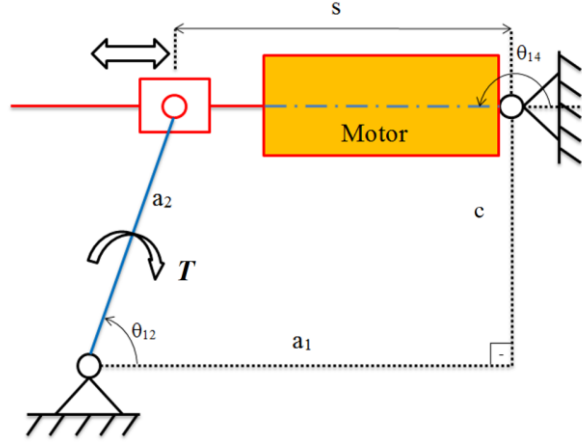


Şekil 1.4. Mıknatıs dizilim durumlarına göre MD tipleri

## 1.2. Kavramsal Tasarım

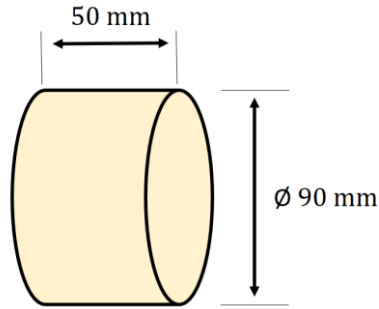
Bu tez kapsamında füze ve mühimmatlarda yönelimi gerçekleştiren elektromekanik Kanatçık Tahrik Sistemi (KTS) için belirlenen performans kriterlerini karşılayabilecek bir MD tasarımının ortaya konması hedeflenmiştir. MD kullanımı sayesinde daha düşük güç gereksinimine sahip bir KTS çözümünün sunulması amaçlanmıştır. MD tasarım hedefleri, genel sistem gereksinimlerini karşılayacak şekilde belirlenmiş olup, performans kriterleri ortalama bir KTS referans alınarak değerlendirilmiştir. Konvansiyonel KTS sistemlerinde genellikle ters krank-biyel tipi mekanizmalar kullanılarak motor gücü artırılmakta ve sistem, tanımlanan görevlerini yerine getirmektedir. Bununla birlikte, farklı aktarma elemanlarının entegre edilmesiyle, daha küçük motorlar kullanılabilen, böylece hacimden tasarruf sağlanarak

maliyetler düşürülebilmektedir. Şekil 1.5'te tipik bir KTS mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir. KTS çıkış mekanizmasına entegre edilecek bir MD ile, daha kompakt motor ve aktarma elemanlarının kullanımı mümkün hale gelmekte ve sistem verimliliği artırılmaktadır.



**Şekil 1.5.** Ters krank biyel mekanizması gösterimi (Keleş and Baykasoğlu 2020)

KTS'nin mühimmat içerisindeki hacmi analiz edilerek, MD entegrasyonu için ayrılan hacim sınırlandırılmıştır. Şekil 1.6'da gösterildiği üzere, bağlantı noktaları dikkate alınmaksızın, MD'nin dış çapı 90 mm ve yataklama elemanları hariç aktif boyu 50 mm olarak belirlenmiştir.



**Şekil 1.6.** MD için sınırlandırılan aktif hacim

KTS mekanizmasının çıkış tarafından elde edilmesi hedeflenen tork ( $T$ ) değeri  $60 < T_2 < 75$  Nm arasındadır. Mekanizma çıkışından elde edilebilecek tork değerine göre yaklaşık  $G_{12}$ , aktarma oranı  $5 < G_{12} < 5,5$  arasında belirlenmiştir. Sonuç olarak, Tablo 1.1'de verilen değerler, MD'nin ön tasarımı için temel giriş verileri olarak dikkate alınmıştır.

**Tablo 1.1.** Performans hedef kriterleri

Parametre	Değer	Birim
Dış çap	90	mm
Aktarma Oranı ( $G_{12}$ )	$5 < G_{12} < 5,5$	-
Çıkış Torku ( $T_2$ )	$65 < T_2 < 75$	Nm
Aktif Boy ( $l$ )	50	mm

### 1.3. Kutup Çifti Seçimi

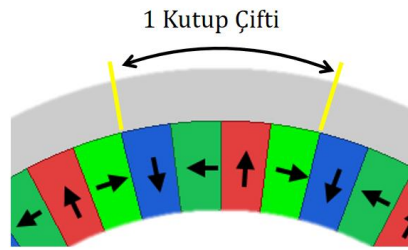
MD tasarımında, hedeflenen tasarım parametrelerine ulaşılabilmesi için aktarma oranı öncelikli belirlenmesi gereken kriterlerden biridir. Amaçlanan aktarma oranını sağlayabilecek  $p_1$ ,  $n_2$  ve  $p_3$  parametrelerinin belirlenmesi amacıyla farklı tasarım kombinasyonları oluşturulmuştur. Tablo 1.2’de, Denklem 1.1’e göre çeşitli parametreler için elde edilen aktarma oranları sunulmuştur.

**Tablo 1.2.** Çeşitli kutup çifti ve ferromanyetik sayıları için elde edilen aktarma oranları

$p_1$	$n_2$	$p_3$	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	6,67	<u>22</u>	
	10	8	5	4		21	18	7	23	
	11	9	5,5	5		22	19	7,33	<u>24</u>	
	12	10	6	6		26	23	8,67	<u>25</u>	
	13	11	6,5	7		32	29	10,67	<u>26</u>	
	14	12	7	8		4	9	5	2,25	27
	15	13	7,5	9			11	7	2,75	28
	8	5	2,67	<u>10</u>			15	11	3,5	29
	9	6	3	11			17	13	4,25	30
	10	7	3,33	<u>12</u>			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	4,67	<u>16</u>	25	21		6,25	35		
15	12	5	17	26	22		6,5	36		
16	13	5,33	<u>18</u>	27	23		6,75	37		
17	14	5,67	19							

MD uygulamalarında arzu edilen aktarma oranını 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 sayısı  $n_2$ , çift sayı seçildiğinde RY’li kuvvetlerin daha

homojen dağıldığı ve mekanik esnemelerin en aza indirildiği gösterilmiştir (Wong ve ark., 2020).  $n_2$  sayısının çift olduğu tasarım parametreleri Tablo 1.2’de kırmızı ile gösterilmiştir. Ayrıca, armonik etkilerin en aza indirilmesi noktasında  $p_1$  ve  $p_3$  kutup çifti sayılarının asal sayı kullanılmasının pozitif etkisi çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Wong ve ark., 2020). Tablo 1.2’de asal sayı olanlar açık yeşil renk ile belirtilmiştir. Bu iki kriteri aynı anda sağlayan tasarımlar ayrıca Tablo 1.2’de açık mavi renkli olarak belirtilmiştir. Çeşitli çalışmalarda da (Wong ve ark., 2020), aktarma oranının kesirli sayı olması durumunda gürültülerin ve oluşan tork dalgalanmalarının azaldığı gösterilmiştir. Bu kriterleri sağlayan tasarımlar (10, 12, 16, 18, 22, 24, 25 ve 26 no.lu) Tablo 1.2’de koyu renkli olarak belirtilmiştir. Bu bağlamda, sadece  $p_1$  kutup çifti sayısı 3 olan tasarımların isterleri sağladığı Tablo 1.2’den görülmektedir. Tablo 1.1’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 ve 13 olan 18 no.lu tasarım, ön tasarım olarak belirlenmiştir. Belirlenen DR mıknaatıs kutup çifti sayısının gösterimi Şekil 1.7’de sunulmuştur.



**Şekil 1.7.** Kutup çiftinin gösterimi

Aktif boy ve dış yarıçap kısıtları dikkate alınarak belirlenen MD ön tasarım parametreleri sonraki bölümde tartışılacak olup, Tablo 2.1’de sunulmuştur. MD’nin iç içe dönen yapısı nedeniyle bileşenlerin birbirine temas etmemesi gerekmektedir. Özellikle, HTY değeri yüksek olan literatür çalışmalarında, rotorlar arası dönme boşluğu olarak adlandırılan hava aralığının minimum seviyede tutulmasıyla, yüksek tork çıktılar elde edilerek performansın artırılması amaçlanmıştır (Uppalapati ve ark., 2017). Bu tasarımda, hava aralığı değeri, literatür çalışmaları incelenerek ve geometrik üretilebilirlik dikkate alınarak ilk aşamada 0,5 mm seçilmiştir (Kassab ve ark., 2024). Ayrıca, mıknaatıs malzemesi seçiminde ilk aşamada literatürde yaygın olarak kullanılan ve yaklaşık 1,24 T akı yoğunluğuna sahip N42 kalite grubu tercih edilmiş olup, ilgili parametreler Tablo 2.1’de sunulmuştur.

## 2. BÖLÜM

### ELEKTROMANYETİK SAYISAL ANALİZ ve TASARIM

Bu bölümde eş eksenli MD tasarımının elektromanyetik sayısal analiz ile geliştirilmesi aşamaları tartışılmıştır. Yapılan çalışmalar kısaca özetlenecek olursa, ilk olarak MD için belirlenen tasarım parametreleri kullanılarak ANSYS Electromagnetics Suite 17.2® yazılımı ile 2B Sonlu Elemanlar Modelleri (SEM) oluşturulmuştur. Üç farklı dizilim tipi karşılaştırılarak hedeflenen tasarıma en uygun model seçilmiş ve değişken parametreler belirlenerek ESA ile en yüksek HTY değerine ulaşılması amaçlanmıştır. Ardından imalat esnasında dikkat edilecek parametreler tanımlanarak tasarıma girdi sağlanmış ve performansları incelenmiştir. 3B katı model ile ilk olarak ön 3B ESA gerçekleştirilmiş, sonrasında üretilebilirlik açısından optimize edilmiş 3B katı modeller tasarlanarak performans etkileri incelenmiş ve hedeflenen isterleri sağlayan tasarım belirlenmiştir. ESA çözümlerinden elde edilen kuvvetler dikkate alınarak 3B MD bileşenlerinin yapısal davranışları, tasarımın farklı versiyonları ( $V_1$  ve  $V_2$ ) için analiz edilmiş ve elde edilen bulgular tartışılmıştır.

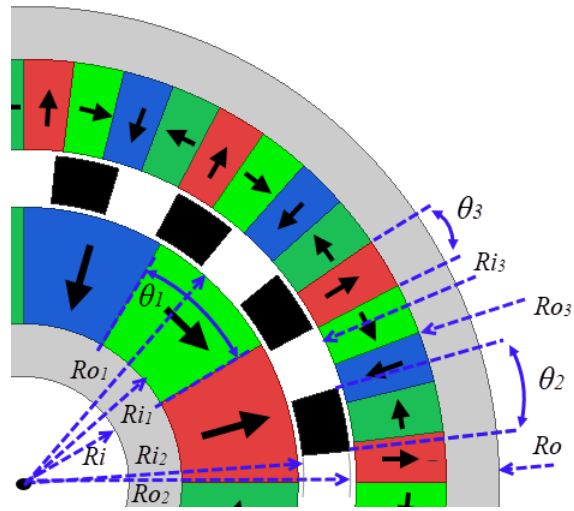
#### 2.1. Elektromanyetik Sayısal Analiz

Manyetik alan değişimleri zamana bağlı olarak analitik analiz yöntemleri ile hesaplanabilmektedir. Ancak, modelde bulunan tüm geometrik unsurlar analitik yöntemlerle tam olarak ifade edilemediğinden, SEM kullanılarak ESA ile çözümlenmesi tercih edilmektedir. Özellikle karmaşık geometrik sistemlerde SEM ile oluşturulan ağ yapısı sayesinde, manyetik alan değişimleri sayısal çözümlerle daha hassas ve hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Karmaşık geometri modellerin tanımlanması, gerçeğe en yakın etkilerin sayısal analizlerde detaylı şekilde incelenmesine olanak tanımakta ve parametrik model çalışmalarının sonuçlarına hızlı yakınsama sağlamaktadır. SEM tabanlı ESA analizleri çeşitli yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, ANSYS Electromagnetics Suite 17.2® yazılımı kullanılmış olup, statik durumların analizi için magnetostatik modül, zamana bağlı değişimlerin incelenmesi için ise transient modül uygulanmıştır (Anonim, 2024d). 2B analizlerde her iki modülde çözümlenmesi gerçekleştirilmiş, ancak 3B analizlerde yalnızca magnetostatik modül tercih edilmiştir. Çözüm süresini optimize edebilmek amacıyla, parametrik analizlerde 2B analizler tercih edilmiştir. MD tasarım modelinde, Tablo 2.1'de belirtilen değerler başlangıç parametreleri olarak kabul edilmiştir. 2B model geometrisi oluşturulurken, bu tasarım parametreleri temel alınmış ve malzeme detayları da aynı tabloya göre seçilmiştir. Tasarımda iki tip OR malzemesi kullanılmış olup, en iyileme çalışmalarında Tablo 2.1'de belirtilmiş birinci tip ( $V_1$ ) olan 1018 malzemesi tercih edilmiştir. Özellikle mıknatıs yönleri, farklı dizilim tiplerine uygun olacak şekilde tanımlanmıştır. Gerçek çalışma koşullarında hava olarak tanımlanan bölgeler, sayısal analiz sürecinde vakumlu bölge olarak modellenmiştir. HD tip MD için 2B model tasarım parametreleri, Tablo 2.1'de belirtilen

değerlere göre belirlenmiş olup, bu parametrelerin parametrik değişkenler olarak tanımlanmış hali Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Mıknatıs yönleri, MD dizilim tipine göre belirlenmiş ve ilk analizlerde mıknatıs seviyesi, N42 sınıfına uygun olarak 1,24 T manyetik akı yoğunluğu seviyesinde belirlenmiştir. Mıknatısın manyetik özellikleri, Arnold Magnet firmasının +20°C ortam sıcaklığında çalışan SH tipi ürününe göre alınmıştır.

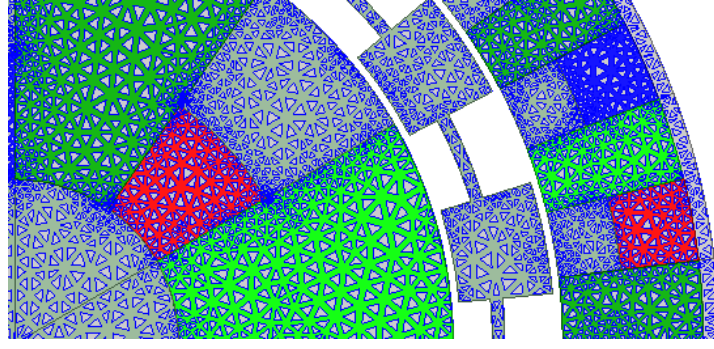
**Tablo 2.1.** Tasarım parametreleri

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim		
<b>İR</b>	$Ri_1$	14	mm	<b>DR</b>	$Ri_3$	31	mm
	$Ro_1$	24	mm		$Ro_3$	40	mm
	$p_1$	3	-		$p_3$	13	-
	$\theta_1$	$180/(2p_1)$	°		$\theta_3$	$180/(2p_3)$	°
	$C_i$	0,5	mm		$C_R$	0,5	mm
	Malzeme <sub>i</sub>	1018	-		Malzeme <sub>R</sub>	1018	-
<b>OR</b>	$Ri_2$	24,5	mm	<b>Diğer</b>	NdFeB	1,24 (N42)	T
	$Ro_2$	29,5	mm		$Ri$	10	mm
	$n_2$	16	-		$Ro$	45	mm
	$\theta_2$	$180/(n_2)$	°		$l$	50	mm
	Malz. V <sub>1</sub>	1018	-		$a$	0	mm
	Malz. V <sub>2</sub>	M235-35A	-		$b$	0	mm



**Şekil 2.1.** HD tip manyetik dişli parametreleri

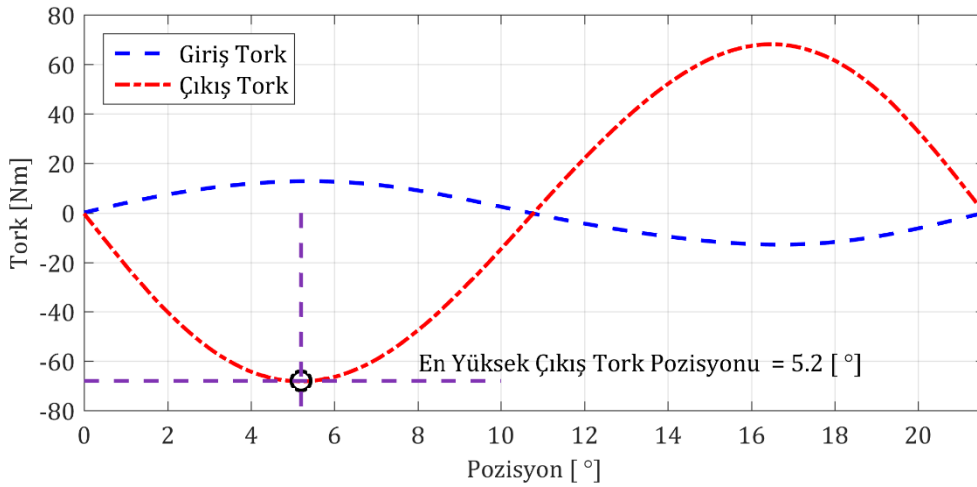
Ağ yapısının oluşturulma sürecinde, yakınsama testi uygulanarak doğruluk ve çözüm süresinin optimizasyonu sağlanmıştır. Bu süreçte, üçgen tipli sonlu elemanlar kullanılarak en uygun çözüm ağı belirlenmiştir. Sonuç olarak, Şekil 2.2’de gösterilen ağ yapısı oluşturulmuş ve çözümleme aşamasında bu yapı temel alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.2. MD ESA için genel ağ yapısı

SEM eleman boyutunun belirlenmesinde, çözümlene süresi ve tekrarlanabilirlik kriterleri göz önünde bulundurularak, 2B analizlerde eleman boyutu 1 mm, 3B analizlerde ise 2 mm olarak kabul edilmiştir. 2B modelde, toplamda 55.864 elemandan oluşan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Analiz sürecinde, İR giriş, OR çıkış olarak tanımlanmış ve tork hesaplamaları bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. DR ise hareketsiz kabul edilerek sabit bir bileşen olarak modellenmiştir.

MD'nin ana yapısı, iç içe dönen sistemlerden oluşmakta olup, mekanik pozisyonu tork yüküne bağlı olarak değişim göstermektedir. MD tasarımında en yüksek HTY değerini sayısal olarak hesaplayabilmek için, DR sabit tutulurken, İR ve OR'nin birbirine göre en uygun mekanik pozisyona getirilmesi gerekmektedir. En yüksek HTY pozisyonunun belirlenmesi amacıyla, transient analizde İR durağan kabul edilerek OR'ye hareket atanmış ve açı değişimlerine bağlı olarak en yüksek ve en düşük tork açıları belirlenmiştir. Şekil 2.3'te, HD-1 tip MD için giriş ve çıkış tork değerlerinin açığa bağlı değişimi gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, başlangıç pozisyonundan  $5,2^\circ$  dönüş yönünde ötelenerek statik analiz için optimum çözüm açısı belirlenmiş ve statik ESA çözümleri bu açığa göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3. HD MD tasarımı için en yüksek çıkış tork pozisyonu

## 2.2. Parametrik Çalışma

Tasarım geliştirme çalışmaları kapsamında ilk olarak RD, HD ve AKHD olmak üzere üç farklı eş eksenli MD mıknatis dizilim modeli belirlenmiştir. İlk olarak, RD mıknatis dizilim konfigürasyonu tanımlanmış, ardından geometrik parametreler değişken olarak atanmış ve ESA gerçekleştirilmiştir. Belirlenen hacimde en yüksek HTY elde edebilmek amacıyla Şekil 2.4'te gösterilen akış şeması takip edilmiştir. Bu süreçte, başlangıç tasarım parametreleri kullanılarak RD ile HD modelleri karşılaştırılmış, ardından HD dizilimi üzerinde parametrik analizler gerçekleştirilerek optimize edilmiş HTY değerine ulaşılmıştır. Üretilebilir bir model elde etmek amacıyla, OR segmentleri arasına destek yapıları eklenmiş ve bu değişikliğin performansa etkisi incelenmiştir. HTY değerini artırmak için HD modelinin daha gelişmiş bir versiyonu olan AKHD modelinin performansı değerlendirilmiştir. Hedeflenen HTY değerine ulaşamaması durumunda, farklı mıknatis seviyelerinde ek analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçları incelenmiştir. AKHD'nin tork yönünde manyetik akıyı artırması sayesinde HTY değeri üst seviyelere çıkarılmıştır. Sonuç olarak, AKHD modelinin parametreleri değişken olarak analiz edilmiş ve optimize edilmiş parametrik model elde edilmiştir. Hava aralığı değerlerinin performansa etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve nihai parametrik tasarım doğrultusunda üretilebilir bir model oluşturulmuştur. Üretim boşlukları tanımlanarak 2B ESA gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.



Şekil 2.4. Tasarım gelişimi ana akış şeması

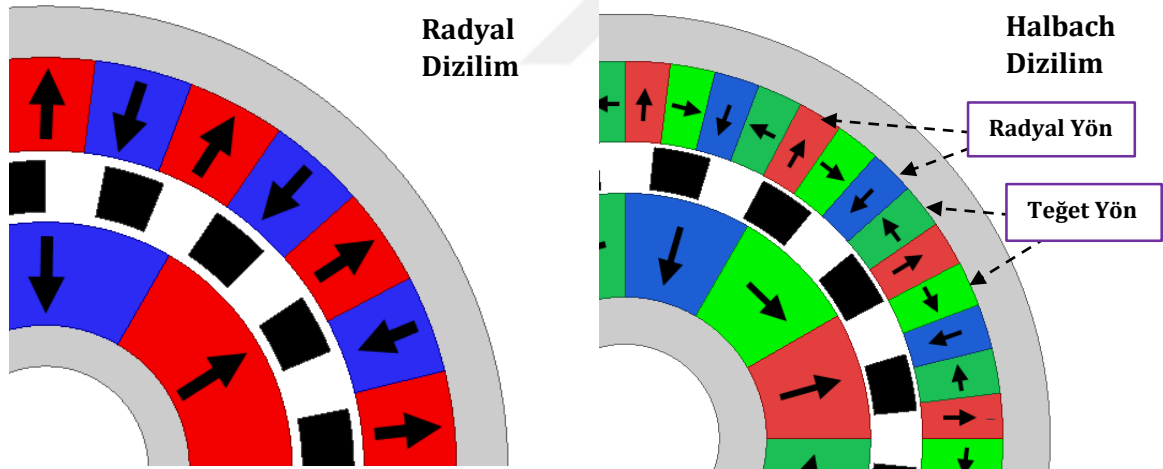
Üretilen MD modelinin hedeflenen HTY değerine ulaşabilmesi için literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, ESA analizleri ile deneysel veriler arasında belirli bir fark olduğu tespit edilmiştir. Som ve ark. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, 2B analizler ile deneysel veriler arasında yaklaşık %31 oranında bir sapma olduğu gösterilmiştir. Bu farkın, ESA modellerinde

gerçek çalışma koşullarının tam olarak yansıtılmamasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Literatürdeki araştırmalar doğrultusunda, Tablo 1.1'de belirtilen hedef HTY değerine ulaşabilmek için 2B ve 3B analizlerden elde edilen yaklaşık değerler Tablo 2.2'de sunulmuş olup, parametrik iyileştirmelerde bu hedef değerler esas alınmıştır (Wong ve ark., 2019).

**Tablo 2.2.** Hedeflenen HTY değerleri

Parametre	Hedef Değer	2B Hedef Değer	3B Hedef Değer	Birim
Çıkış Tork	~65-75	~93-98	~78-83	Nm
HTY	~230	~300	~250	Nm/L

Tablo 2.1'de belirtilen tasarım parametrelerine göre oluşturulan 2B eş eksenli MD modelinin ilk analizlerinde, RD ve HD tipleri Şekil 2.5'te gösterildiği gibi ayrı değerlendirilerek ilk ESA sonuçları elde edilmiştir. Mıknatis yönleri (RY ve TY) dikkate alınarak, Şekil 2.5'te belirtilen ok yönlerine göre manyetik alan çizgileri oluşturulmuş ve ESA analizleri için model hazırlanmıştır.



**Şekil 2.5.** RD ve HD tip MD tasarım şemaları

OR, en yüksek tork çıktısının elde edilebileceği mekanik pozisyona getirilerek RD ve HD tipleri için ilk sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. OR'den ölçülen en yüksek tork değerleri ve buna bağlı olarak Denklem 1.8 kullanılarak hesaplanan HTY değerleri Tablo 2.3'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar HD tipinin RD'ye kıyasla %59 oranında daha yüksek HTY değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, tasarım parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik sonraki çalışmalarda HD tipli mıknatis dizilimi tercih edilmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen sayısal çözümleme sonucunda giriş ve çıkış torkları arasındaki aktarma oranları hesaplanmış olup,

Tablo 2.3'te gösterildiği üzere, hedeflenen kriterlerin sağlandığı ve seçilen mıknatıs kutup çifti ile segment sayılarının tasarım ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 2.3.** RD ve HD tip MD tasarımı için sayısal analiz sonuçları

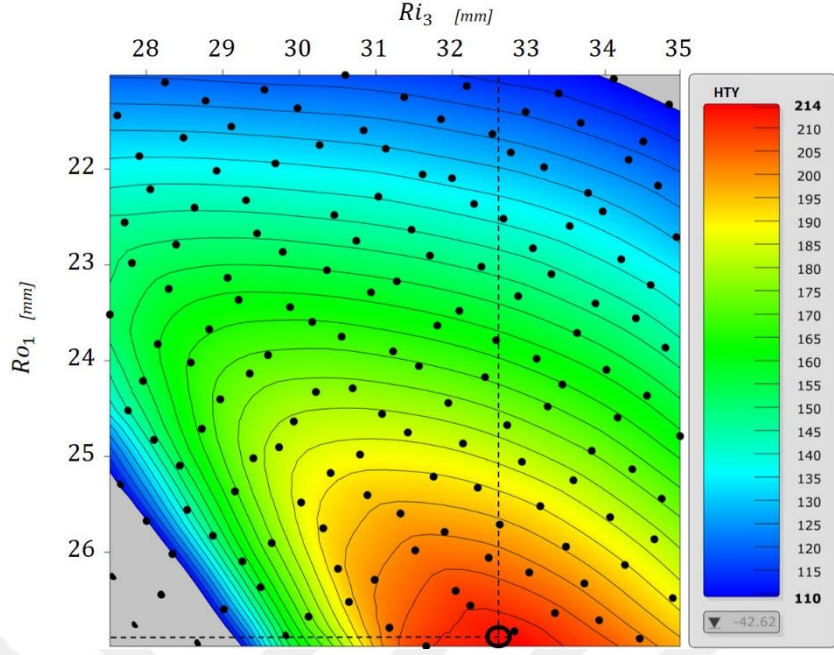
Parametre	Tasarım		Birim
	RD	HD-1	
Giriş Tork	6,45	10,2	Nm
Çıkış Tork	-34,2	-54,5	Nm
Aktarma Oranı	~5,3	~5,34	-
HTY	107,5	171,3	Nm/L

HD tip MD tasarımı üzerinde gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları kapsamında, OR'nin dış ve iç çapını etkileyen  $Ro_1$ , İR'nin dış yarıçap ve  $Ri_3$ , DR'nin iç yarıçap parametreleri değişken olarak belirlenmiştir. Tablo 2.4'te tanımlanan değer aralıklarına göre bu parametrelerin HTY performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

**Tablo 2.4.** HD MD tasarımı için değişken parametreler

Parametre	Değer Aralığı	Birim
İR, $Ro_1$	$21 \leq Ro_1 \leq 27$	mm
DR, $Ri_3$	$27,5 \leq Ri_3 \leq 35$	mm

Tablo 2.4'te belirtilen parametrelerin değer aralıkları içinde farklı kombinasyonlar dikkate alınarak oluşturulan modellerle toplam 450 farklı sayısal analiz çözümü elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 2.6'da sunulmuştur.



**Şekil 2.6.** HD MD tasarımı için  $R_{i3}$  ve  $R_{o1}$  parametre değerlerinin HTY'ye etkisi.

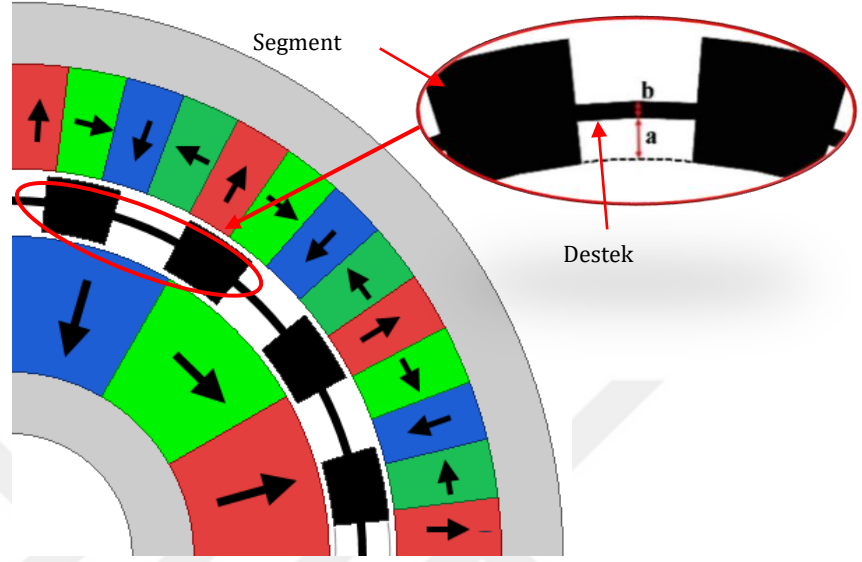
Şekil 2.6'da yer alan veriler dikkate alınarak bu değişken parametreler için optimum değerler tahmin edilmiştir. Bu parametreler sayısal analiz modeline giriş parametreleri olarak tanımlanmış ve yeniden çözüm elde edilmiştir. Tahmin edilen değer ile hesaplanan değer %99,5 oranında uyumlu olduğu görülmüştür. Bu noktada, optimum değerler  $R_{o1}=27$  mm ve  $R_{i3}=32,65$  mm olarak belirlenmiş ve bu değerler ile 214,3 Nm/L'lik HTY ve 5,33 aktarma oranına sahip eş eksenli HD'li MD tasarımı elde edilmiştir. Eş eksenli MD tasarım çalışmaları çerçevesinde RD, HD ve HD-2 tasarımlarına ilişkin elde edilen bulgular, Tablo 2.5'te özet olarak sunulmuştur. HD-2 tasarımı ile HTY değerinde %23,65'lik bir artış gözlemlenmiştir.

**Tablo 2.5.** Ara tasarım performanslarının karşılaştırması

Parametre	Tasarım			Birim
	<b>RD</b>	<b>HD-1</b>	<b>HD-2</b>	
Giriş Tork	6,45	10,2	12,72	Nm
Çıkış Tork	-34,2	-54,5	-68,16	Nm
Aktarma Oranı	~5,3	~5,34	~5,35	-
HTY	107,5	171,3	214,3	Nm/L

Tasarımın sonraki aşamasında, OR segmentlerinde yapısal bütünlüğü sağlayacak daha önceki analizlerde etkisi ihmal edilen ferromanyetik malzemeden destekler tasarlanmıştır (Şekil 2.7). OR segmentlerinin birleşimi için kalınlık ( $b$ ) ve konum ( $a$ ) parametreleri, değişken tasarım

parametreleri olarak tanımlanmış ve bu parametrelerin performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.



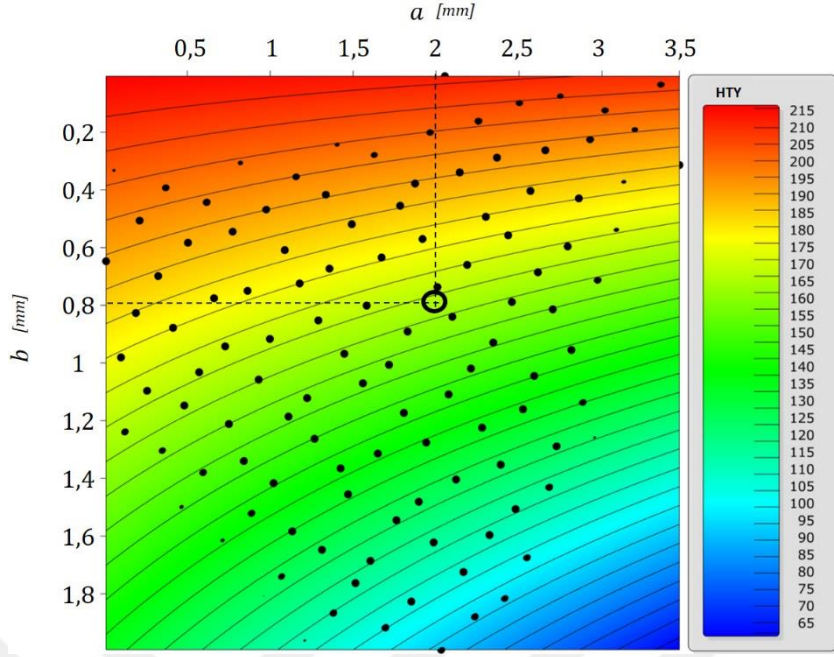
Şekil 2.7. OR segment tasarım parametreleri

HD tip MD'nin OR'si, en yüksek çıkış torkunu verecek mekanik pozisyona getirilerek, Şekil 2.7'de belirtilen OR segmentleri arasındaki mekanik bağlantı parametreleri 2B modelde tanımlanmıştır.  $a$  ve  $b$  parametrelerinin HTY üzerindeki etkilerinin incelenmesinde dikkate alınan değişken aralıkları, Tablo 2.6'da verilmiş olup, belirtilen parametrelerin değer aralıkları içinde farklı parametrik kombinasyonlar seçilerek oluşturulan model ile 450 farklı ESA çözümü elde edilmiştir (Şekil 2.8).

Tablo 2.6. OR segment birleşim parametrelerinin değişken aralığı

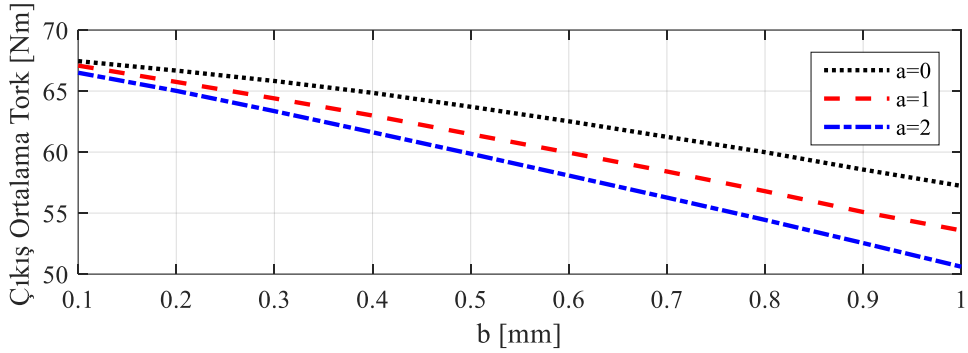
Parametre	Değer Aralığı	Birim
OR, Konum, $a$	$0 \leq a \leq 3,5$	mm
OR, Kalınlık, $b$	$0 \leq b \leq 2$	mm

MD'de çıkış tork yükünü taşıyan OR segmentlerinin rijitliğinin artması için eklenen destek birleşimleri, MD performansını olumsuz yönde etkileyerek beklenildiği gibi HTY'yi azaltmıştır. Parametrelerin bu duruma etkilerinin daha belirgin bir şekilde gösterilmesi amacıyla elde edilen sonuçlar Şekil 2.8'de sunulmuştur.



Şekil 2.8. Segment destek parametrelerinin HTY'ye etkisi

Şekil 2.9'da sunulduğu üzere, OR segment desteklerinin kalınlık değeri sabit tutulduğunda konumunun merkeze yaklaşması, çıkış tork değerini artırmıştır. Ayrıca, konum sabit tutulduğunda kalınlık artışı çıkış tork değerini azaltmıştır.



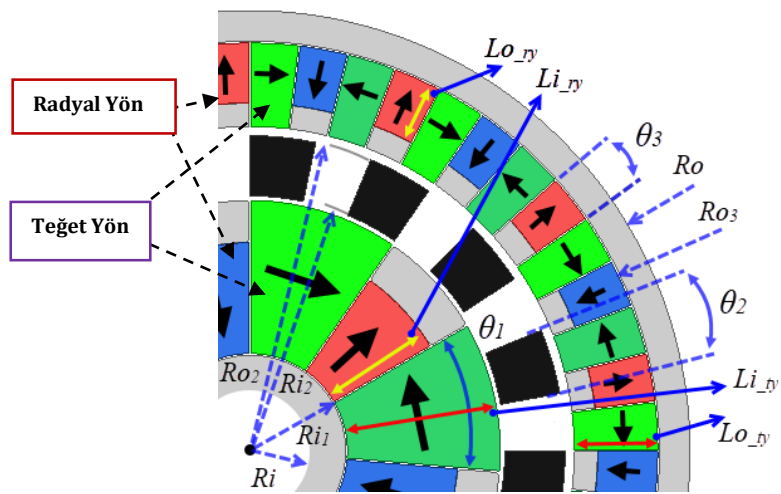
Şekil 2.9. Giriş ve çıkış ortalama tork değerlerinin  $a$  ve  $b$  parametrelerine göre değişimi

Ayrıca, şekil değişim ve gerilmelerin en aza indirilmesi ve hasarın önlenmesi bağlamında desteklerin konumu mümkün olduğunca merkeze yakın ve yeterli mukavemeti sağlayabilecek minimum kalınlıkta olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bağlamda,  $a=2$  mm ve  $b=0,8$  mm olarak belirlenmiştir. Bu durumda HTY değeri, %19,27 oranında azalarak 173 Nm/L'ye düşmüştür. HTY'deki bu azalma, Tablo 2.2'deki 2B analiz hedef değerinden önemli ölçüde sapmaya yol açmıştır. Bu kısımdan kaybedilen değerlerin telafi edilebilmesi için, akı yoğunluğunu tork

yükünde daha etkin kullanabilen AKHD tipli MD tasarımı geliştirilmiş ve farklı mıknatis seviyeleri ile gerçekleştirilen ESA çözümlenmeleri incelenmiştir. MD’de akı yoğunluğunun tork yönünde daha etkin olması için HD tip MD’de bulunan RY’li mıknatis hacmi azaltılarak TY’de fazla akı oluşması sağlanmaktadır. Bu tip MD, AKHD olarak ifade edilmektedir. Hedef değerden önemli ölçüde uzaklaşmayı önlemek amacıyla MD tasarımında mıknatis dizilim tipi değiştirilmiş ve performansları incelenmiştir. Tablo 2.1’deki  $Ro_1$  ve  $Ro_3$  parametreleri yerine, RY ve TY uzunlukları eklenerek Tablo 2.7’de belirtilen tasarım parametreleri dikkate alınmıştır. Değiştirilen parametrelere göre 2B modeller güncellenmiş ve bu çalışmaya HD-2 tip MD’den elde edilen iyileştirilmiş parametreler eklenerek etkileri incelenmiştir. Tablo 2.7’de belirtilen tasarım parametreleri MD üzerinde Şekil 2.10’da gösterilmiştir.

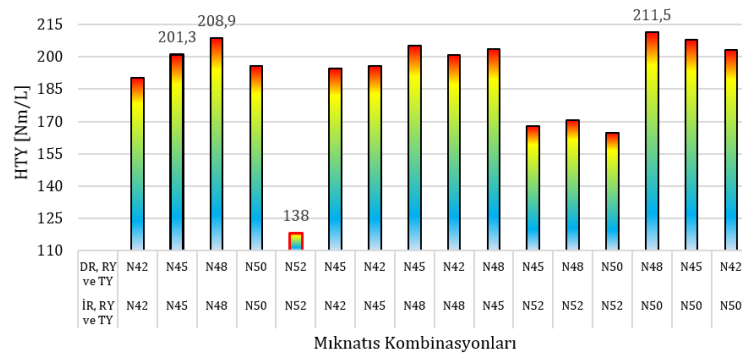
**Tablo 2.7.** AKHD MD tasarım parametreleri

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim		
<b>İR</b>	$Ri_1$	14	mm	<b>DR</b>	$Lo_{ty}$	7,35	mm
	$Li_{ty}$	13	mm		$Ro_3$	40	mm
	$p_1$	3	-		$p_3$	13	-
	$\theta_1$	$180/(2p_1)$	°		$\theta_3$	$180/(2p_3)$	°
	$Li_{ry}$	5	mm		$Lo_{ry}$	4,5	mm
	$C_i$	0,5	mm		$C_R$	0,5	mm
	Malzeme <sub>i</sub>	1018	-		Malzeme <sub>R</sub>	1018	-
<b>OR</b>	$Ri_2$	24,5	mm	<b>Diğer</b>	NdFeB	1,24 (N42)	T
	$Ro_2$	29,5	mm		$Ri$	10	mm
	$n_2$	16	-		$Ro$	45	mm
	$\theta_2$	$180/(n_2)$	°		$l$	50	mm
	Malz. V <sub>1</sub>	1018	-		$a$	2	mm
	Malz. V <sub>2</sub>	M235-35A	-		$b$	0,8	mm



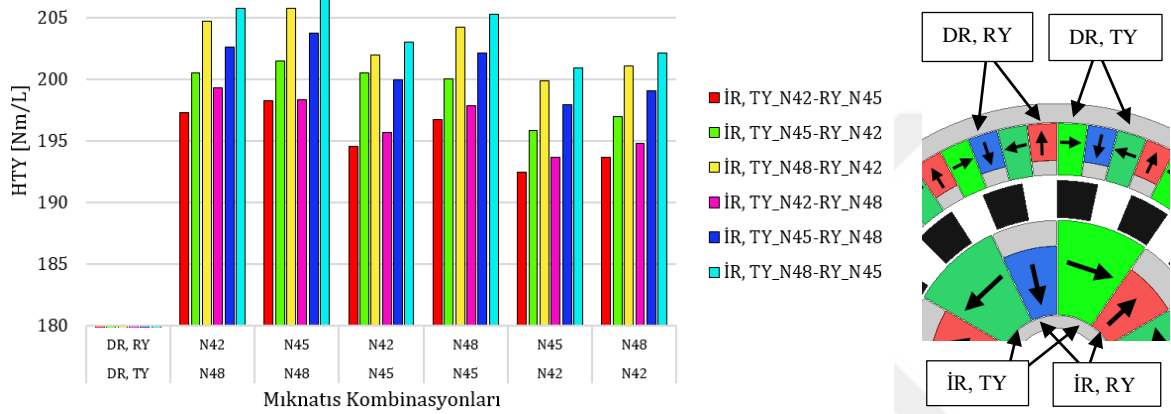
**Şekil 2.10.** AKHD MD tasarım parametreleri

Tablo 2.7'deki parametrelerden yola çıkarak oluşturulan AKHD'li MD modelinin ESA çözümlerinden elde edilen segment destekli HD-2'ye göre %8,67 HTY artışı meydana gelmiştir. AKHD-1 tip MD'ye parametrik iyileştirme gerçekleştirilmeden önce farklı seviyede mıknatısların farklı yerleşimlerinin ESA sonuçları ile performans çıktısına etkileri incelenmiştir. Çalışmanın bu bölümüne kadar sunulan elektromanyetik analizlerde tek tip mıknatıs seviyesi olan N42 ile elektromanyetik çözümler gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Devam eden çalışmalarda farklı seviyelerde mıknatıslar ile farklı kombinasyonlarda elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. MD'de farklı seviyelerde mıknatıslar kullanılarak aynı veya daha yüksek HTY elde edilebilmektedir. Öte yandan, yüksek seviyeli mıknatıslar kullanıldığında ortaya çıkan en önemli problemlerden biri, mekanik olarak yapılandırma ile montajlanan mıknatısların dönme esnasında merkezkaç kuvvetinin de etkisiyle bütünlüğünün bozulma ihtimalidir. Bu noktada, yapısal bütünlüğün daha kolay olduğu kısımlarda seviyesi yüksek mıknatıslar ve yapısal bütünlüğün bozulabileceği kısımlarda ise seviyesi düşük mıknatıslar kullanılarak istenilen kriterlere yakın değerlere ulaşılabilmektedir. AKHD MD'lerde Şekil 2.12'de belirtildiği gibi silindirik koordinat düzlemine göre TY ve RY'lerde manyetize olmuş mıknatıslar bulunmaktadır. İR'de RY ve TY, DR'de RY ve TY olmak üzere 4 farklı tip mıknatıs grubu oluşturulabilmektedir. İlk olarak İR ile DR mıknatıslar kendi içinde N42, N45, N48, N50 ve N52 mıknatıs seviyeli kombinasyonlarda analizler gerçekleştirilmiş ve Şekil 2.11'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. 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 seviyesinde bir öncekine göre %6,17 oranında düşüş olmuş, ardından Şekil 2.11'de kırmızı işaretlenen bölgede N52 seviyeli mıknatıs kullanımıyla HTY değerinde %39,7 oranında ciddi bir düşüş meydana gelmiştir. Şekil 2.11 incelendiğinde en yüksek HTY değerinin DR N48 ve İR N50 durumunda elde edildiği görülmektedir. Diğer taraftan, N52 mıknatısın akı yoğunluğu fazla olmasına rağmen tasarım için uygun olmadığı, N50'nin ise tork yükü oluşturmada sınırda olduğu elektromanyetik analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Dolayısıyla N50 ve N52 seviyeli mıknatıslar tasarımlarda tercih edilmemiştir.



**Şekil 2.11.** İR ve DR'de farklı mıknatıs tiplerinin HTY'ye etkisi

Ayrıca, N42, N45 ve N48 mıknatısları, RY ve TY tipleri olmak üzere 4 farklı kombinasyonda MD'ye yerleştirilerek etkileri incelenmiştir. Bu noktada, İR ve DR için 6 farklı senaryo olmak üzere toplam 36 ayrı senaryo çözümlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.12'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 sütunlar İR-TY ve İR-RY şeklinde farklı seviyelerde mıknatıslar olarak ifade edilmiştir. Şekil 2.12'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 görülmüştür.



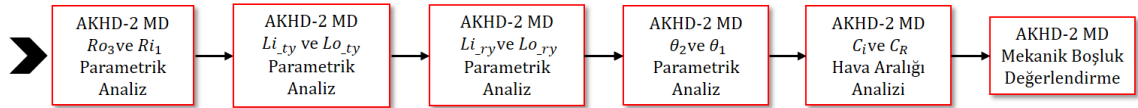
Şekil 2.12. Farklı mıknatıs seviyelerinin HTY'ye etkisi

Şekil 2.11'deki sayısal analiz sonuçlarına göre İR, N48 - DR, N48 kullanımı ile en yüksek HTY değeri elde edilmiştir. Ayrıca, TY tipi mıknatıslarda yüksek seviyeli, RY tipi mıknatıslarda ise TY mıknatıslara göre bir kademe düşük mıknatıs seviyesi seçilmesi durumunda benzer HTY değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Bir diğer alternatif durumda ise İR'de N48, DR'de N45 kullanılarak HTY'de yüksek performans değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak farklı mıknatıs seviyeleri kullanılarak bütünlemeyi ve performansı destekleyici tasarımlar ortaya çıkmıştır. Fakat Şekil 2.11'e göre İR, N48 - DR, N48 konfigürasyonu HTY açısından değerlendirildiğinde, düşüşün başladığı tepe noktasına yakın olduğundan tasarımı riske atmadan hedeflenen kriterlere yaklaşılabilecek İR, N45 - DR, N45 seçilerek güvenli bölgede kalınması amaçlanmıştır. AKHD-1 tip MD tasarımında İR, N45 - DR, N45 kullanılarak gerçekleştirilen ESA çözümlerinde Tablo 2.8'de sunulan değerler elde edilmiş ve bu durumda en yüksek HTY değeri bir önceki tasarıma göre %6,91 artmıştır.

**Tablo 2.8.** MD destek ve mıknatıs seviyesi için karşılaştırmalı performans sonuçları

Parametre	Tasarım				Birim
	HD-2		AKHD-1		
Giriş Tork	12,72	10,31	11,18	11,99	Nm
Çıkış Tork	-68,16	-55,1	-59,8	-64,1	Nm
Aktarma Oranı	~5,35	~5,34	~5,35	~5,34	—
Destek	X	✓	✓	✓	—
Mıknatıs Seviyesi	N42	N42	N42	N45	—
HTY	214,3	173	188	201,3	Nm/L

AKHD-1 tip MD tasarımında, mıknatıs seviyesinin N45 olarak seçilmesi ile hedeflenen 2B analiz hedef değerlerine (Tablo 2.2) ulaşılabilmesi amacıyla çeşitli tasarım parametreleri tekrar değişken olarak belirlenerek AKHD tasarım için iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. AKHD-2 tip MD tasarımında N45 mıknatıs seviyesi kullanılarak gerçekleştirilen parametrik en iyileme çalışmaları için akış şeması Şekil 2.13'te verilmiştir.



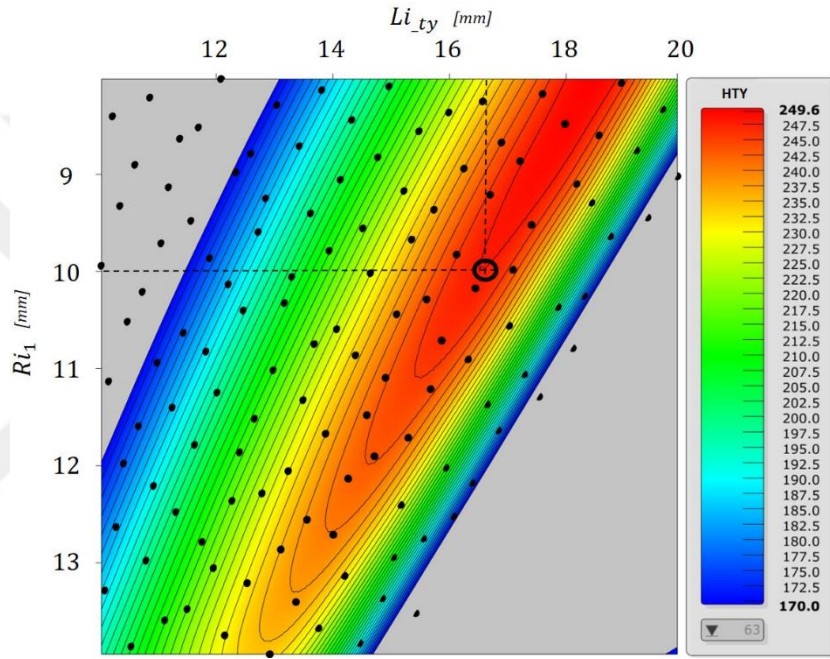
**Şekil 2.13.** AKHD-MD-2 parametrik çalışma akış şeması

AKHD-2 tip MD için parametrik çalışmalarına başlanan ilk nokta, HTY'yi arttırmak için hacmi etkin kullanarak en dış ve en iç mekanik sınırların belirlenmesidir. Bu noktada, Tablo 2.7'deki parametrelerden İR'de  $R_{i1}$  ve  $Li_{ty}$  ve DR'de  $R_{o3}$  ve  $Lo_{ty}$  parametreleri ilk değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Mekanik olarak üretilebilir ve montajlanabilir bir tasarım için MD yapısal bütünlüğü de göz önüne alınarak Tablo 2.9'daki değişken aralıkları dikkate alınmıştır.

**Tablo 2.9.** AKHD-2 MD için temel değişken parametreler

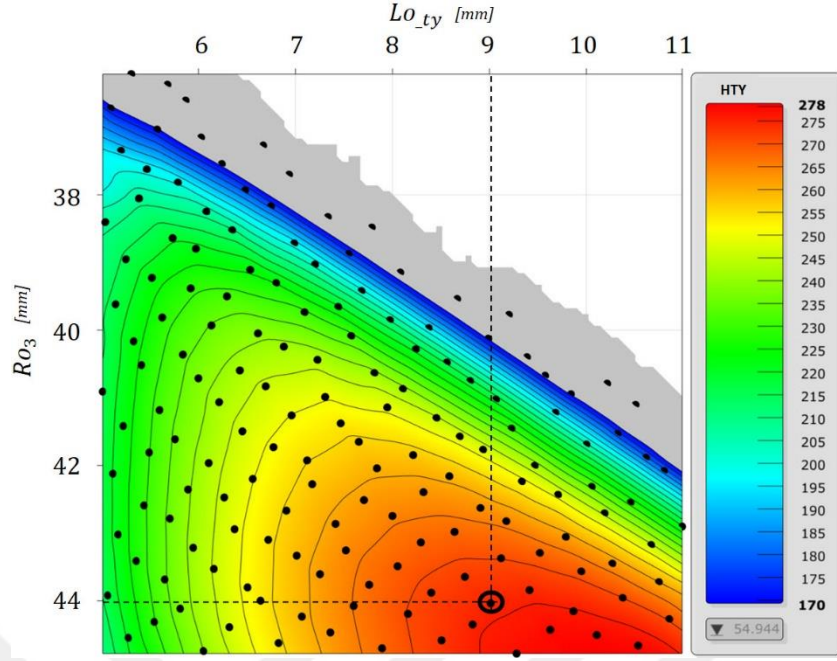
Parametre	Değer Aralığı	Birim
İR, $R_{i1}$	$8 \leq R_{i1} \leq 14$	mm
İR, $Li_{ty}$	$10 \leq Li_{ty} \leq 20$	mm
DR, $R_{o3}$	$36 \leq R_{o3} \leq 44,8$	mm
DR, $Lo_{ty}$	$5 \leq Lo_{ty} \leq 11$	mm

Tablo 2.9'da belirtilen İR'ye ait  $R_{i1}$  ve  $Li_{ty}$  parametreleri için verilen aralık içerisinde 450'ye yakın farklı kombinasyonda oluşturulan ESA çözümü ile elde edilen HTY değerleri Şekil 2.14'te sunulmuştur. Analiz sonuçları incelendiğinde İR'de bulunan mıknatis hacminin artışının HTY performansını arttırdığı görülmektedir.  $R_{i1}$  parametresi, İR mıknatislerinin yapısal bütünlüğünü sağlamak için İR kısmına yerleştirilen ferromanyetik malzemeyi temsil etmektedir. Şekil 2.14 incelendiğinde  $R_{i1}$ , 8 mm ile 10 mm aralığında olduğunda HTY değerini dikkate değer şekilde iyileştirmektedir.  $R_{i1}$ 'in kalın olması mekanik yataklama ve yapısal bütünlük için fayda sağlayacağından bu değer 10 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2.14.  $R_{i1}$  ve  $Li_{ty}$  parametrelerinin HTY'ye etkisi

Şekil 2.14'e göre  $R_{i1}$  değerinin 10mm belirlenmesi ile o değere karşılık gelen  $Li_{ty}$  16,8 mm olarak seçilmiştir. Bu iki parametre ile birlikte ESA çözümlenmeleri sonucunda HTY değeri 246 Nm/L olarak elde edilmiştir. AKHD-1 tip MD ile kıyaslandığında, HTY %22,2 oranında artış göstermiştir. Diğer taraftan,  $R_{o3}$  ve  $Lo_{ty}$  parametreleri için Tablo 2.9'daki değişken aralıkları dikkate alındığında, DR mıknatislerinin dış yarıçapa mümkün olduğunca yaklaşmasının HTY üzerinde olumlu etki yarattığı görülmüştür. Ancak, uygulanabilirlik açısından 45 mm pratikte kullanılamayacağından, yaklaşık olarak aynı seviyede HTY değerinin elde edildiği  $R_{o3} = 44$  mm optimum değer olarak belirlenmiştir. Şekil 2.15'e göre bu değere karşılık gelen  $Lo_{ty}$  9 mm olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile HTY'de %11,78'lik bir artış sağlanmıştır.



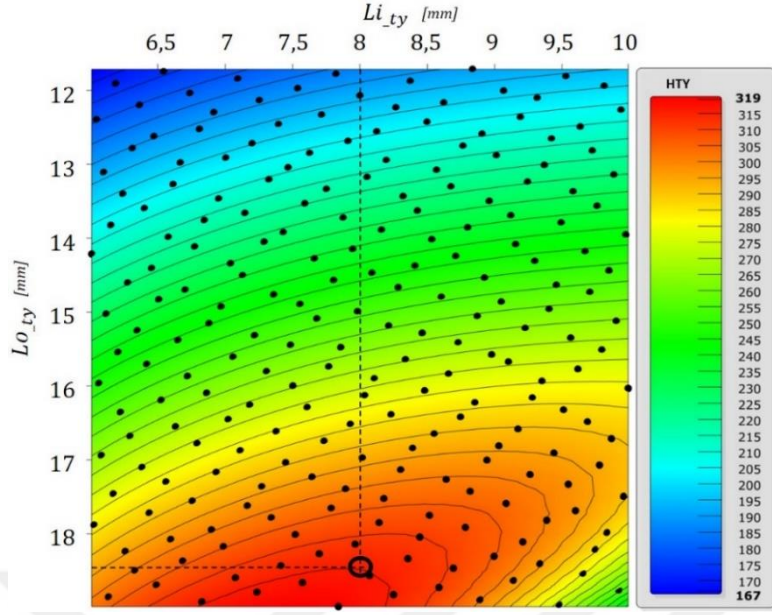
Şekil 2.15.  $R_{o3}$  ve  $Lo_{ty}$  parametrelerinin HTY'ye etkisi

HTY üzerinde en etkili bileşenler olan ve temel çerçeveyi oluşturan  $R_{i1}$  ve  $R_{o3}$  parametrelerinin belirlenmesiyle birlikte, mıknatısların boyutları da kendi içinde karşılaştırılmıştır. TY ve RY mıknatıslarının etkileri ayrı ayrı analiz edilerek değerlendirilmiştir. İR ve DR'de bulunan mıknatısların boyut parametreleri, Tablo 2.10'da verilen değişken aralıklar doğrultusunda incelenmiş ve performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Tablo 2.10. AKHD-2 MD mıknatıs boyları değişken parametreleri

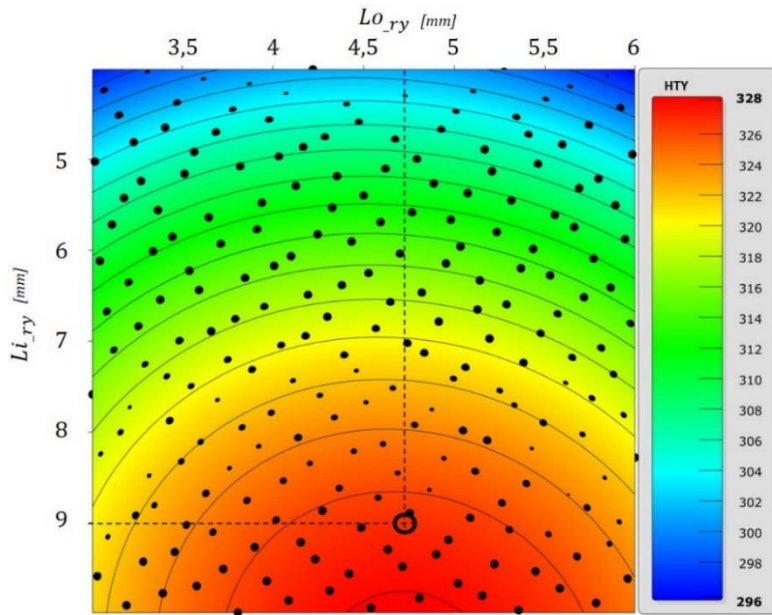
Parametre	Değer Aralığı	Birim
İR, $Li_{ty}$	$11,5 \leq Li_{ty} \leq 19$	mm
DR, $Lo_{ty}$	$6 \leq Lo_{ty} \leq 10$	mm
İR, $Li_{ry}$	$4 \leq Li_{ry} \leq 10$	mm
DR, $Lo_{ry}$	$3 \leq Lo_{ry} \leq 6$	mm

İlk olarak, İR ve DR'de bulunan TY mıknatıslarının, Tablo 2.10'da belirtilen değişken aralıkları kullanılarak oluşturulan modelin ESA çözümleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 2.16'da sunulmuştur. Bu noktada, optimum değerler  $Li_{ty} = 18,5$  mm ve  $Lo_{ty} = 8$  mm olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, HTY değeri % 15,72 artırılarak 317 Nm/L olmuştur.



**Şekil 2.16.**  $Li_{ty}$  ve  $Lo_{ty}$  parametrelerinin HTY'ye etkisi

TY mıknatis boylarının belirlenmesiyle iyileştirilen HTY performansı, RY açısından değerlendirilerek Tablo 2.10'da tanımlanan değişken aralıklar doğrultusunda ESA çözümlenmeleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 2.17'de sunulmuştur. Bu değer aralıklarında, yüksek HTY'nin gözlemlendiği bölgeler  $Lo_{ry}$  açısından incelenmiş ve en düşük mıknatis hacmi ile en yüksek HTY değerleri 4,5 ile 5 mm aralığında hesaplanmıştır. Bu bağlamda, Şekil 2.17'ye göre  $Li_{ry} = 9$  mm ve  $Lo_{ry} = 4,5$  mm seçilerek mıknatis hacmi azaltılmış ve yapısal bütünlük iyileştirilmiştir. Bu revizyon sonucunda, MD için HTY değeri bir önceki ESA analizine kıyasla %2,83 oranında artmıştır.

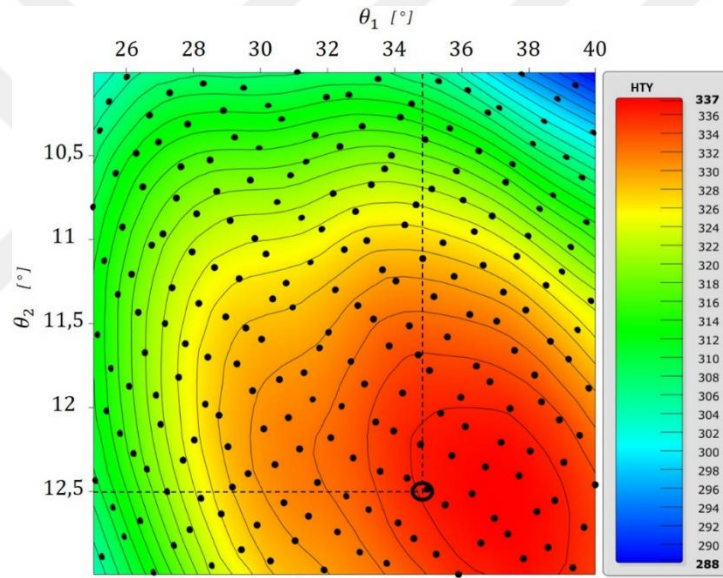


**Şekil 2.17.**  $Li_{ry}$  ve  $Lo_{ry}$  parametrelerinin HTY'ye etkisi

Şekil 2.10’de tanımlanan parametrelerden İR ve DR mıknatıs açıları ile OR segment açılarının HTY üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiştir. DR mıknatıs açısı ( $\theta_3$ ), diğer parametrelere kıyasla ihmal edilebilecek kadar düşük bir etkiye sahip olduğu için bu çalışmaya dahil edilmemiştir.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açılarının etkilerini analiz etmek amacıyla, Tablo 2.11’de belirtilen değer aralığında model oluşturulmuş ve 450 farklı kombinasyonla ESA çözümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen HTY sonuçları Şekil 2.18’de sunulmuştur.

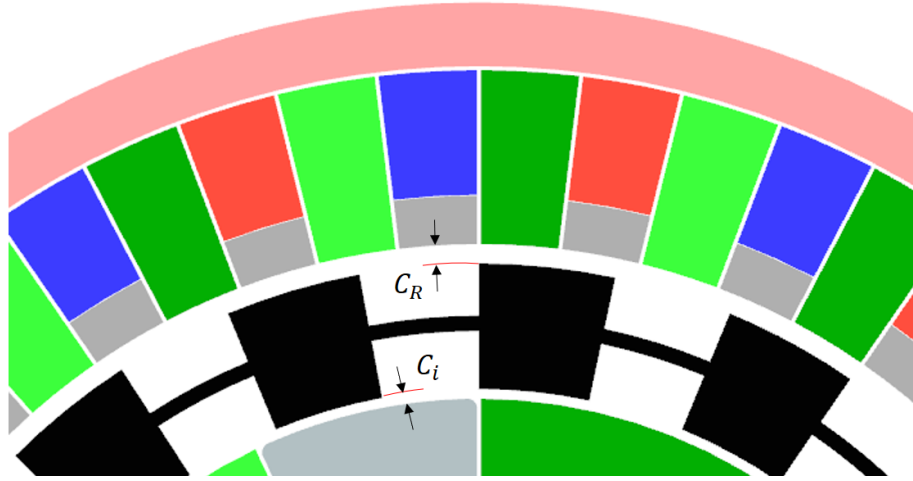
**Tablo 2.11.** AKHD-2 MD geometrik açısal değişken parametreleri

Parametre	Değer Aralığı	Birim
İR, $\theta_1$	$25 \leq \theta_1 \leq 40$	°
OR, $\theta_2$	$10 \leq \theta_2 \leq 13$	°



**Şekil 2.18.**  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  parametrelerinin HTY'ye etkisi

Şekil 2.18’den elde edilen sayısal veriler doğrultusunda optimum değerler  $\theta_1 = 34,8^\circ$  ve  $\theta_2 = 12,5^\circ$  olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile HTY değeri 336 Nm/L’ye ulaşarak %3,06 oranında bir artış sağlanmıştır. Eş eksenli MD’nin yapısı gereği, rotorların dönmesi ve mekanik yüklenme sırasında oluşan mekanik esneme nedeniyle birbirine sürtünmemesi için belirli bir hava aralığı gereklidir. Literatürde, hava aralığı genellikle her iki bölgede 0,5 mm olarak kullanılmıştır (Som ve ark., 2017; Uppalapati ve ark., 2014; Wong ve ark., 2022a). AKHD-2 tip MD’de hava aralığının performansa etkisini değerlendirmek amacıyla, Şekil 2.19’da gösterilen yapı dikkate alınarak, Tablo 2.12’de belirtilen değişken parametreler üzerinden ESA analizleri gerçekleştirilmiştir.

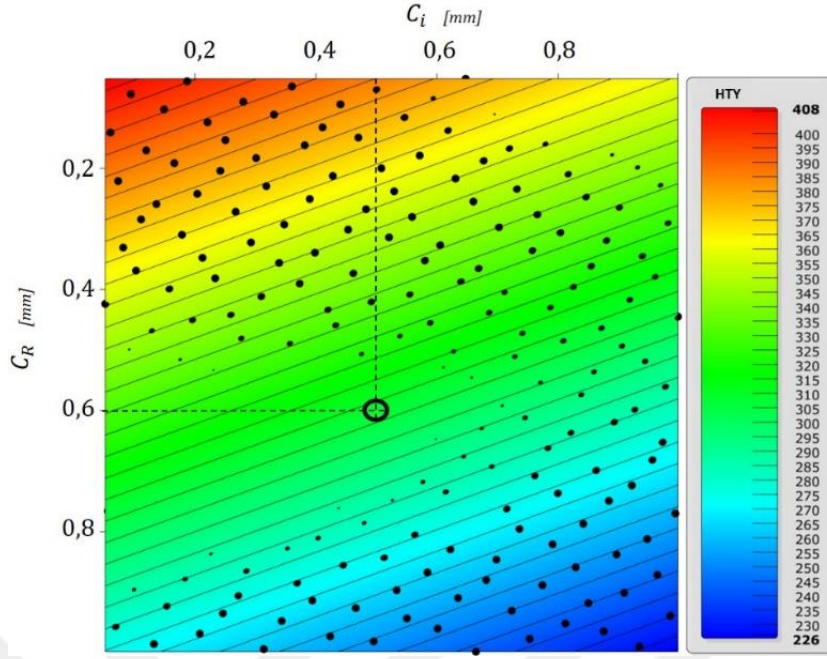


Şekil 2.19. AKHD-2 MD hava aralığı şematik gösterimi

Tablo 2.12. AKHD-2 MD hava aralığı değişken parametreleri

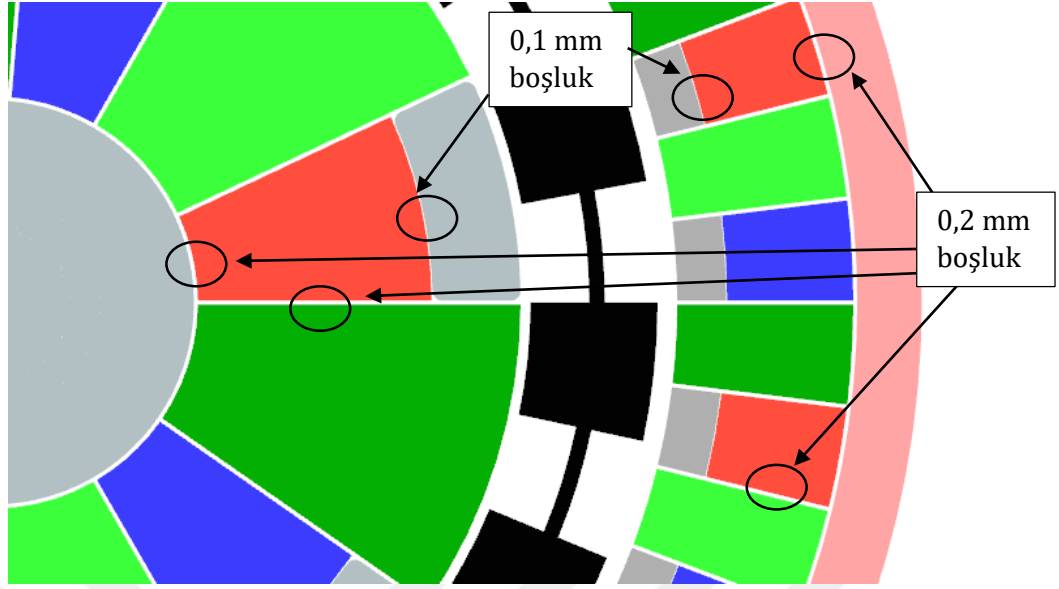
Parametre	Değer Aralığı	Birim
İR-OR, $C_i$	$0 \leq C_i \leq 1$	mm
OR-DR, $C_R$	$0 \leq C_R \leq 1$	mm

Şekil 2.20’de sunulan veriler HTY açısından değerlendirildiğinde, hava aralığı değerlerinin azalmasının HTY’de önemli bir artışa neden olduğu görülmüştür. Ancak, rotorlar arası hava aralığının azalması, kuvvet altındaki esnemeler ve yüksek açısız hızlarda rotorların birbirine temas etme olasılığını artırarak sürtünme veya mekanik hasar riskini yükseltmektedir. MD’nin üretimi ve tasarımında, yataklama elemanları da dahil olmak üzere parçaların kendi ekseninde salgılı dönme ihtimali bulunmaktadır. Ayrıca, yapıştırılan kısımlar hava aralığı bölgelerinde çıkıntı oluşturabilmektedir. MD’nin iç merkezinden dışa doğru çap ölçüsü büyüdükçe, üretimden kaynaklanan kaçıklıklar büyük çaplarda daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle, güvenli tarafta kalabilmek ve üretim ile montaj kaynaklı hataları tolere edebilmek amacıyla İR-OR arası hava aralığı  $C_i = 0,5$  mm ve OR-DR arası hava aralığı  $C_R = 0,6$  mm olarak belirlenmiştir. Bu parametre seçimi sonucunda, HTY değeri 315 Nm/L’ye gerileyerek %6,25 oranında bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 2.20.  $C_i$  ve  $C_R$  hava aralığı parametrelerinin HTY'ye etkisi

MD tasarımında önemli hususlardan biri de mıknaatların monte edilebilirliğidir. İyileştirilmiş parametreler ile oluşturulan 2B tasarımda, mekanik parçalar arasında herhangi bir montaj boşluğu olmadan modelleme yapılmıştır. Ancak, tasarımın üretilebilirlik açısından değerlendirilmesi gerektiğinde, 3B olarak konumlandırılan parçaların montajı için belirli bir mekanik boşluk bırakılması zorunludur. Bu nedenle, 2B ESA modelinde mekanik parçaların üretim yöntemleri dikkate alınarak üretim toleransları tasarıma entegre edilmiştir. Mıknaat üretim standartları doğrultusunda, bütünleme süreci göz önünde bulundurularak her kenarda 0,1 - 0,2 mm arasında boşluk bırakılmış ve 2B modelleme bu parametrelere göre gerçekleştirilmiştir. Bu boşluklar, üretim sürecinde meydana gelebilecek hassasiyet farklılıkları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Ayrıca, bütünleme sırasında yaşanabilecek gerilmeleri ve montaj zorluklarını önlemek amacıyla tasarıma ek toleranslar dahil edilmiştir. Şekil 2.21'de bu boşluklar görselleştirilmiştir.



**Şekil 2.21.** AKHD-2 MD mıknatıslar arası mekanik boşluk

AKHD-2 tip MD'nin parametrik olarak iyileştirilmiş tasarım noktası için montaj kolaylığı sağlayan mekanik boşlukların etkisi, 2B ESA analizleri ile incelenmiştir. Mekanik boşluklar, akı yoğunluğunu %4,12 oranında azaltarak HTY'yi düşürmüş ve sonuç olarak HTY değeri 302,11 Nm/L olarak hesaplanmıştır. AKHD-2 tip MD tasarımı için Tablo 2.13'te belirlenen tasarım parametreleri nihai olarak elde edilerek planlanan 2B hedef kriterleri sağlanmıştır. 2B ESA çözümlerinden elde edilen AKHD-2 tip MD sonuçları, diğer tip MD sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Tablo 2.14'te verilmiştir. AKHD-2 tip MD, AKHD-1 tipine göre %50,2; HD-2 tipine göre ise %40,9 oranında HTY'de artış sağlamıştır.

**Tablo 2.13.** AKHD-2 tip MD en iyilenmiş tasarım değerleri

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim		
<b>İR</b>	$Ri_1$	10	mm	<b>DR</b>	$Lo_{ty}$	8	mm
	$Li_{ty}$	18,5	mm		$Ro_3$	44	mm
	$p_1$	3	-		$p_3$	13	-
	$\theta_1$	34,8	°		$\theta_3$	$180/(2p_3)$	°
	$Li_{ry}$	9	mm		$Lo_{ry}$	4,7	mm
	$C_i$	0,5	mm		$C_R$	0,6	mm
	Malzeme <sub>i</sub>	1018	-		Malzeme	1018	-
<b>OR</b>	$Ri_2$	29	mm	<b>Diğer</b>	NdFeB	N45	T
	$Ro_2$	35,4	mm		$Ri$	0	mm
	$n_2$	16	-		$Ro$	45	mm
	$\theta_2$	12,5	°		$l$	50	mm
	Malz. V <sub>1</sub>	1018	-		$a$	2	mm
	Malz. V <sub>2</sub>	M235-35A	-		$b$	0,8	mm

**Tablo 2.14.** Tüm MD tasarım performanslarının karşılaştırması

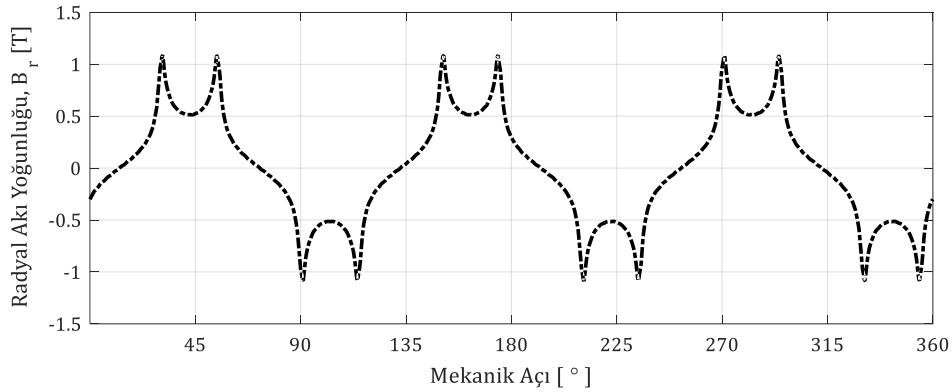
Parametre	Tasarım							Birim
	RD	HD-1	HD-2	AKHD-1	AKHD-2			
Giriş Tork	6,45	10,2	12,72	10,31	11,18	11,99	18,02	Nm
Çıkış Tork	-34,2	-54,5	-68,2	-55,1	-59,8	-64,1	-96,06	Nm
Aktarma Oranı	~5,3	~5,34	~5,35	~5,34	~5,35	~5,34	~5,33	—
Destek	X	X	X	✓	✓	✓	✓	—
Mıknatıs Seviyesi	N42	N42	N42	N42	N42	N45	N45	—
HTY	107,5	171,3	214,3	173	188	201,3	302,11	Nm/L

### 2.3. Tasarım Geliştirme

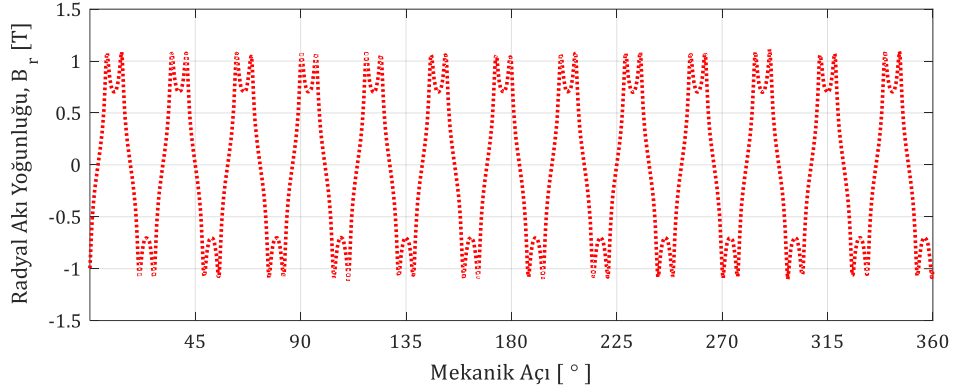
AKHD-2 tip MD için belirlenen Tablo 2.14'teki parametreler ile 2B model üzerinden akı yoğunluğu analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, aktif boyu 50 mm olan 3B katı model oluşturulmuş, ardından eş eksenli çalışma prensibine bağlı kalınıp diğer mekanik bağlantı ve yataklama elemanları tasarlanarak üretilebilir bir 3B MD tasarımı geliştirilmiştir. Son olarak, 3B ESA çözümlenmeleri ile en yüksek HTY değerini elde etmek amacıyla model üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

#### 2.3.1. Akı yoğunluğu analizi

Modelde İR ile OR ve OR ile DR arasındaki Şekil 2.19'da gösterilen hava boşluklarının tam ortası olan 28,75mm ve 35,7mm yarıçap ölçülerinden veri alınarak manyetik akı yoğunluğu değeri, sayısal analizler ile elde edilmiştir. Sayısal analizden elde edilen radyal akı yoğunluğu ( $B_r$ ) değeri, dönme eksenini etrafında 360° hesaplanmıştır (Şekil 2.22 ve Şekil 2.23).

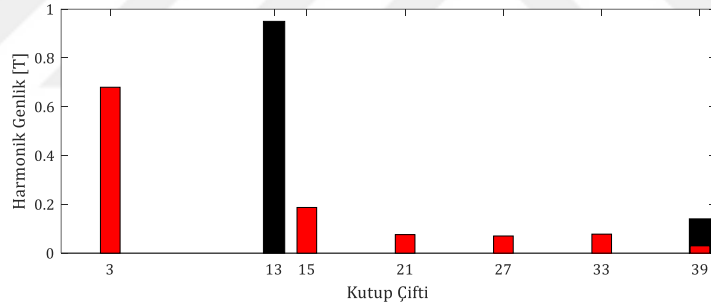


**Şekil 2.22.** İR ve OR arası 28,75 mm'de açıya göre radyal akı yoğunluğu



**Şekil 2.23.** OR ile DR arası 35,7 mm'de açığa göre radyal akı yoğunluğu

Bu grafiklerin uzaysal harmonik analizleri incelendiğinde İR ve DR için akı yoğunluğunun kutup çifti sayısına bağlı değişimleri Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Akı yoğunluğu grafiklerinin hızlı Fourier dönüşümü sayesinde sinüsoidal yapılar incelenmiş ve İR'de 3, DR'de 13 sayılarının baskın olduğu ifade edilerek kutup çifti sayılarının tasarlanan yapıya yakınsadığı teyit edilmiştir.

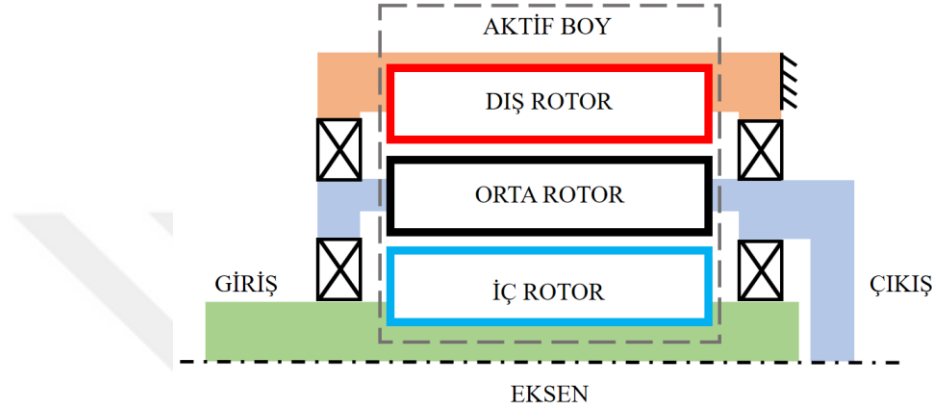


**Şekil 2.24.** Uzaysal harmonik analiz

### 2.3.2. Mekanik tasarım

MD'nin mekanik çalışma prensibi, Şekil 2.25'te verildiği gibi iç içe dönen millerden oluşmaktadır. MD tasarım çalışmasında, DR kısmı kaideye sabitlenerek, İR'ye verilecek dönüş hareketi manyetik alanın etkisiyle OR'ye iletilmektedir. Manyetik alanın etkisiyle güç aktarımında kayıpları en aza indirmek amacıyla, mümkün olduğunca az parçalı düşük hacimli model tasarlanması gerekmektedir. Şekil 2.25'te görüldüğü gibi, dört rulman yatağı kullanılarak iç içe dönüş hareketine izin veren bir tasarım elde edilmiştir. Aktif boy harici bölgelerde ferromanyetikliği en aza indirgeyen malzeme seçimi ve model değişimi ile HTY'ye olumsuz etkinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. DR kısmının sabitlenmesi için bağlantı kulakları oluşturularak, sabit DR kısmı mekanik olarak kaideye bağlanmıştır. Birbiri içinde

dönen kısımların eş eksenli dönebilmesi ve hava aralığının her yerde eşit miktarda kalabilmesi için yataklama kısımlarının tasarımında salgı gibi geometrik unsurlar dikkate alınmıştır. DR'den İR'ye kadar eş eksenliliği sağlamak için, Şekil 2.25'te belirtildiği gibi, DR'ye yataklama elemanı bağlanarak OR'nin iki taraftan yataklanması sağlanmıştır. Ayrıca, bu yataklama elemanının bağlandığı parçanın iç kısmı da yataklama olarak kullanılarak İR yataklaması tasarlanmıştır.



**Şekil 2.25.** Manyetik dişli mekanik yapısının şematik gösterimi

Şekil 2.25'teki yataklama sistemi tasarlanırken, bütünleme mantığı açısından çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bütünlenebilir bir tasarım ortaya çıkarılmıştır. İç içe dönen bu sistemin, minimum salgı ile dönmesini sağlamak için yataklama elemanlarının mekanik boşluklarının en az seviyede tutulmasına özen gösterilmiştir. Şekil 2.25'te belirtilen rulmanların iç ve dış sabitlemesi yapılarak, manyetik alanın etkisiyle eksenel oynamasına ve yataklama dışına çıkmasına izin verilmemiştir. Tasarımda, manyetik alanın eşit dağılmasına olanak sağlanarak, güç aktarımının her zaman doğrusal olması amaçlanmıştır. Sistem yataklamasında paslanmaz çelik rulman seçimi yapılarak sistemin kayıplardan en az seviyede etkilenmesi hedeflenmiştir. Yataklamada sabit bilyalı rulmanlar kullanılmıştır. Sistem performansı açısından bazı kısımlarda çelik yerine alüminyum yatak kullanılması, manyetik kayıpları azaltıcı bir etki yaratacağı için tercih edilmiştir. Bu tasarıma yön veren rulman boyutları, montajlanabilir bir tasarım açısından büyük önem taşımaktadır. DR-OR arasında kullanılan rulman iç çapı, OR dış çapından büyük olacak şekilde; OR-İR arasında kullanılan rulman dış çapı ise, montaj açısından değerlendirildiğinde İR dış çapından küçük olacak şekilde seçilmiştir (Anonim, 2024e).

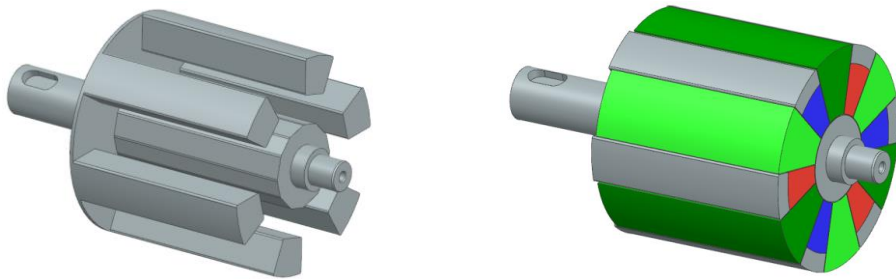
İç içe dönebilen MD sistemi için katı modellemede en önemli noktalardan biri, mıknatısların yapısal yapılandırıcı ile montajlandığında yapısal bütünlüğünün bozulmamasıdır. MD'nin tüm kuvvetini oluşturan mıknatısların, bağlandıkları yüzeyde sabit kalması büyük önem taşımaktadır. AKHD tipinin, mıknatıslar arasındaki çelik parçalardan oluşan karakteristik yapısı, montaj sürecine katkı sağlamıştır. Bu yapı sayesinde mıknatısların yapışma alanı

büyüyerek mekanik dayanımı iyileştirmiştir. Katı modelleme sürecinde ilk olarak, DR kısmının kaideye sabitlenebilmesi için tasarım yükleri göz önünde bulundurularak bağlantı kulakları oluşturulmuş, ağırlık yapmayan ve hacim açısından avantaj sağlayan bir tasarım elde edilmiştir. DR’de ana yapıyı, Şekil 2.26’da gösterilen parçalar oluşturmaktadır. Mıknatısların yerleştirileceği ana yapı, Şekil 2.26’daki gibi iki parçadan oluşmakta ve bu yapı, mıknatısların yapısal bütünlüğünü sağlamak ve AKHD’yi korumak amacıyla tasarlanmıştır.



**Şekil 2.26.** DR (Sabit kısım)

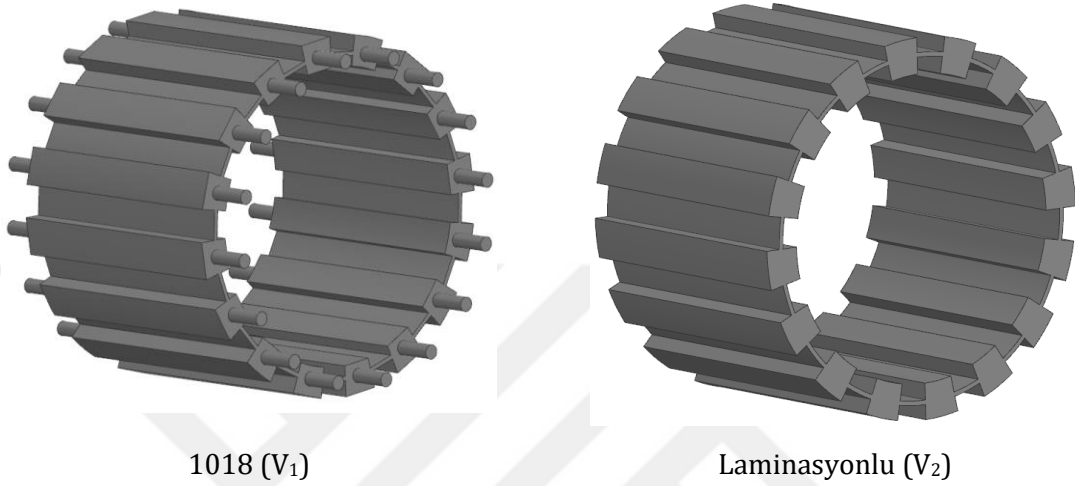
İR’nin ana yapısını, giriş mili olarak adlandırılan ve yekpare tasarlanan Şekil 2.27’deki parça oluşturmaktadır. Bu parça yekpare olarak tasarlanmış, içine mıknatıslar yerleştirilmiş ve mekanik yapısı bu şekilde korunmuştur. Aynı zamanda, milin her iki uç kısmına dönüş hareketinin verildiği yataklama bölgesi eklenerek fonksiyonellik artırılmıştır.



**Şekil 2.27.** İR (Giriş kısmı)

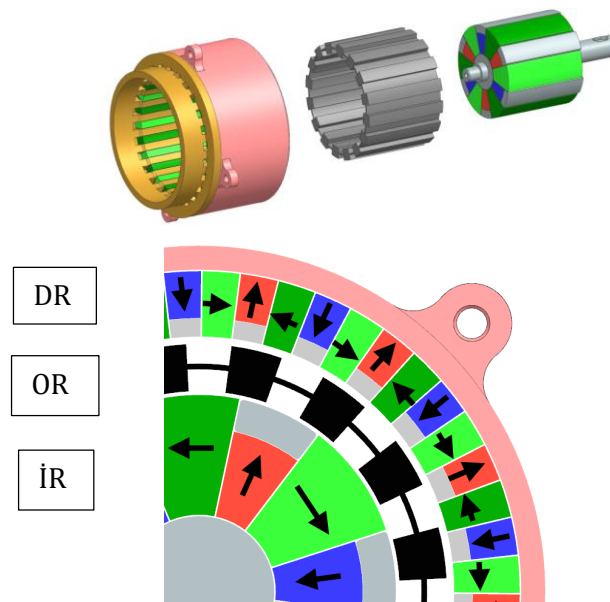
MD’de OR, çıkış kısmının ana bileşenini oluşturmakta ve manyetik akının tork yüküne çevrilerek çıkış kısmına iletilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, iki tip OR kullanılarak performans karşılaştırması yapılmıştır; Tip-1 OR, AISI 1018 çeliğinden yekpare olarak

tasarlanmış ve talaşlı imalat yöntemiyle üretilmiştir. Tip-2 OR, M235-35A laminasyonlu elektrik çeliği kullanılarak 0,35 mm kalınlığındaki sacların birbirine yapıştırılması ile elde edilen katmanlı bir yapıdır. EK-2’de, laminasyonlu çeliğin malzeme sertifikası sunulmuştur. Literatür çalışmalarında, OR kısmı genellikle yüksek demir (Fe) oranına sahip malzemelerden üretilmektedir (Şekil 2.28).



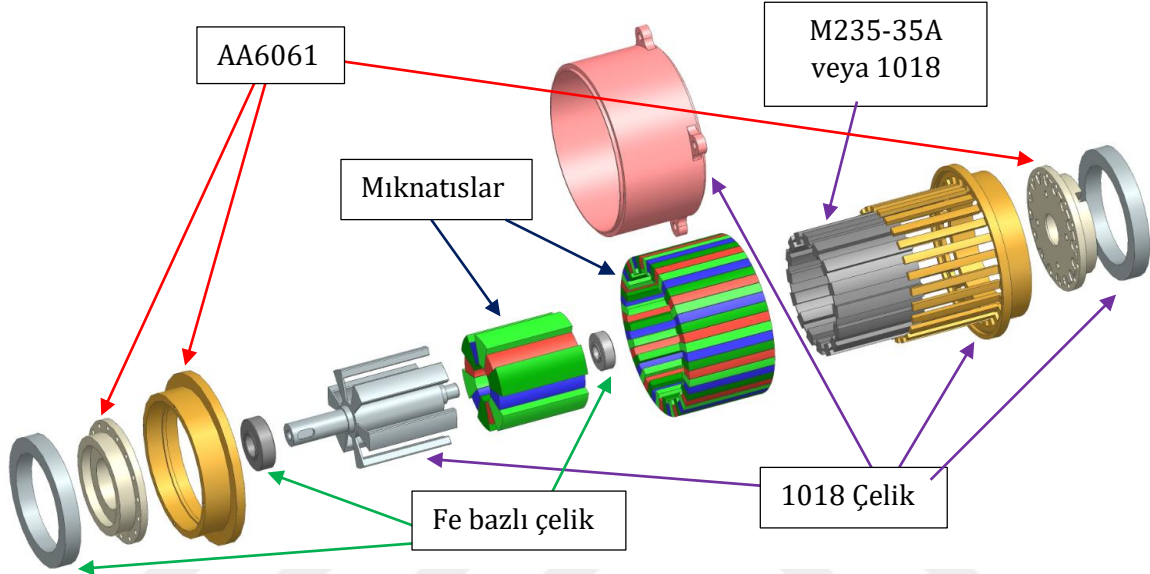
Şekil 2.28. OR için iki farklı tasarım gösterimi (Çıkış kısmı)

Mekanik bağlantıların ana yapıtaşları şekillendirildikten sonra, MD tasarımında DR kısmı sabit, İR ve OR kısımları ise hareketli olarak tasarlanmıştır. Bu bölümler, Şekil 2.29’da açıkça gösterilmiştir.



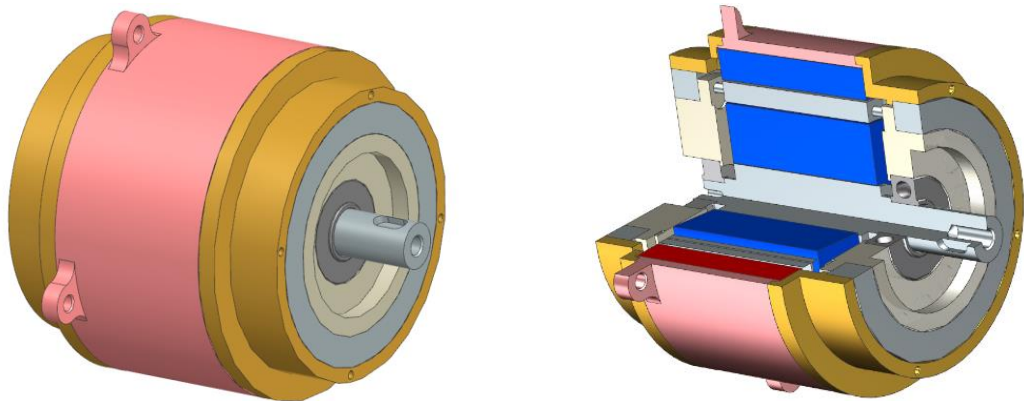
Şekil 2.29. Manyetik dişli ana kısımları

Üç ana bölümün modelde montajı tamamlandıktan sonra, rulman ve diğer arayüzlerin detayları oluşturularak ana MD tasarımı tamamlanmıştır. MD bileşenleri ve malzeme detayları Şekil 2.30'da sunulmuştur. Aktif hacmin dışında kalan bölgelerde, yük açısından emniyetli olarak kabul edilen parçalarda AA6061 alüminyum alaşımı malzeme kullanılarak performansa olumsuz etkiler azaltılmıştır.



Şekil 2.30. 3B katı modeli oluşturan parçaların detaylı görünümü

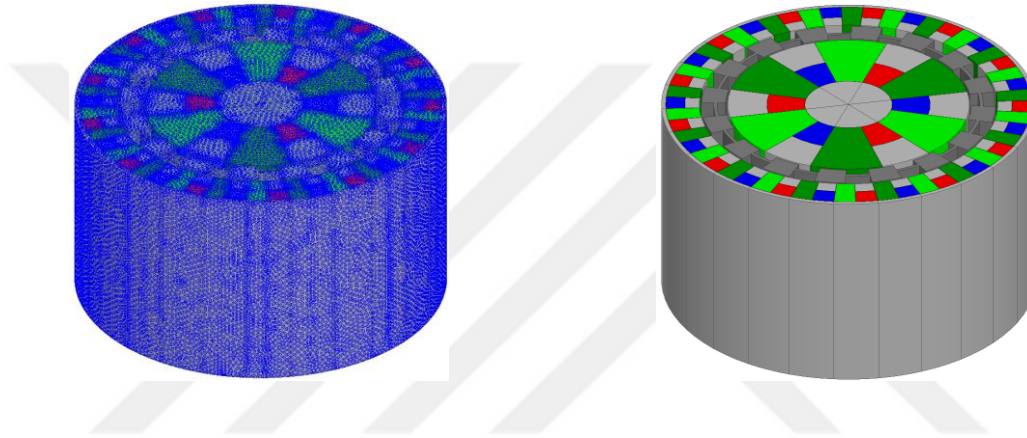
Giriş ve çıkış kısımlarında bağlantı arayüzleri oluşturularak performans verilerinin elde edileceği test sistemleri ile mekanik uyumluluk sağlanmıştır (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Manyetik dişli 3B tasarımı görseli

### 2.3.3. 3B sayısal analiz

AKHD-2 MD V<sub>1</sub> sayısal analiz incelemelerinde 2B'den 3B'li modele geçiş aşamasında yaşanan manyetik kayıpların incelenmesi için ilk olarak 2B alan geometrisine 50 mm derinlik verilerek Şekil 2.32'deki 3B model oluşturulmuştur. ANSYS Electromagnetics Suite 17.2® yazılımında, magnetostatik çözüm seçilerek oluşturulan modelde 2 mm ağ yapısı kullanılmış ve ESA çözümlenmesi gerçekleştirilmiştir. Statik çözümlenme sonucunda, OR'den elde edilen çıkış torku değeri 85,9 Nm ve HTY 270 Nm/L olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda, 2B MD V<sub>1</sub> tasarımına sadece aktif boy eklenmesiyle HTY değeri %10,59 düşmüş ve 3B'ye geçiş manyetik kayıpları arttırmıştır.



Şekil 2.32. AKHD-2 MD V<sub>1</sub> 3B modeli (sadece aktif hacim)

AKHD-2 MD V<sub>1</sub> tasarımı için Şekil 2.31'deki 3B katı model tasarımına, Şekil 2.32'deki 3B manyetik alan tasarımı yerleştirilmiş ve Şekil 2.30'daki malzemeler modelde tanımlanmıştır. Hava bulunan kısımlar, vakumlu bölge olarak tanımlanarak, gerçekçi bir model elde edilmesi amaçlanmıştır. En yüksek HTY değerinin elde edilebilmesi için OR pozisyonu, mekanik olarak uygun dönme açısı değerine getirilmiştir (bakınız Şekil 2.34). İlk 3B katı model çizimleri ve yapılan ESA analizlerinde, mıknatıslar ile yakın bölgelerdeki ferromanyetik malzemelerin olumsuz etkilerinin çapraz karşılaştırmalı sonuçlarla ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Manyetik alan üzerindeki etkilerine göre iyileştirmeler yapılarak MD V<sub>1</sub> tasarımı için son modelin HTY değeri sayısal olarak 245,53 Nm/L hesaplanmıştır. Yalnızca aktif hacim için yapılan çözümlenmelere göre, HTY değeri %9 azalma göstermektedir. Yapısal destek parçaları ve yataklama elemanlarının manyetik alan üzerindeki negatif etkisi tespit edilmiştir. Tasarımda, yalnızca gerekli durumlarda ferromanyetik malzeme kullanımı tercih edilmiştir (Şekil 2.33).



**Şekil 2.33.** AKHD-2 MD V<sub>1</sub> 3B modeli (gerçek model)

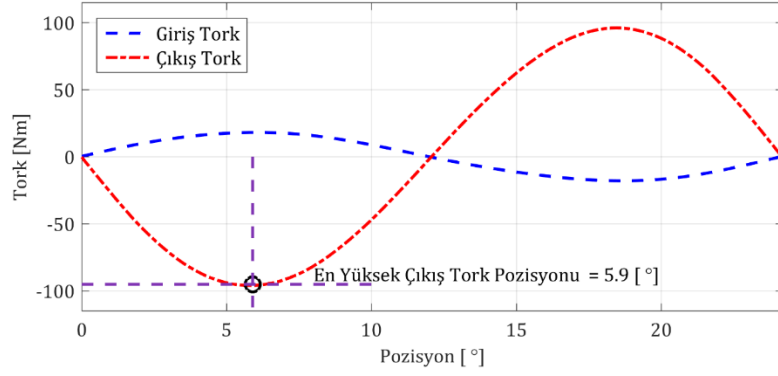
AKHD-2 MD V<sub>1</sub> tasarımının nihai halinin elde edilmesiyle MD V<sub>2</sub> tasarımının performansa etkisi incelenmiştir. MD V<sub>2</sub> tasarımında 2B ESA için sadece malzeme değişikliği gerçekleştirilerek çözümlene yapılmış ve 305,03 Nm/L HTY değeri elde edilmiştir. MD V<sub>1</sub> tasarımına göre malzeme değişikliği HTY değerini %0,95 arttırmıştır. Şekil 2.28’de verilen MD V<sub>2</sub> tasarımının 3B ESA modeline aktarılması ile tekrar çözümlene gerçekleştirilmiş ve %2,8 artış ile 252,41 Nm/L HTY değeri elde edilmiştir. Bu doğrultuda, AKHD-2 MD V<sub>2</sub> tasarımında kullanılan laminasyonlu M235-35A malzemenin ESA sonuçlarına olumlu etkisi gözlemlenmiştir.

**Tablo 2.15.** 2B ile 3B MD tasarım sonuçlarının karşılaştırması

Parametre	Tasarım				Birim
	AKHD-2				
	2B		3B		
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	
Giriş Tork	18,02	18,21	14,7	15,1	Nm
Çıkış Tork	-96,06	-97,1	-78,1	-80,3	Nm
Aktarma Oranı	~5,33	~5,33	~5,32	~5,33	-
OR Malzemesi	1018	M235-35A	1018	M235-35A	
HTY	302,11	305,03	245,53	252,41	Nm/L

#### 2.4. Yapısal Sayısal Analiz

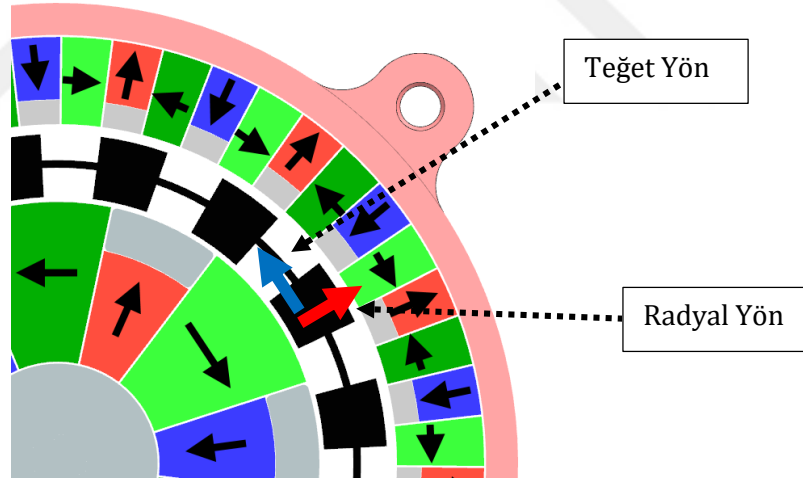
AKHD-2 MD’nin elektromanyetik tasarımı ve mekanik modellemesi tamamlandıktan sonra, mıknatısların oluşturduğu kuvvetler ESA çözümlenmeleri ile hesaplanmış ve MD yapısal davranışı SEM kullanılarak incelenmiştir. ESA’dan elde edilen model için en yüksek tork değeri, Şekil 2.34’te gösterildiği gibi 5,9° olarak belirlenmiş ve bu pozisyonda elde edilen kuvvetler kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.34. AKHD-2 MD tasarımı için en yüksek çıkış tork pozisyonunun gösterimi

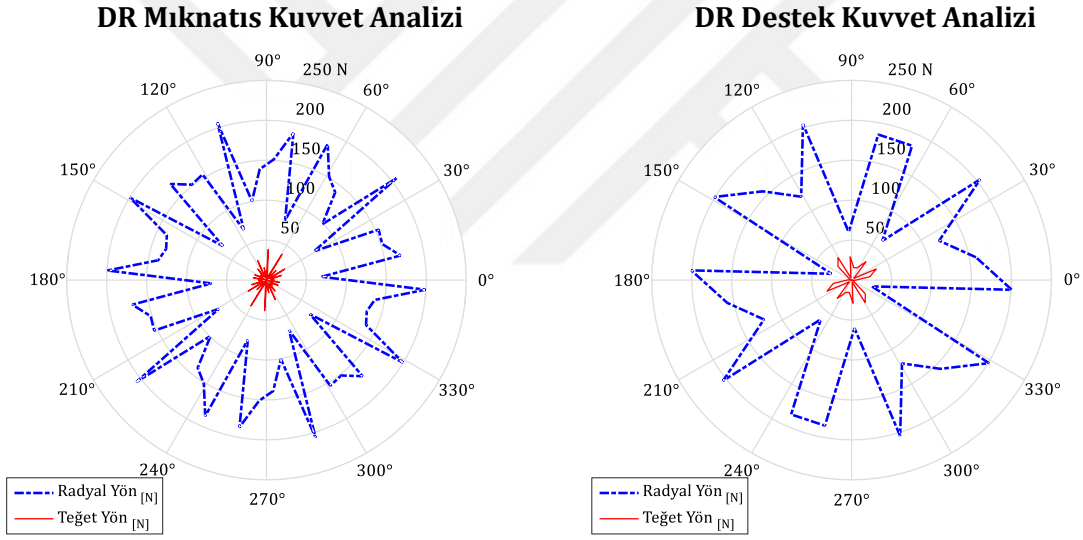
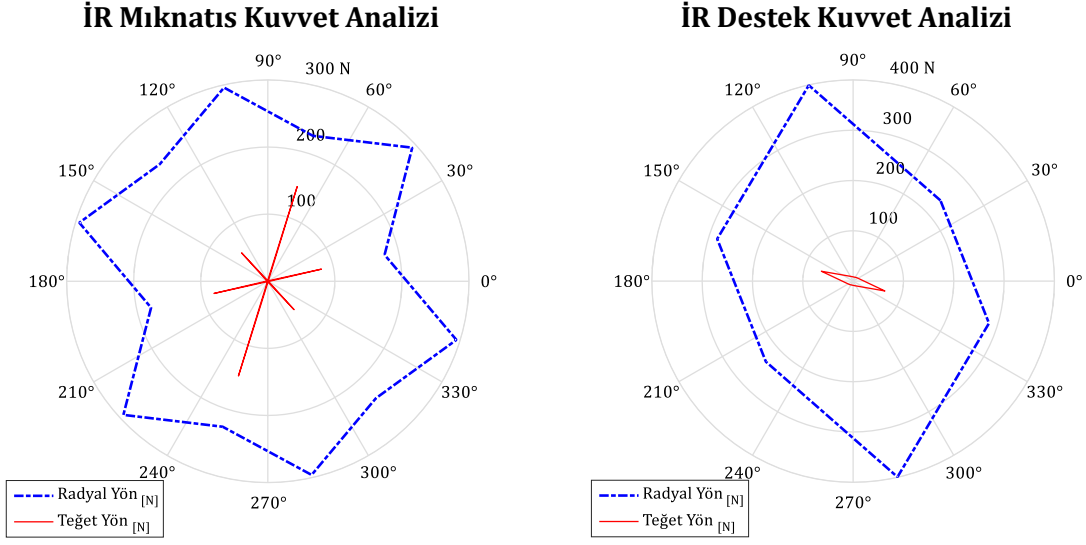
#### 2.4.1. Kuvvet analizi

Mıknatısların oluşturduğu manyetik alan, kuvvete dönüşerek güç iletimini sağlar. Bu yükleri oluşturan her bir mıknatısın oluşturduğu kuvvetlerin radyal ve teğetsel bileşenleri, elektromanyetik analizlerle hesaplanmıştır. Mıknatısların maruz kaldığı yüklerin yönleri, Şekil 2.35'te RY ve TY olarak belirtilmiş ve pozitif (+) yön olarak kabul edilmiştir.



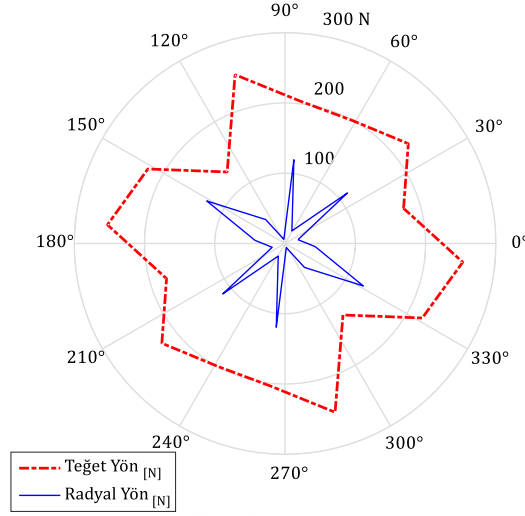
Şekil 2.35. Elektromanyetik analizde hesaplanan kuvvet yönlerinin gösterimi

AKHD-2 MD tasarımınının 2B ESA modeli kullanılarak kuvvet hesaplamaları yapılmıştır. Bu noktada, 2B analiz sonuçlarından 3B analizlerden daha yüksek çıkış torku elde edildiği için, tasarımın güvenli tarafta kalmasını sağlamak amacıyla 2B analiz sonuçları kullanılarak kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir. İR ve DR mıknatısları ve desteklerine manyetik alanın etkisiyle hem teğetsel (TY) hem de radyal (RY) yönde gelen kuvvetler Şekil 2.36 ve Şekil 2.37'de gösterilmiştir.



DR ve İR arasındaki manyetik alanın etkisiyle, OR'de oluşan kuvvetler Şekil 2.38'de gösterilmiştir. OR'ye gelen teğetsel yüklerin kuvvet boyları ile çarpımından hesaplanan değerler, çıkış tork yükü hakkında ipuçları sağlamaktadır. Tasarımdaki çıkış torkunun doğruluğu, 2B ESA ile hesaplanan kuvvetlerle karşılaştırılarak teyit edilmiştir.

### OR Kuvvet Analizi

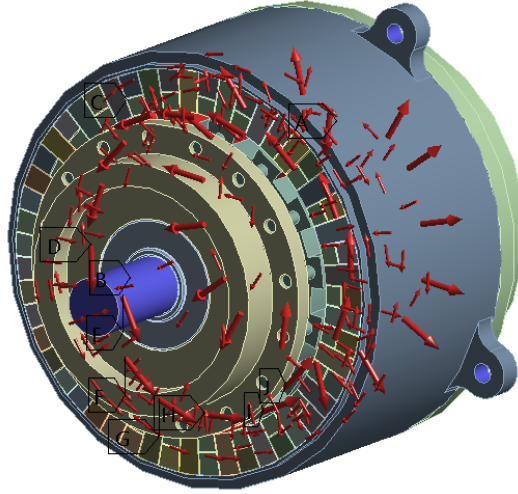


**Şekil 2.38.** OR kuvvet analizi

Grafiklerden de görülebileceği gibi, İR, OR ve DR'ye gelen yükler periyodik olarak tekrarlanmaktadır. DR ve İR'deki RY kuvvet büyüklüğü, TY ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksektir ve bu durum yataklama elemanlarının seçiminde dikkate alınmıştır.

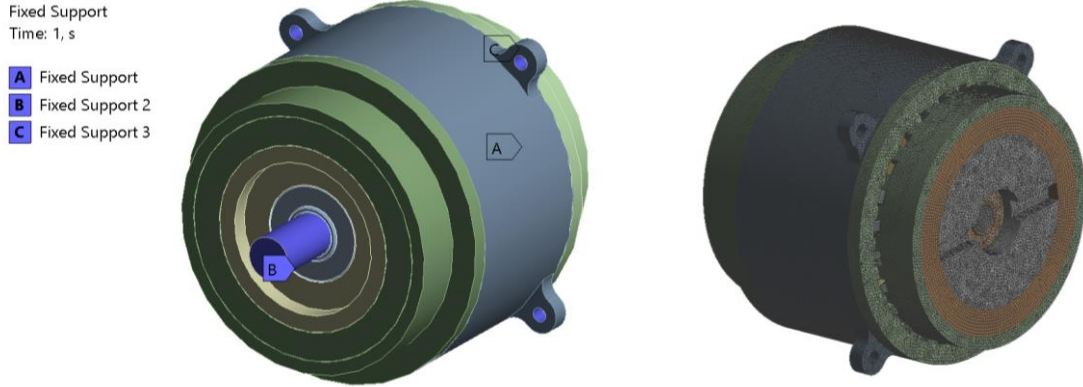
#### 2.4.1. Yapısal analiz

MD mekanik parçalarının üretimi öncesinde, 3B model ANSYS Workbench® ortamına aktarılmış ve SEM ile sayısal analiz yöntemi kullanılarak yapısal davranış incelenmiştir. İlk olarak, MD'nin en yüksek çıkış torkunun elde edildiği Şekil 2.3'te belirlenen pozisyonu referans alınarak, Şekil 2.36, Şekil 2.37 ve Şekil 2.38'deki kuvvetler, Şekil 2.39'da belirtilen şekilde modelde tanımlanmıştır. Tablo 2.15'te verilen çıkış torku değerleri incelendiğinde, 2B ve 3B modelleri arasında önemli farklar görülmektedir. Bu nedenle, güvenli tarafta kalabilmek adına 2B ESA sonuçları ile elde edilen kuvvetler yapısal analize dahil edilmiştir. MD tasarımı için  $V_1$  ve  $V_2$  senaryoları kullanılarak, kuvvetin en yüksek hesaplandığı  $V_2$  tasarımından alınan 2B verileri yük senaryosu belirlenmiştir.



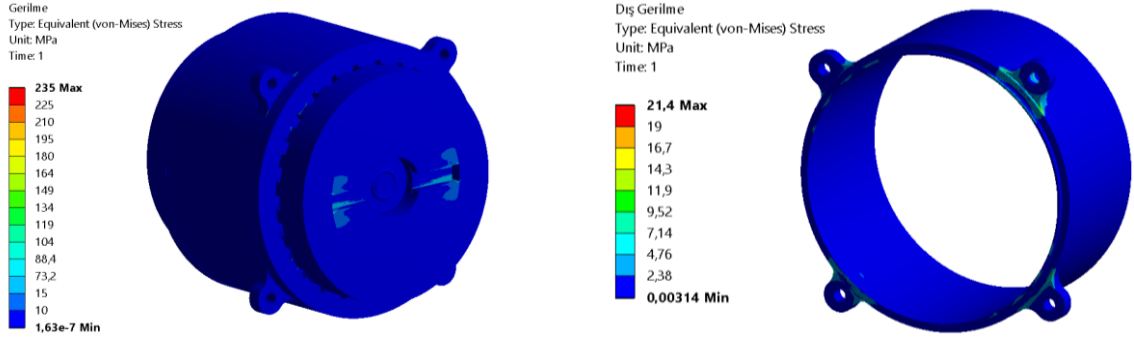
**Şekil 2.39.** MD üzerine etkiyen kuvvet tanımlaması

3B MD modelinde, DR bağlantı noktaları, İR giriş ve OR çıkış kısmı sabit kabul edilerek sayısal analiz modeline sınır koşulları olarak tanımlanmıştır. DR-OR ve OR-İR arasında dönüş hareketine izin verilmiştir. Şekil 2.40'ta gösterildiği gibi, en düşük kalınlıkta en az 3 eleman olacak şekilde 0,2 mm'lik tetrahedral ince ağ yapısı seçilmiş ve çözümün yeterli hassasiyetle ve gerçeğe yakın bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır.



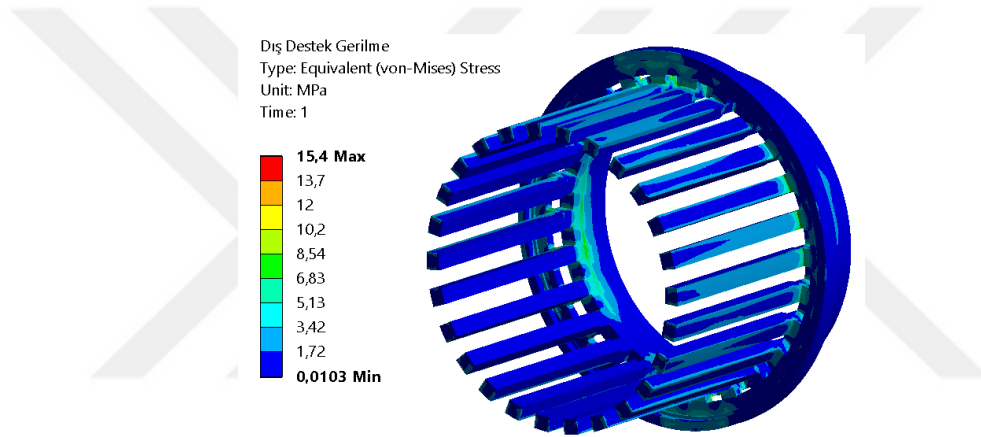
**Şekil 2.40.** Manyetik dişli tasarımı ve ağ yapısı

Analiz sonuçları değerlendirilmeden önce giriş ve çıkış bölgelerine gelen tork yüklerinin ESA sonuçları ile uyumlu olduğu teyit edilmiştir. Şekil 2.41'de gösterilen 3B ana gövdede noktasal olarak en yüksek 235 MPa, dış bağlantı deliklerinin bulunduğu bölgelerde ise en yüksek 21,4 MPa gerilme hesaplanmıştır.



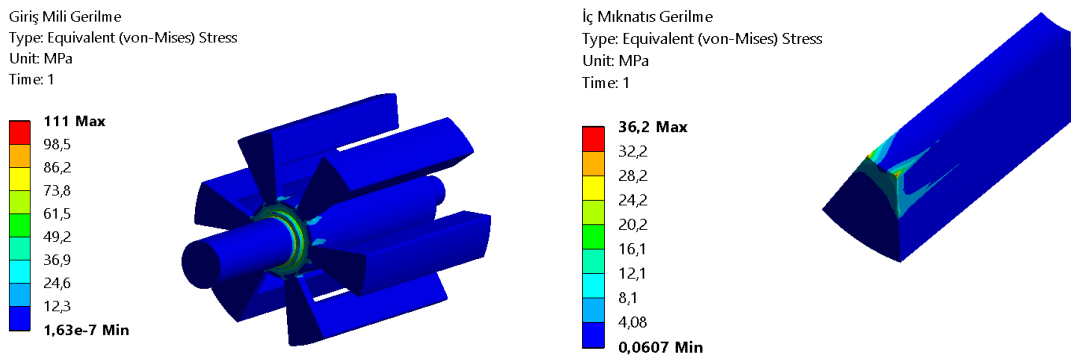
Şekil 2.41. MD ve dış çerçeve sayısal analiz sonuçları

Şekil 2.42’de gösterilen dış destek parçasında maksimum 15,4 MPa gerilme hesaplanmıştır.



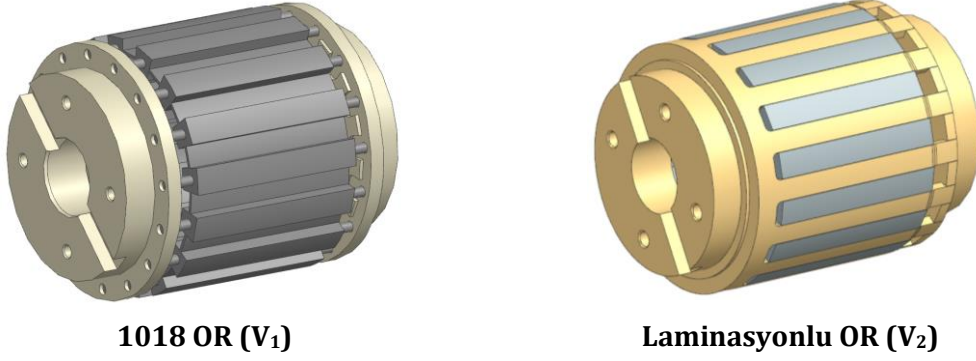
Şekil 2.42. Dış destek sayısal analiz sonucu

Giriş mili parçasında MD giriş tarafı ile mıknatısların yapıştırıldığı bölge arasında en yüksek 111 MPa, giriş miline bağlı olan bir mıknatısta ise en yüksek 36,2 MPa gerilme meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.43).



Şekil 2.43. Giriş mili ve mıknatıs sayısal analiz sonucu

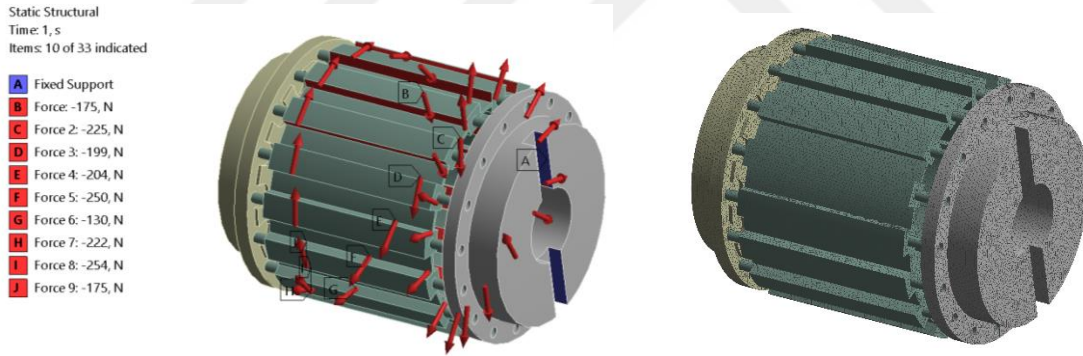
MD  $V_1$  ve  $V_2$  tasarımları Şekil 2.44'te gösterilmiştir. Katı modellerinin birbirinden farklı olmasından dolayı yapısal analiz bu kısımda ikiye ayrılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 2.44. Manyetik dişli  $V_1$  ve  $V_2$  tasarımları

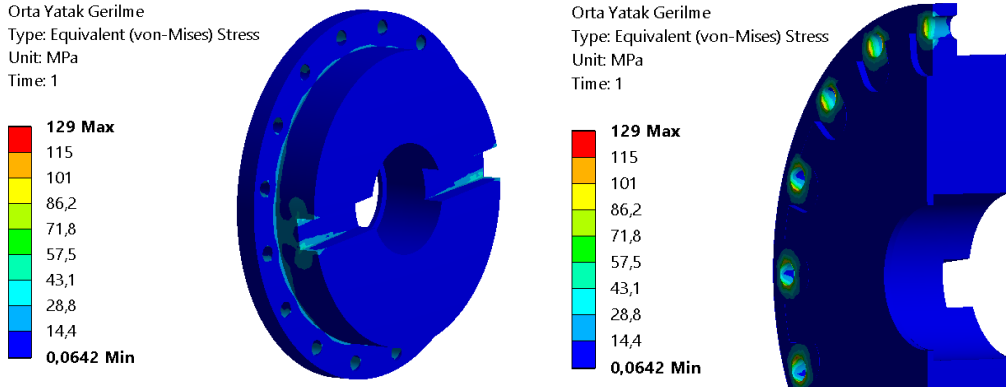
#### 2.4.1.1. OR $V_1$

MD  $V_1$  için tanımlanan kuvvetler ve çözüm ağı Şekil 2.45'te gösterilmiştir.



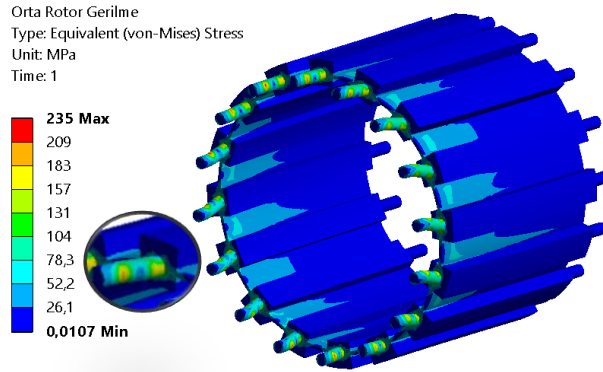
Şekil 2.45. AKHD tip MD  $V_1$  tasarımı OR kuvvet ve ağı gösterimi

OR  $V_1$  tasarımında çıkış tarafındaki orta yatak destek parçasına giren 16 adet pim yuvasında gerilme seviyelerinin benzer olduğu Şekil 2.46'dan görülmektedir. Şekil 2.46'da gösterildiği gibi bu yapıda en yüksek 129 MPa gerilme meydana gelmiştir.

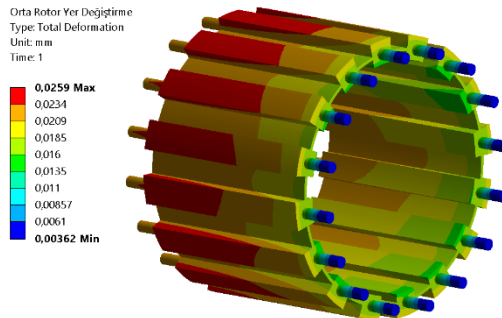


Şekil 2.46. OR V<sub>1</sub> destek parçası

Tekil yük tanımlamasına bağlı gerilme yığılmaları göz ardı edildiğinde, analiz sonuçları en yüksek gerilmelerin (157-183 MPa) 16 adet olan Ø3'lük pimlerin dip bölgelerinde meydana geldiğini göstermiştir (Şekil 2.47). OR malzemesi olarak ferromanyetik özellikli AISI 1018 kullanılmıştır. Bu malzemenin akma dayanımının 300-350 MPa (Aytaç ve ark., 2018) olduğu dikkate alındığında emniyet faktörünün gerilmeler yönünde 2'nin üzerinde tespit edilmiştir. Ayrıca, OR V<sub>1</sub> tasarımında en yüksek yer değıştirme 0,026 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 2.48).



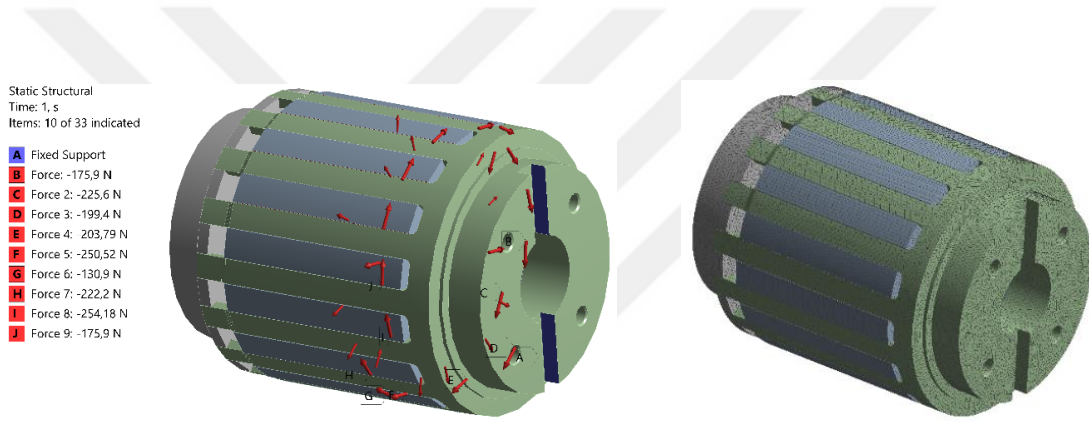
Şekil 2.47. OR V<sub>1</sub> gerilme sayısal analiz sonucu



Şekil 2.48. OR V<sub>1</sub> yer değıştirme sayısal analiz sonucu

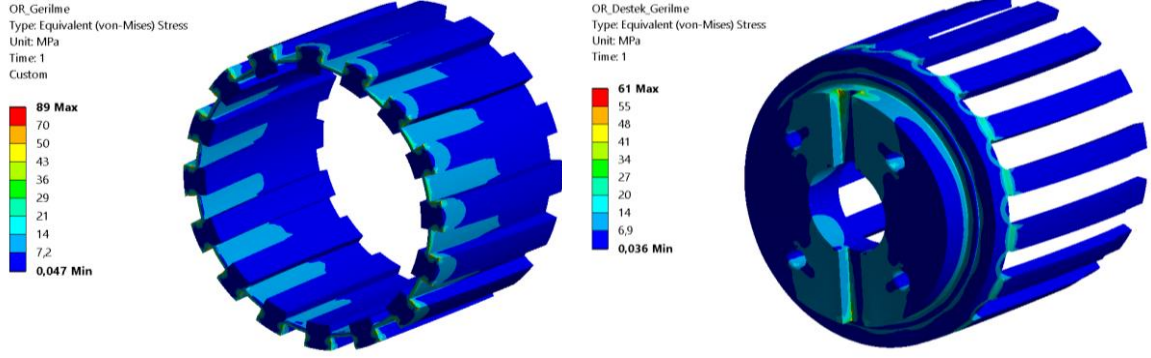
#### 2.4.1.2. OR V<sub>2</sub>

OR V<sub>1</sub> tasarımında manyetik alanın meydana getirdiği tüm kuvveti pimler taşıırken, OR V<sub>2</sub> tasarımında katmanlı laminasyon yapısının tork yönünde rahatlıkla ayrılabilceği düşünülerek tork yükünü taşıyabilen destekli OR V<sub>2</sub> tasarımı geliştirilmiştir (Şekil 2.49). Ancak, destek parçasının manyetik alana olumsuz bir etkisinin olmaması için, çelik gibi yüksek mukavemeti olmakla birlikte Fe içermeyen özel alaşımlı alüminyum AA 6061 malzeme kullanılmıştır. Tasarlanan bu destek malzemesi, 2B ESA ile tekrar incelenmiş ve performansa olumsuz bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu noktada, OR V<sub>2</sub> tasarımının yapısal davranışı yalnızca bu değişen parçalar ile değerlendirilmiştir. Çıkış kısmına bağlanan bölge, Şekil 2.49'daki gibi sabitlenmiş ve 2B ESA'dan elde edilen kuvvetler, Şekil 2.38'deki gibi radyal ve teğetsel olarak modelde tanımlanmıştır. Şekil 2.49'da gösterilen ağ yapısı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

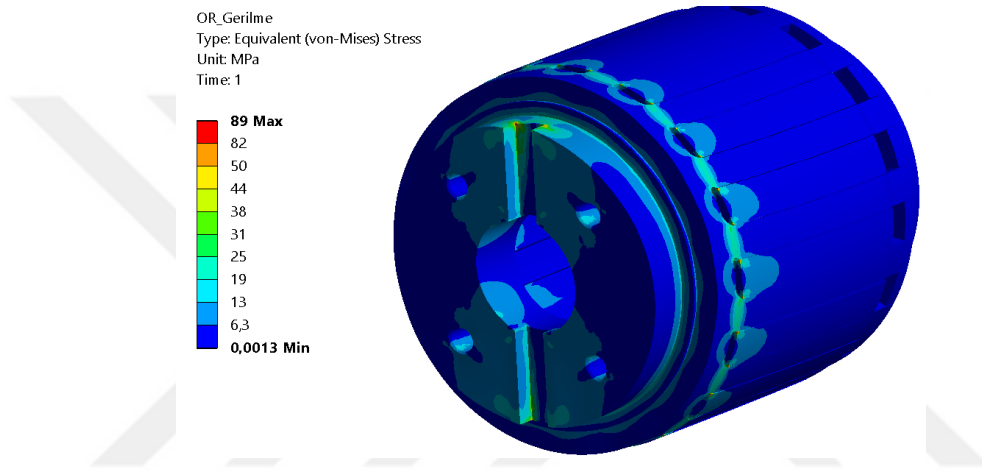


Şekil 2.49. AKHD tip MD V<sub>2</sub> tasarımı OR kuvvet ve ağ yapısı gösterimi

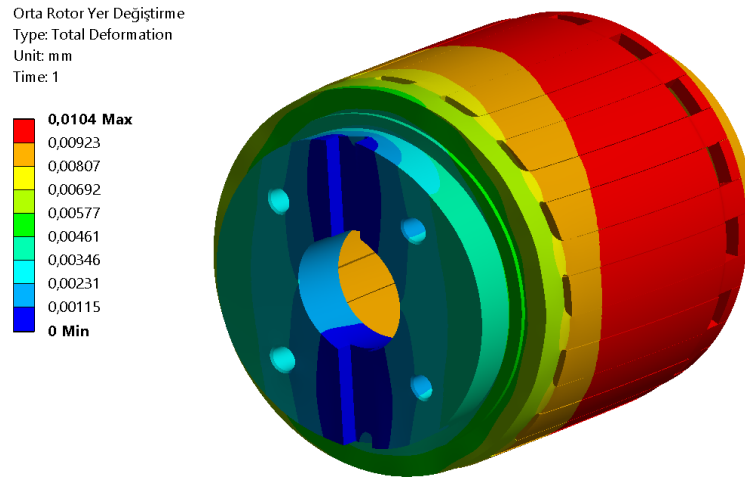
OR V<sub>2</sub> tasarımında, OR ile destek parçası birbirine yapıştırılmış olarak kabul edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, tekil yük dağılımına bağlı gerilme durumu göz ardı edildiğinde, en yüksek gerilmelerin (60-70 MPa) destek malzemesinin sabit olarak tanımlanan kısmında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 2.50 ve Şekil 2.51'de verilen sayısal analiz sonuçlarına göre, malzemede oluşan gerilme, bir önceki V<sub>1</sub> tasarımına göre azalmış olup, en yüksek gerilme 89 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca OR V<sub>2</sub> tasarımında en yüksek yer değiştirme 0,02 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 2.48).



Şekil 2.50. OR laminasyonlu ve destek parçası yapısal analiz sonucu



Şekil 2.51. OR V<sub>2</sub> gerilme sayısal analiz sonuçları



Şekil 2.52. OR V<sub>2</sub> yer değişim sayısal analiz sonuçları

Tablo 2.16’da MD bileşenlerinde meydana gelen en yüksek gerilmeler ve malzemelerin akma dayanımları (Anonim, 2024b; Anonim, 2024c; Anonim, 2024f) dikkate alınarak hesaplanan emniyet katsayıları özet şekilde sunulmuştur.

**Tablo 2.16.** Gerilme sonuçları ve emniyet katsayıları

<b>Parça Adı</b>	<b>Malzeme</b>	<b>Akma Dayanımı [MPa]</b>	<b>En yüksek Gerilim [MPa]</b>	<b>Emniyet Katsayısı</b>
Dış Çerçeve	1018	300	21,4	14,01
Dış Destek	1018	300	15,4	19,48
Giriş Mili	1018	300	111	2,71
Mıknatıs	NdFeB	80	36,2	2,2
OR V <sub>1</sub>	1018	300	170	1,76
Orta Yatak	AA6061-T6	276	129	2,14
OR V <sub>2</sub>	M235-35A	410	89	4,6
OR V <sub>2</sub> Destek	AA6061-T6	276	61	4,52

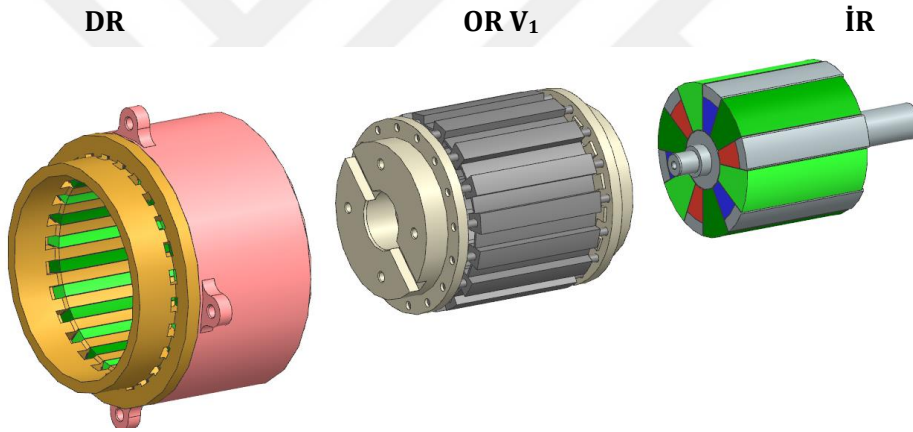
### 3. BÖLÜM

#### ÜRETİM ve MONTAJ

Bu bölümde, MD katı modeline ait teknik veri paketinin hazırlanması ve üretim süreci ele alınmıştır. Mıknatısların oluşturduğu güçlü manyetik çekim alanları nedeniyle, montaj aşamasında plastik veya alüminyum alaşımlı aparatlar kullanılarak destek sağlanmış ve güvenli bir montaj işlemi gerçekleştirilmiştir. MD  $V_1$  ve  $V_2$  için gerekli olan OR tasarımları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve her iki versiyonun da üretim ve montaj süreçleri tamamlanmıştır.

#### 3.1. AKHD-2 tip MD $V_1$ Tasarımının Prototip Üretimi

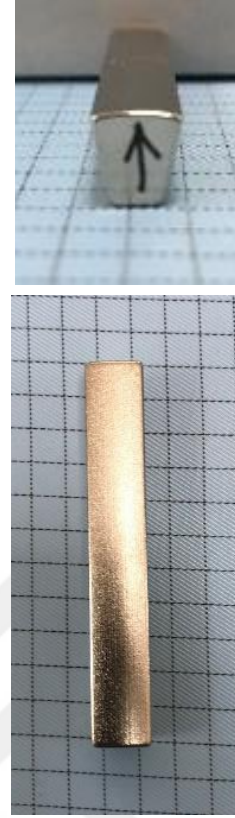
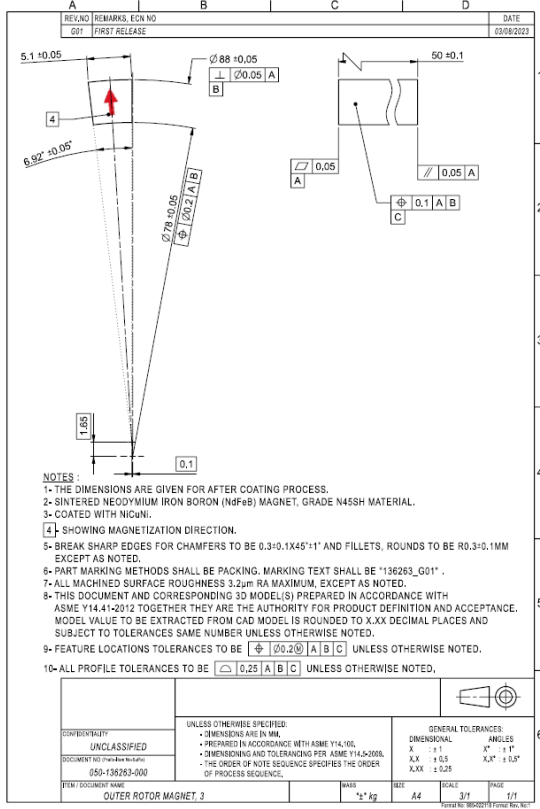
Bu bölümde, AKHD-2 tip MD  $V_1$  tasarımının üretim ve bütünleştirme aşamaları sunulmuştur. Üç ana bölümden (İR, OR ve DR) oluşan AKHD-2 tip MD  $V_1$  tasarımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. AKHD-2 tip MD  $V_1$  tasarımının 3B katı modeli

#### 3.1.1. Manyetik dişlide kullanılan mıknatıslar

MD için özel tasarlanmış beş tip mıknatısın üretim teknik resimleri ASME standardına göre çizilmiş ve yurtdışından tedarik edilmiştir. N45SH kodunda tedarik edilen mıknatısların kalite kontrol formları incelenip istenilen ölçü ve değerlere sahip oldukları test raporlarından öncelikli olarak teyit edilmiştir. Ayrıca, EK-1'de kalite kontrol raporu sunulan mıknatısların Şekil 3.2'de gösterilen mıknatıs kutup yönlerini, mıknatıs seviyelerini ve geometrik gereksinimleri karşıladığı doğrulanmıştır.

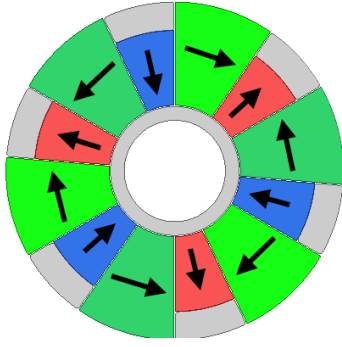


**Şekil 3.2.** Radyal yönlü bir mıknatısın teknik resmi ve görüntüsü

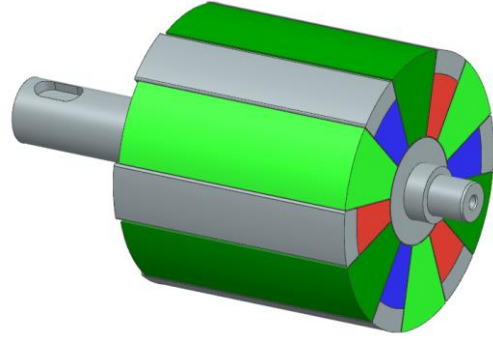
Mıknatısların yapıştırılması ve yarı mamul malzemelerin montajlanıp MD tasarımının oluşturulabilmesi için çeşitli aparatlar kullanılmıştır. Montaj sürecinde özellikle çelik ve türevi masa, alet, pres ve elektronik cihazlar kesinlikle çalışma alanında bulundurulmamıştır. Yüksek mıknatıs seviyeleri, çalışma alanının düzenini de etkilemektedir. Özellikle, yüksek çekim kuvvetine sahip İR'ye bağlanacak teğetsel mıknatısların bütünleştirilmesi sırasında, çarpma ve kırılma risklerinin önlenmesi için gerekli önlemler alınmış olup iş sağlığı ve güvenliği en üst düzeyde sağlanmıştır. Bu süreçte, tahta, polyamid veya alüminyum aparatlar kullanılarak montaj işlemi kolaylaştırılmış ve potansiyel tehlike riskleri azaltılmıştır.

### 3.1.2. Giriş kısmı (İR)

İR, mıknatıslar ve giriş mili olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 3.3'te gösterilen mıknatıs yönleri dikkate alınarak, giriş miline montaj için mıknatısların manyetik yönleri tanımlanmıştır. Giriş mili ile mıknatıslar arasındaki bağlantı, yapısal yapıştırıcı kullanılarak sağlanmıştır.



Mıknatıs yön ve konumları



Giriş mili ve mıknatıslar

**Şekil 3.3.** AKHD-2 tip MD'nin İR kısmı

Mıknatısların yüksek manyetiklik seviyelerinin montaj sürecinde zorluklara yol açabileceği öngörülmüştür. Yapıştırıcının hızlı kürleşme sürecinde üniform kalınlıklı ve hassas bir bağlantının oluşturulması zor olduğundan, mıknatısların tek tek yapıştırılması yerine montaj aparatları tasarlanarak bu işlem gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4).



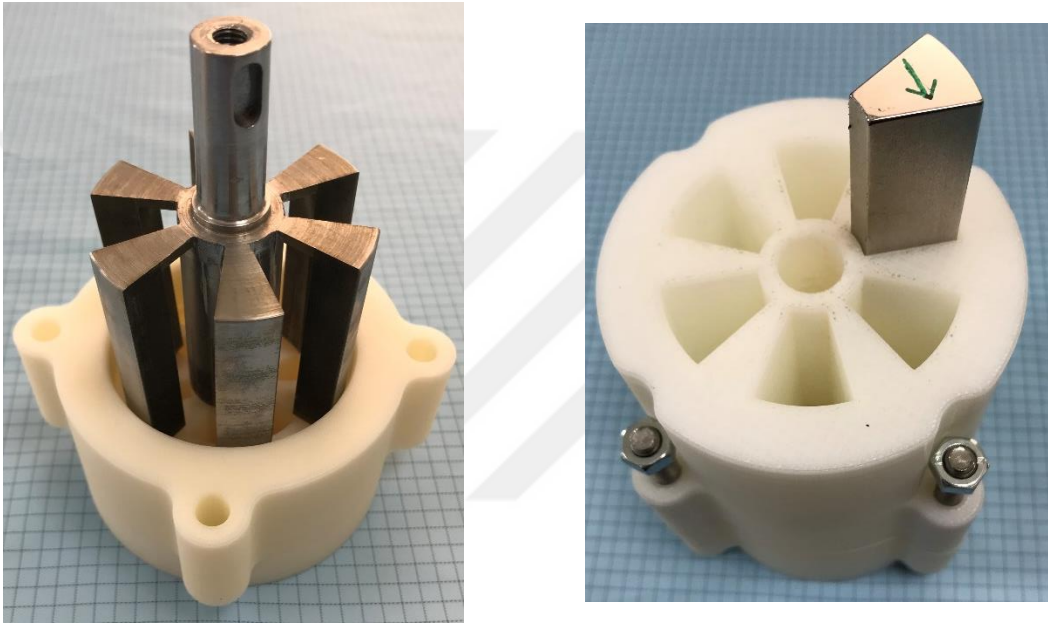
**Şekil 3.4.** MD İR montajı için mıknatıs tutma aparatı

Mıknatısların AISI 1018 malzemeden imal edilen giriş miline sabitlenebilmesi için, literatür uygulamaları dikkate alınarak Şekil 3.5'te gösterilen Araldite 2015-1 yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır (Wong ve ark., 2020).



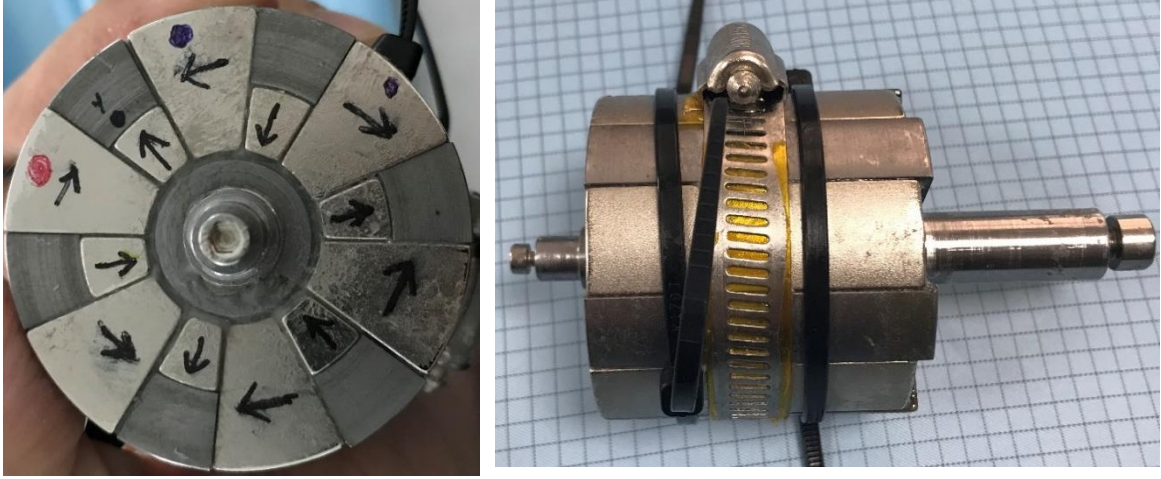
**Şekil 3.5.** Araldite 2015-1 yapısal yapıştırıcı

Mıknatısların giriş miline kolayca yerleştirilebilmesi amacıyla, Şekil 3.6'da gösterilen aparatların tasarımı yapılmış ve 3B yazıcıda üretilmiştir. Önceden belirlenen mıknatıs yönleri doğrultusunda 6 adet RY ve 6 adet TY yönlü mıknatıs, alkol ile temizlendikten sonra birbirine zarar vermemesi için ayrı bölmelerde istiflenmiştir. Giriş milinin tüm yapışma yüzeylerine ilgili yapıştırıcı sürülerek kısa bir süre (8-10 dakika) içinde 11 adet mıknatıs, Şekil 3.3'te gösterilen yönlerle dikkat edilerek aparata yerleştirilmiş ve montaj yapılmıştır. 12. mıknatıs ise, diğer 11 mıknatısın manyetik alanının ters yönde kuvvet oluşturmasından dolayı, pres yardımıyla kuvvet uygulanarak yerine yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.6.** Giriş mili mıknatıs montajlama aparatı

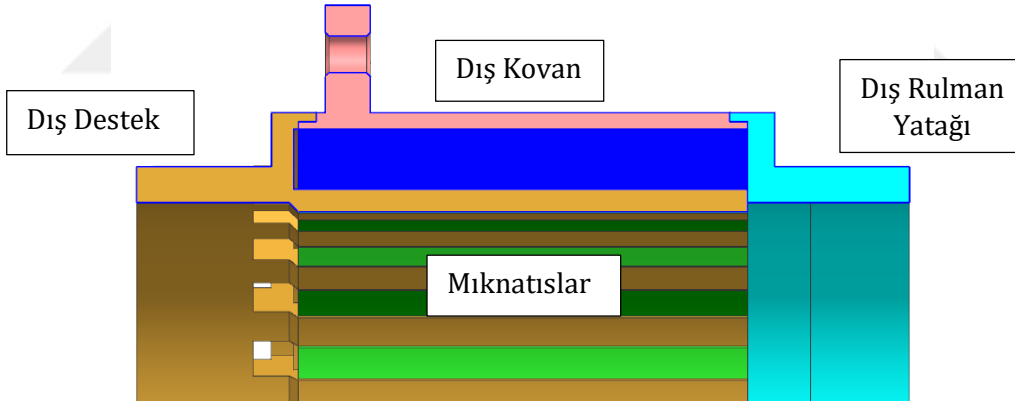
Giriş miline tüm mıknatıslar yerleştirildikten sonra, aparatın ortasına, içi yapışmayan sarı kapton bant ile sarılı bir boru kelepçesi geçirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Aparatlar çıkarıldıktan sonra, diğer boş kalan bölgelere plastik kelepçeler takılarak bütünlüğün bozulmaması sağlanmıştır. Ardından, yapıştırıcının fazla kısımları toz bırakmayan bir bezle temizlenmiş ve oda koşullarında kürlenmeye bırakılmıştır. Bir gün sonra kelepçeler çıkarılmış ve fazlalık bölgeler tekrar temizlenmiştir. Şekil 3.7'de montajlanan mıknatıslar manyetik yönleri ile birlikte gösterilmiştir.



**Şekil 3.7.** Giriş mili ve mıknatısların montajlanarak kutup yönlerinin gösterimi

### 3.1.3. Dış kısım (DR)

DR'nin ana bileşenlerini Şekil 3.8'de gösterildiği üzere dış kovan, dış destek yatağı, dış rulman yatağı ve 52 adet mıknatıs oluşturmaktadır.



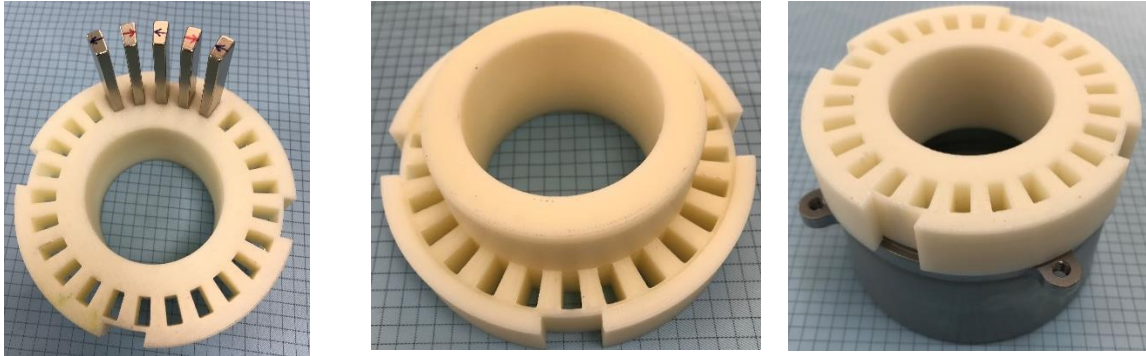
**Şekil 3.8.** AKHD-2 MD'de DR'nin bileşenleri

Mıknatısların montaj sürecinde öncelikle yapıştırılacak bütün parçalar alkol ile temizlenerek kir ve yağdan arındırılmıştır. Dış kovan, dış destek yatağına Şekil 3.9'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



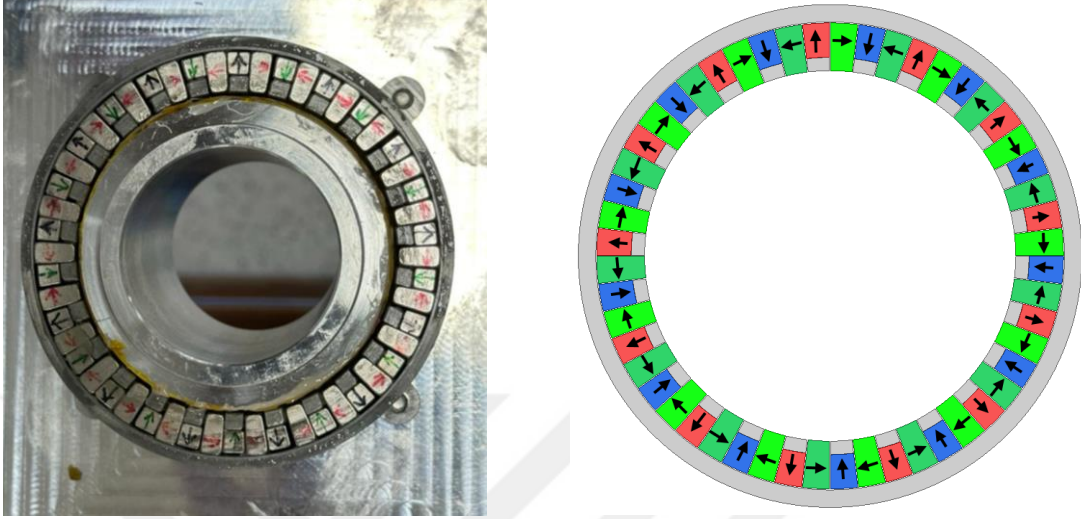
**Şekil 3.9.** DR’de sabit bulunan dış kovan ve dış destek montajı

Dış kovan 4 delikten masaya sabitlenerek hareket etmesi engellenmiştir. İlk olarak 26 teğetsel mıknatis, yönlerine dikkat edilerek Şekil 3.10’daki aparata yarım olarak geçirilmiştir. Dış kovan ile dış destek yatağının mıknatis ile temas edecek bütün bölgelerine yapıştırıcı sürülmüş ve 15 dk içinde 52 mıknatısın yerleşimi tamamlanmıştır. Bu noktada, yapıştırıcı sürülmesi ile ilk 26 adet TY mıknatıs hızlı şekilde yerine yerleştirilmiş, ardından aparat aynı ekseninde küçük mıknatıs bölgesine göre döndürülmüş ve diğer 26 adet RY mıknatısların yerleşimi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.10.** DR mıknatıs aparatı yerleşimi

MD tasarımında belirlenen HD sırası ile uyumlu şekilde montajı yapılan mıknatısların son hali Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



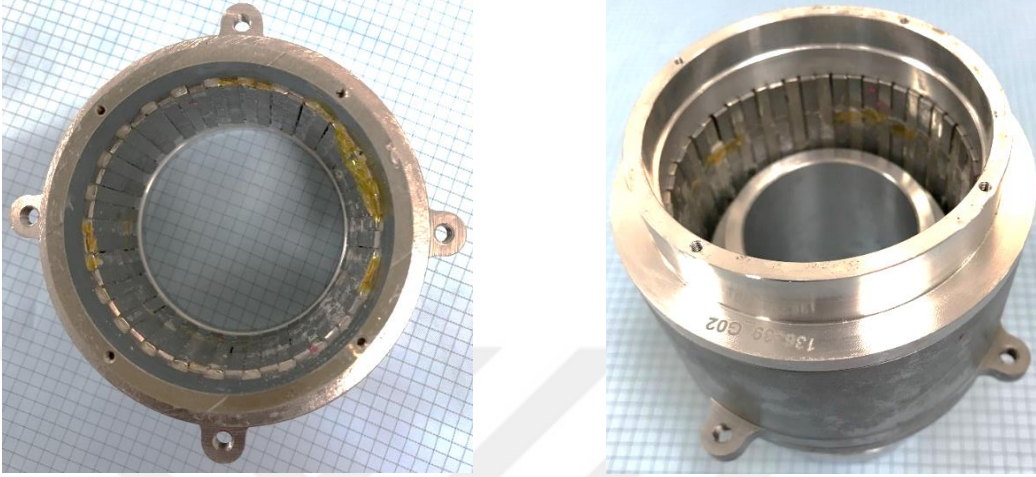
**Şekil 3.11.** MD tasarımında belirlenen AKHD ile uyumlu şekilde montajı yapılan DR

Mıknatıslar yerleştirilirken rulman merkezini bozmamak amacıyla orta kısma ayrı bir aparat yerleştirilmiştir. Aparatın yapışmaması için Şekil 3.12’de gösterilen bölgelere sarı kapton bant sarılmıştır. Aparatlar, önceden ısıtılmış 60°C sıcaklığındaki fırına yerleştirilerek 1 saat süreyle bekletilmiş ve kürleşmesi hızlandırılmıştır. Orta aparat her saat başı hareket ettirilerek yapışması engellenmiş ve 1 gün kürleşmenin ardından bu aparat sökülmüştür (Şekil 3.12). Bu işlemle, DR’nin iç çap ölçüsünün hedeflenen değerlerde elde edilmesi amaçlanmıştır.



**Şekil 3.12.** DR mıknatıslarının aparat ile montajlanması

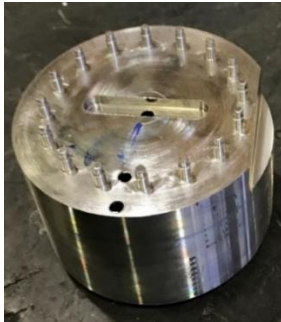
DR'den aparat çıkarıldıktan sonra dış rulman yatağı yerleştirilmiş ve her iki taraftan pres yardımıyla kademelerin tam yerleştiği teyit edilmiştir. Ardından, Şekil 3.13'te gösterilen şekilde temizleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.13. AKHD-2 tip MD için DR'nin nihai durumu

#### 3.1.4. Çıkış kısmı (OR V<sub>1</sub>)

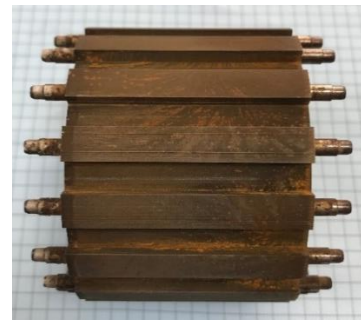
OR, MD'de manyetik alan etkisiyle güç aktarımı yapılan kritik bileşendir. OR V<sub>1</sub> tasarımı için AISI 1018 çelik malzemeden bloğun ilk olarak 32 adet pim kısımları hassas şekilde işlenmiş, ardından tel erozyon tezgahına bağlanarak uygun formun elde edilmesi için işlenmiştir. Bu noktada yavaş kesim uygulanarak geometrik sapmaların en aza inmesi amaçlanmıştır. Saf suda kesme işlemi yapıldığı için dış yüzeyinde paslanmalar meydana gelmiştir (Şekil 3.14).



Yarı mamul



Tam mamul



Şekil 3.14. AKHD-2 tip MD V<sub>1</sub> için OR üretimi

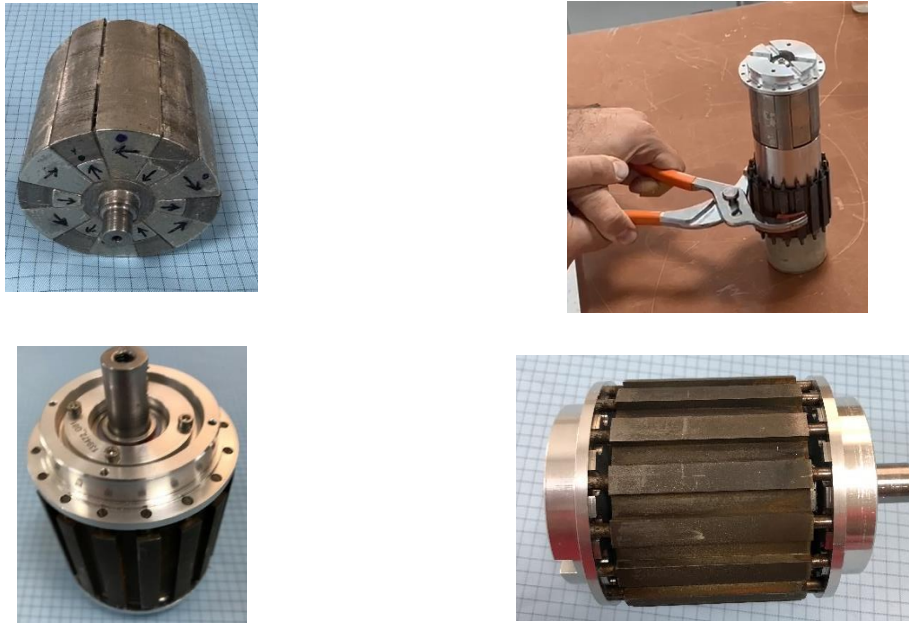
### 3.1.5. V<sub>1</sub> tasarım için montaj aşamaları

İR ve DR yarı mamul bütünleştirilmesinde ilk olarak OR ve İR arasındaki yataklamayı sağlayacak olan Şekil 3.15'teki parçalara rulmanlar geçirilmiş ve kapakları 8 adet DIN 912 M2,5x6 cıvata ile Loctite 243 sürülerek 1 Nm ile torkla sıkılmıştır.



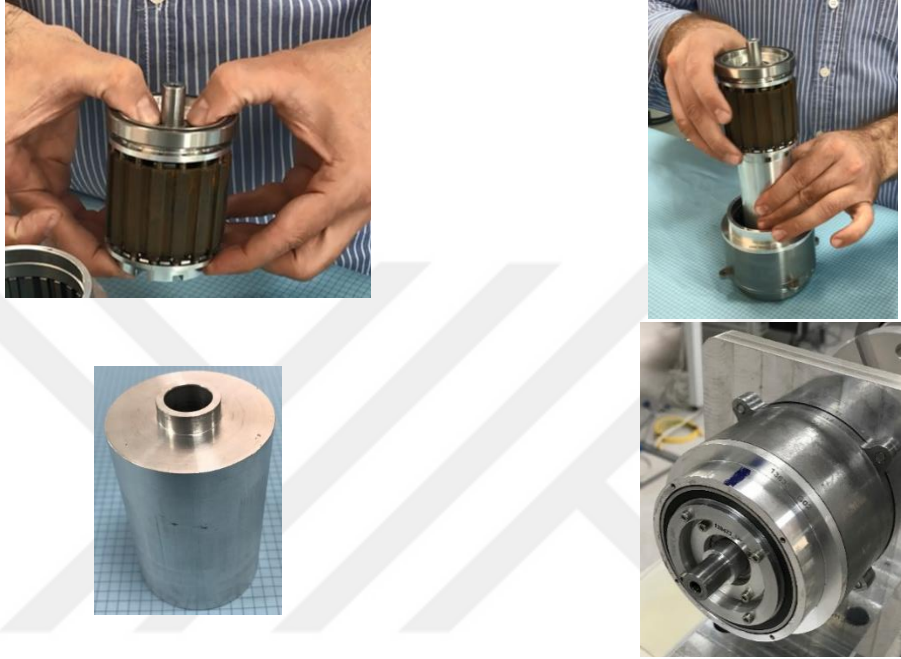
Şekil 3.15. OR ve İR arasında kullanılan rulmanların montajı

İR'ye ilk olarak giriş tarafındaki rulmanlı yatak birleştirilmiş ve ardından OR parçası mıknatısların çekim kuvveti ile kendini merkezleyerek Şekil 3.16'daki gibi yerleştirmiştir. Rulmanlı yataklarda bulunan 16 adet pim deliğine, Şekil 3.14'te gösterilen OR üzerindeki pimler yerleştirilerek merkezlenmiştir. Şekil 3.16'da gösterildiği gibi İR ile OR sorunsuz şekilde birleştirilmiş ve dönüşsel hareketin sorunsuz şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.



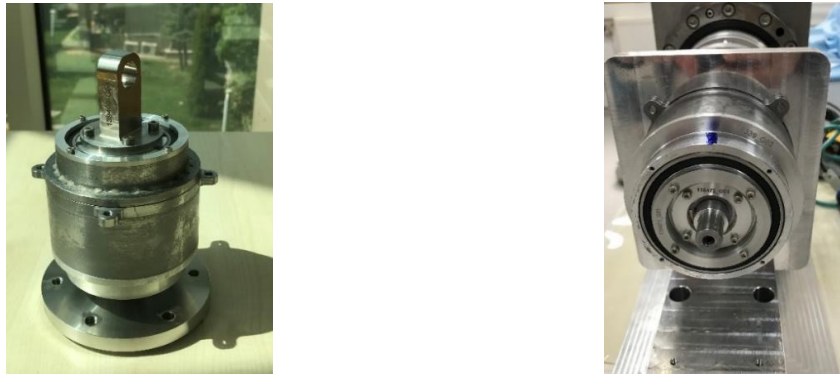
Şekil 3.16. AKHD-2 tip MD V<sub>1</sub> için İR ile OR'nin montajı

İR ve OR'nin birleştirilmesinin ardından, diğer rulman kapakları kapatılarak iç rotorun giriş tarafında bulunan dış rulman, boşluk olmayacak şekilde yerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.17). Ardından, diğer rulmanlı yatak iç kısmına bir aparat yerleştirilerek DR'ye merkezlenmiştir. DR yavaşça yaklaştırılmış ve çift rulman kendi kendine merkezlenerek yataklama sağlanmıştır. Rulman kapakları, aynı tip civatalar ile Loctite 243 sürülerek 1 Nm torkla sıkılmıştır.



Şekil 3.17. AKHD-2 tip MD V<sub>1</sub> tasarımında OR ile DR'nin montajı

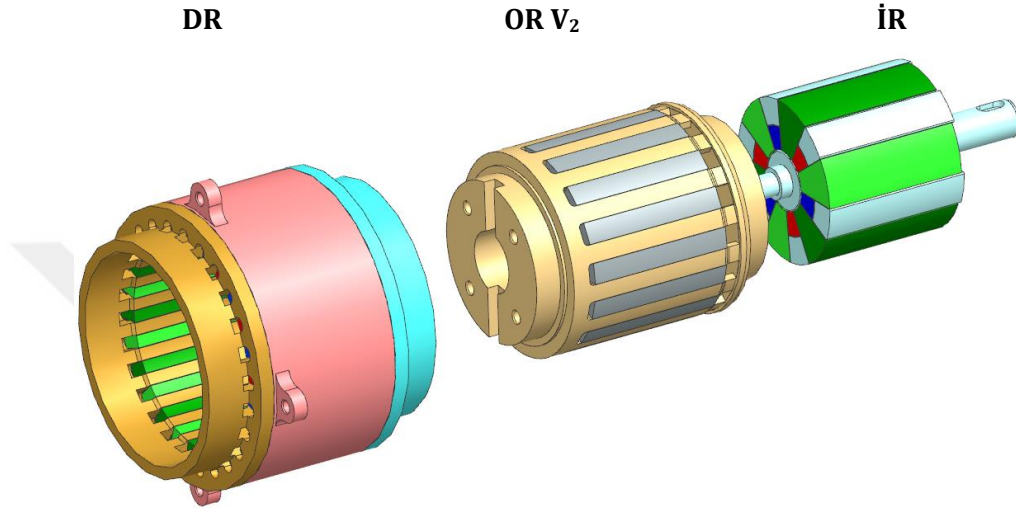
MD V<sub>1</sub> bütünleşmesi tamamlandıktan sonra ilk deneme olarak çıkış ve giriş kısımlarına yardımcı aparatlar takılarak MD giriş tarafından döndürülmüş ve herhangi bir zorlanma ya da sıkışma olmayıp sistemin sorunsuz çalıştığı tespit edilmiştir (Şekil 3.18). Böylece AKHD-2 MD V<sub>1</sub> tasarımının prototip imalatı tamamlanmıştır.



Şekil 3.18. AKHD-2 tip MD V<sub>1</sub> nihai prototipi

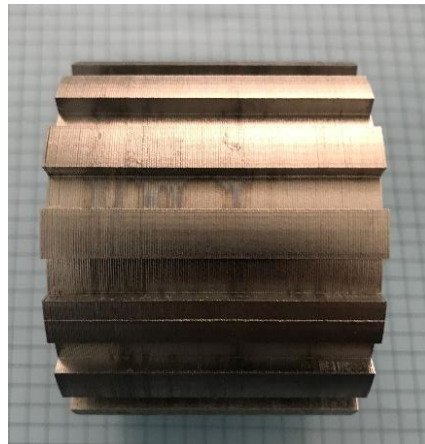
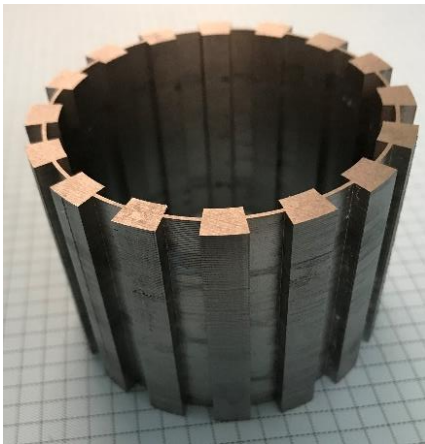
### 3.2. AKHD-2 tip MD V<sub>2</sub> Tasarımının Prototip Üretimi

AKHD-2 tip MD V<sub>1</sub> tasarımının ön performans testleri tamamlandıktan sonra V<sub>2</sub> tasarımı için MD V<sub>1</sub> sökülmüş ve sadece çıkış kısmındaki OR yapısı Şekil 3.19'daki gibi güncellenmiştir. V<sub>1</sub> tasarımı gibi üç ana bölümden (İR, OR ve DR) oluşan AKHD-2 tip MD V<sub>2</sub> tasarımı Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



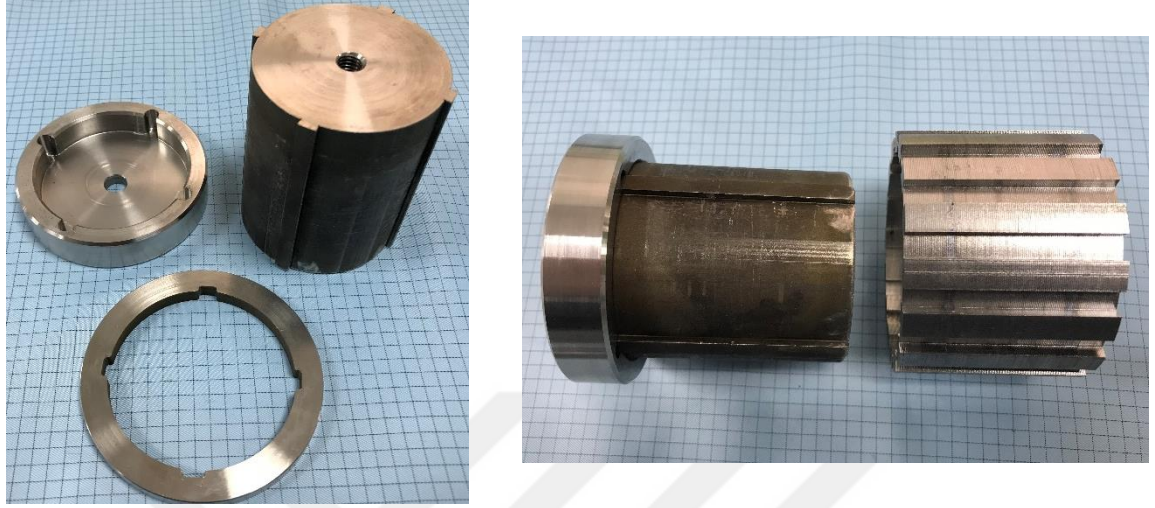
Şekil 3.19. AKHD-2 tip MD V<sub>2</sub> tasarımının 3B katı modeli

MD V<sub>2</sub> tasarımı için laminasyonlu elektrik çeliğinden OR kısmının üretimi katmanlı sac üretimi yapabilen yerli bir firma ile ortak çalışılarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, 50 mm uzunluğunda tasarlanan OR, 0,35 mm kalınlığında 143 adet M235-35A (EK-2) kalitesinde sac kullanılarak üretilmiştir. Hassas lazer kesimle elde edilen saclara Loctite 4062 yapıştırıcı sürülüp bu saclar yardımcı aparat ile Şekil 3.20'deki gibi dizilerek birleştirilmiştir.



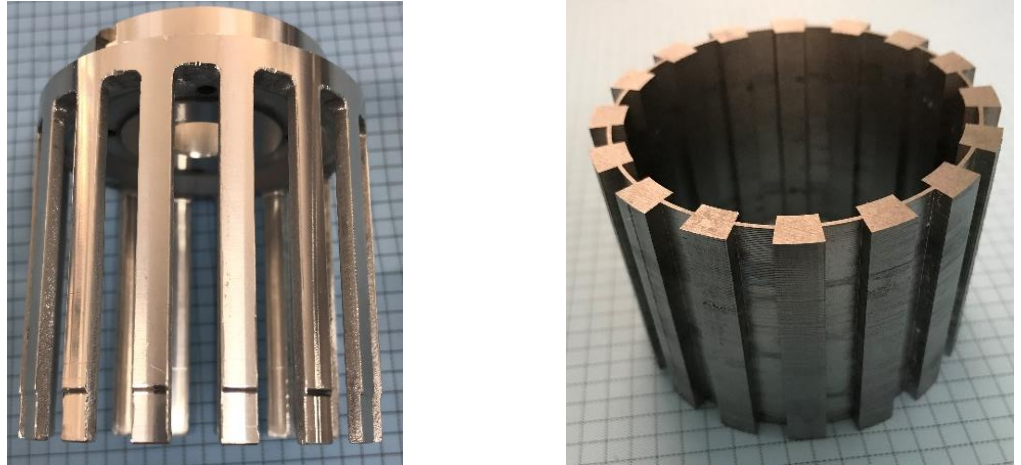
Şekil 3.20. AKHD-2 tip MD V<sub>2</sub> laminasyonlu OR

Dizginin dönme ekseninde salgı yapmaması için Şekil 3.21’de gösterilen aparat tasarlanmış ve bu aparat tel erozyon cihazıyla hassas üretim metotları ile üretilmiştir.



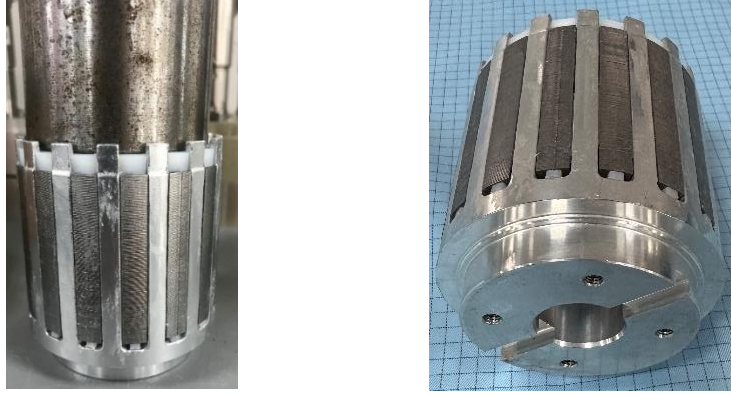
**Şekil 3.21.** Laminasyonlu OR sac paketi aparatı

OR V<sub>2</sub> üretiminin tamamlanabilmesi aşamasında, sac paketlerinin arasına yerleştirilebilmesi amacıyla Şekil 3.22’de gösterilen OR destek parçası, tasarlanmış ve üretilmiştir.



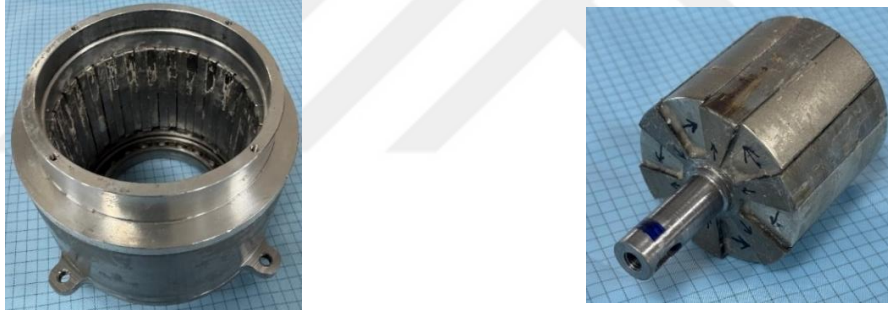
**Şekil 3.22.** Laminasyonlu OR ve destek parçası

OR ile destek parçası, Şekil 3.5’te belirtilen yapıştırıcı kullanılarak Şekil 3.23’teki gibi tek parça haline getirilmiştir. MD V<sub>2</sub> için oluşturulan OR V<sub>2</sub> kısmı, 72 saat oda koşullarında bekletilerek kürleşmesi sağlanmıştır.



**Şekil 3.23.** AKHD-2 tip MD V<sub>2</sub> için laminasyonlu OR montajı

OR V<sub>2</sub> tasarımı diğer destek parçaları ile bütünleştirildikten sonra, MD V<sub>2</sub> tasarımı için sökülen Şekil 3.24'teki DR ve İR'lerin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Sökülme işleminde zarar görme riski göz önünde bulundurularak, ön kontrol yapıldıktan sonra montaj işlemine devam edilmiştir.



**Şekil 3.24.** AKHD-2 tip MD V<sub>1</sub> prototipinden sökülen İR ve DR

Son aşamada Bölüm 3.1.5'te bahsi geçen süreçler tekrarlanıp OR V<sub>2</sub> yataklama elemanları ile bütünleştirilerek AKHD-2 MD V<sub>2</sub> tasarımının prototip imalatı tamamlanmıştır (Şekil 3.25).

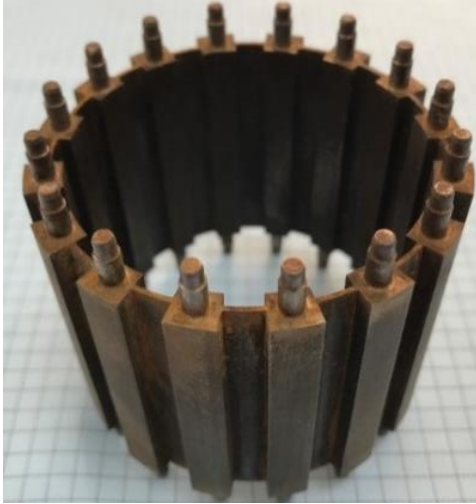


**Şekil 3.25.** AKHD-2 tip MD V<sub>2</sub> nihai prototipi

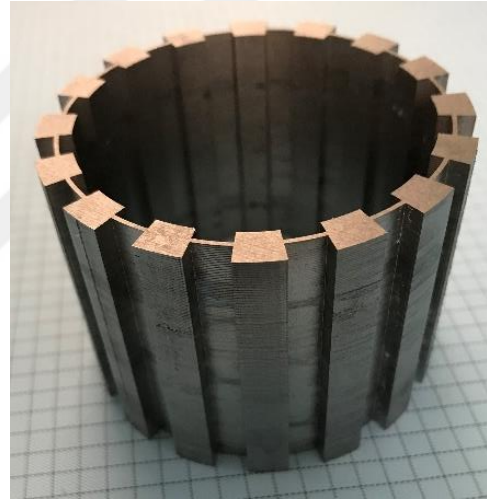
## 4. BÖLÜM

### PERFORMANS TESTLERİ ve SAYISAL MODEL DOĞRULAMA

Bu bölümde, AKHD tip eş eksenli MD'nin sayısal olarak hesaplanan aktarma oranının doğrulanması amacıyla tasarlanan test sistemi incelenmiştir. Tork ve pozisyon kontrolüne sahip test sisteminin tasarımı ve işleyişi tartışılmıştır. Üretilen MD'nin performans testleri gerçekleştirilerek sonuçlar analiz edilmiştir. Şekil 4.1'de gösterilen tasarımlara uygun olarak üretilen MD  $V_1$  ve  $V_2$  versiyonları, yükleme sistemiyle test edilerek performansları değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, MD versiyonlarının en yüksek tork taşıma kapasiteleri belirlenmiş ve deneysel HTY değerleri hesaplanmıştır. Ardından, MD  $V_1$  ve MD  $V_2$ 'nin performans çıktıları karşılaştırılmış ve ESA'dan elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Farklı hızlardaki verim ve pozisyon tepkileri analiz edilerek bulgular tartışılmıştır.



1018 OR ( $V_1$ )



Laminasyonlu OR ( $V_2$ )

Şekil 4.1. OR'ye göre MD  $V_1$  ve  $V_2$  tasarımları

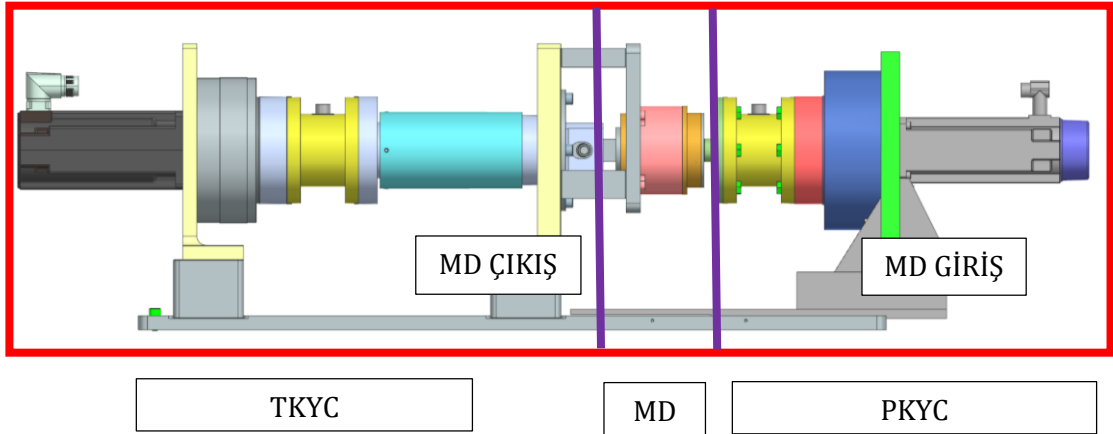
#### 4.1. Test Düzenekleri

AKHD tip MD için ESA çözümlenmeleri ve tasarım sürecinin tamamlanmasının ardından, gerçekleştirilen sayısal hesaplamaların doğrulanabilmesi için deneysel gerçek zamanlı verilere ihtiyaç duyulmuştur. MD'nin bütünleştirilmesi ile birlikte, gerçek verileri sağlayabilecek nitelikte bir test düzeneği tasarlanmış ve istenen doğrulamaları yapabilecek seviyeye getirilmiştir. Bu test düzeneği kullanılarak, MD'nin aktarma oranı doğrulaması yapılmış ve tork yükü altındaki performansı detaylı şekilde incelenmiştir.

#### 4.1.1. Mekanik sistemler ve yapısal bileşenler

Tork Kontrollü Yükleme Cihazı (TKYC), belirlenen profil doğrultusunda istenilen tork yükünü uygulayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Test düzeneğine entegre edilen Pozisyon Kontrollü Yükleme Cihazı (PKYC) ise belirlenen hızda istenilen pozisyona ulaşabilecek şekilde tasarlanmıştır. MD'nin aktarma oranının doğrulanması için yalnızca PKYC kullanılarak, MD çıkışına yüksek çözünürlüklü bir kodlayıcı yerleştirilmesi yeterli olmuştur. Ancak MD'nin performans verilerinde hem tork hem de pozisyon kritik olduğu için, TKYC MD'nin çıkışına, PKYC ise MD'nin girişine bağlanarak seri bağlantılı bir test sistemi oluşturulmuştur.

TKYC'ye ait ana bileşenler Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Servo motor, oluşturduğu dönme hareketini redüktör aracılığıyla düşük hız ve yüksek tork sağlayacak şekilde aktarmaktadır. Sisteme iletilen tork yükü, seri bağlı kalibrasyonlu torkmetre tarafından ölçülmektedir. Torkmetrenin önüne yerleştirilen tork yayı, MD'ye iletilen yükün ani darbe etkilerini sönmölemek amacıyla kullanılmaktadır. Raf ürünü olarak temin edilen torkmetreye ait detaylı teknik veriler EK-3'te sunulmuştur. PKYC'nin ana bileşenleri ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Servo motor, bünyesinde bulunan hassas kodlayıcı ile yüksek hızda dönüş hareketi sağlamakta, ardından redüktör aracılığıyla düşük hız ve hassas pozisyon kontrolü gerçekleştirmektedir. PKYC, MD'nin giriş miline doğrudan bağlı olup, TKYC'den gelen tork yüküne karşı istenilen pozisyonu sağlamak için tasarlanmıştır.



Şekil 4.2. Yükleme test sistemi şematik gösterimi

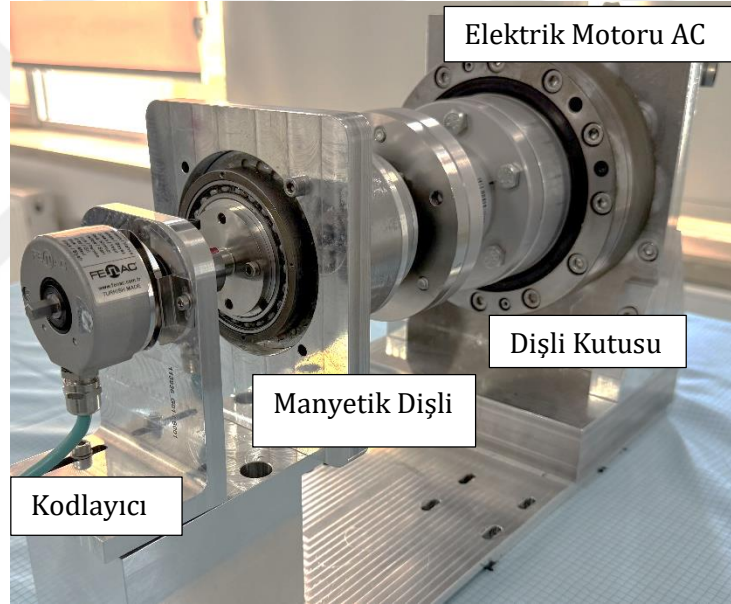
#### 4.1.2. Elektriksel güç ve kontrol sistemleri

PKYC, istenilen zamanda ve pozisyonda denetleyiciye sahip bir elektromekanik sistemdir. Sistemin çalışabilmesi için Şekil 4.3'te gösterilen çeşitli donanımlara ihtiyaç vardır. PKYC, servo motordan aldığı hareketi pozisyon açısına göre yönlendirir. TKYC ise istenilen torku sağlamak için tasarlanmış bir denetleyiciye sahiptir. Servo motor, tork değeri ile kontrol edilerek sisteme istenilen tork yükü uygulanabilir. Denetleyicilerin çalışması ve veri iletimi için yazılım ve



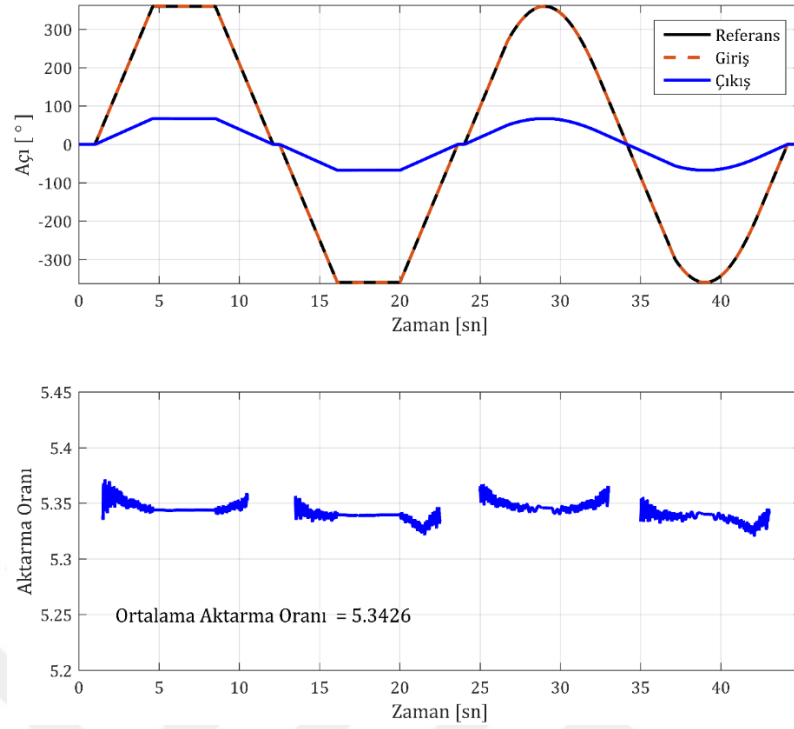
## 4.2. Aktarma Oranı Testi

MD kavramsal tasarımında mıknatıs kutup çiftlerinin ve segment sayılarının seçimi ile belirlenen dişli aktarım oranı ESA analizlerinde doğrulanmış ve sayısal verilerde 5,333 olarak elde edilmiştir. Bu değerin deneysel verilerle karşılaştırılabilmesi amacıyla, MD giriş kısmına bağlanan PKYC sistemi ve çıkış miline bağlanan hassas kodlayıcı ile eş zamanlı veri alınarak incelenmiştir. Şekil 4.4'te verilen aktarma oranı test sisteminde, MD çıkış kısmında  $0,0054^\circ$  pozisyon hassasiyetine sahip EK 4'te sunulan kodlayıcı kullanılmıştır. Test sistemindeki PKYC kısmından pozisyon kontrolü ile tanımlanan profilde açısal hareket gerçekleştirilerek, giriş ve çıkış arasında tork yükü uygulanmadan pozisyon verisi farkı hesaplanmış ve MD aktarma oranı deneysel olarak hesaplanmıştır. Aktarma oranı deneysel testleri, Şekil 4.3'te belirtilen elektriksel şemaya ek olarak giriş ve çıkış kartına kodlayıcı bağlantıları yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Aktarma oranı test sistemi

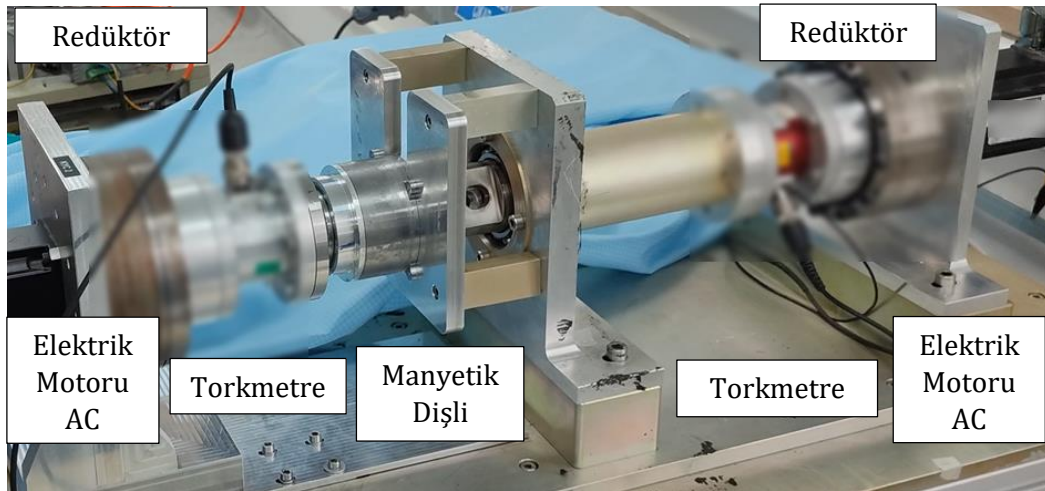
Gerçek zamanlı olarak pozisyon emri,  $200^\circ/\text{sn}$  hızla MD giriş tarafından uygulanmıştır. Şekil 4.5'te farklı pozisyon emirlerinden elde edilen verilere göre, MD giriş mili ile çıkış mili arasında okunan pozisyon verileri analiz edilmiştir. Elde edilen verilere göre, bütünleştirilen MD'nin aktarma oranı ortalama 5,3426 olarak ölçülmüştür. Bu değer elektromanyetik tasarım sürecinde mıknatıs sayılarına göre belirlenen 5,333 değeri ile uyumludur. Ayrıca, deneysel verilerden elde edilen aktarma oranının, MD'nin farklı açılarında tekrarlanarak eşit dağılımla gerçekleştiği görülmüştür.



**Şekil 4.5.** MD V<sub>1</sub> tasarımı için pozisyona göre aktarma oranı testi

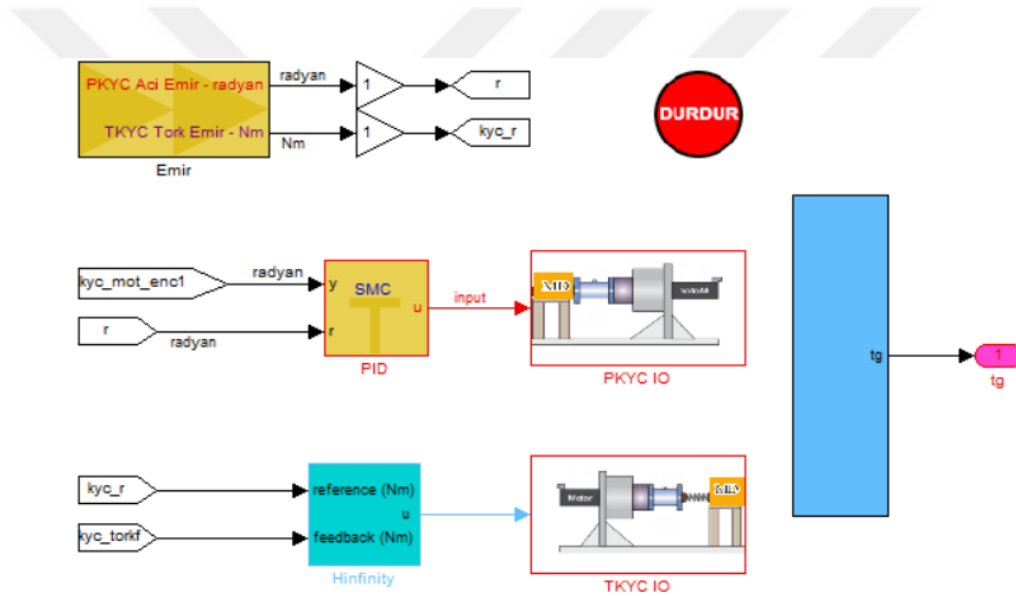
### 4.3. Yükleme Sistemi Testi

MD performans testlerinin gerçekleştirilmesi için tasarlanan yükleme sistemi, iki ana test sisteminden oluşmaktadır. TKYC ve PKYC, seri ve eş merkezli olarak MD'nin giriş ve çıkış kısımlarına bağlanmış ve performans testleri yapılmıştır. 1 kHz veri hızında, gerçek zamanlı sistemde gerçekleştirilen deneyde, HTY değerinin hız, pozisyon ve yüke göre değişimleri incelenmiştir. Elektromekanik test sistemi ile ilgili detaylar Şekil 4.6'da sunulmuştur.



**Şekil 4.6.** Yükleme test sistemi

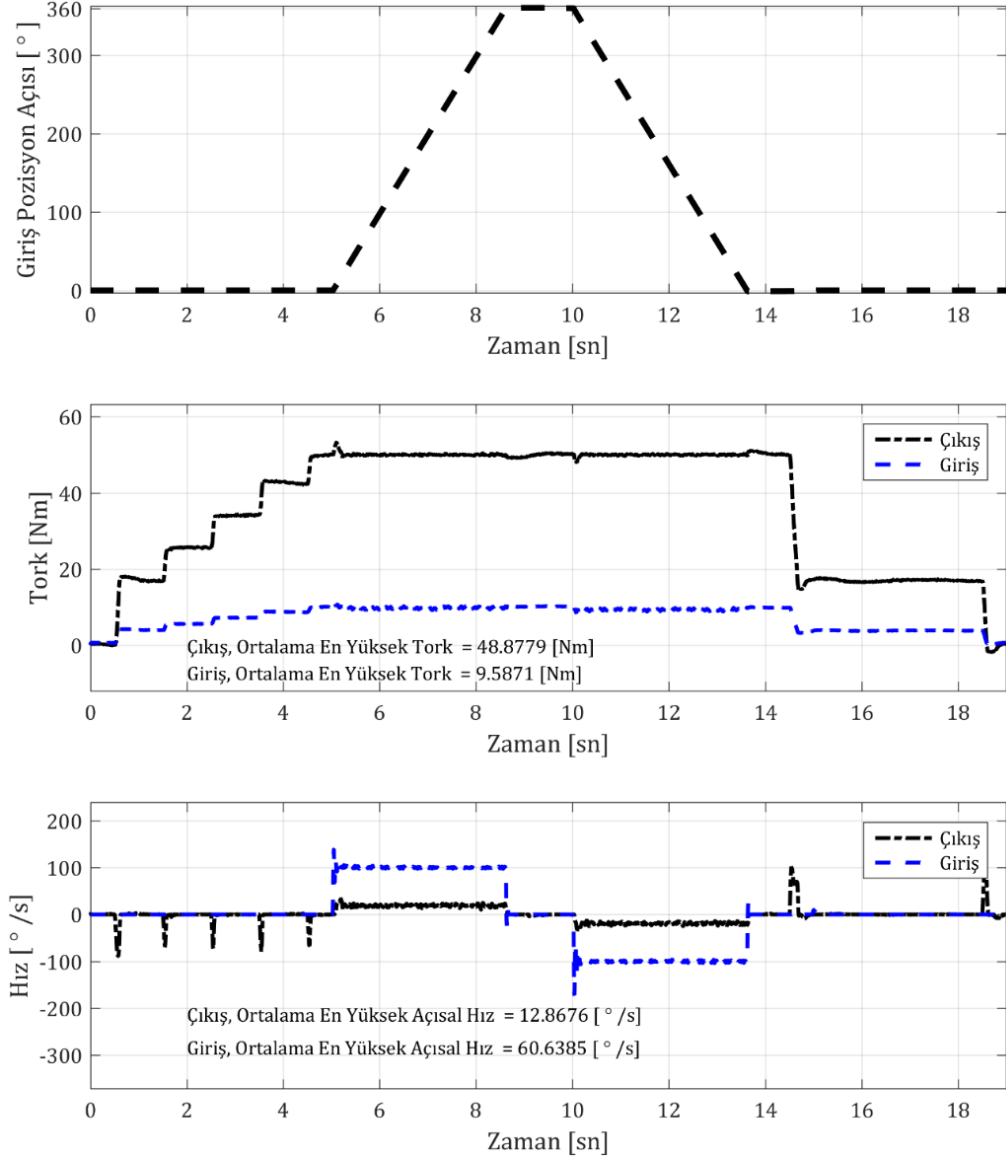
TKYC ve PKYC sistemlerinin eş zamanlı olarak çalışabilmesi için, Şekil 4.7’de gösterilen MATLAB®-Simulink yazılımında oluşturulan bloklar, birbirleriyle 1 kHz hızında iletişim kurarak döngüyü sağlamaktadır. İki elektromekanik sistemin zıt yönlerde veya haberleşme sırasında sorunsuz bir şekilde çalışarak kararlı bir davranış sergilemesi önemlidir. Bu nedenle, xPC Target kullanılmıştır. Gerçek zamanlı sistemlerde, iki sistemin birbirine zarar vermemesi için yazılıma “DUR” sekmesi eklenmiş ve sistem için koruma odaklı kriterler tanımlanmıştır. En yüksek hız, en yüksek pozisyon ve aşırı tork yükleme değeri gibi kritik algoritmalar belirlenerek test sisteminin zarar görmesi engellenmiştir. Ayrıca, iki sistemin farklı davranışlar sergileyebileceği göz önüne alınarak, sistem önce ayrı ayrı çalıştırılmış, ardından birlikte çalıştırılarak riskler en düşük seviyeye çekilmiştir. Şekil 4.3’te verilen görselde, sistemin çalışma mantığı ve kontrol döngüsüne ait bilgiler yer almaktadır. Bu çalışma prensibi, MD performanslarını deneysel olarak ölçebilmek için tümüyle bu tez kapsamında hazırlanmıştır.



Şekil 4.7. MATLAB®-Simulink kontrol blokları

Kademeli olarak tork yükü artırılarak, 50 Nm tork yükü altında  $100^\circ/\text{sn}$  hız ile  $360^\circ$  pozisyon emri verilmiştir. Gerçekleşen pozisyon, giriş-çıkış tork değeri ve açısal hız grafikleri Şekil 4.8’de sunulmuştur. PKYC, istenilen pozisyonda hareket ettiği sırada TKYC hedeflenen tork değerini sağlamış ve MD V<sub>1</sub> tasarımı için başarılı bir test gerçekleştirilmiştir. 5,3-8,5 saniye ile 10,3-13,5 saniye arasındaki hız ve tork verilerinin ortalamaları alınmıştır. Tablo 4.1’de ölçülen değerlerin ortalama değerleri verilmiş, verim hesabı ise Scheidler ve ark. (2019) tarafından önerilen Denklem 4.1’e göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, MD V<sub>1</sub> için  $100^\circ/\text{sn}$  hızda ve 50 Nm tork altında %97,65 verim elde edilmiştir.

$$\text{Verim} = \frac{\omega_{\text{ç}} * T_{\text{ç}}}{\omega_{\text{g}} * T_{\text{g}}} * 100 \quad (4.1)$$



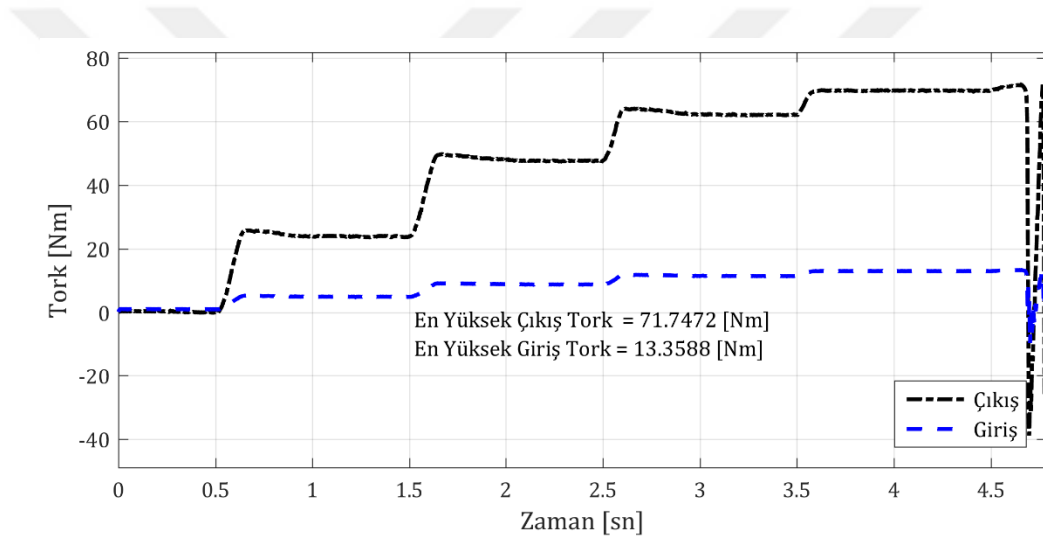
Şekil 4.8. MD V<sub>1</sub> tasarımı için 50 Nm 360° pozisyon emrinde tork ve hız grafikleri

Tablo 4.1. MD V<sub>1</sub> tasarımı için 50 Nm, 360° ortalama değerler

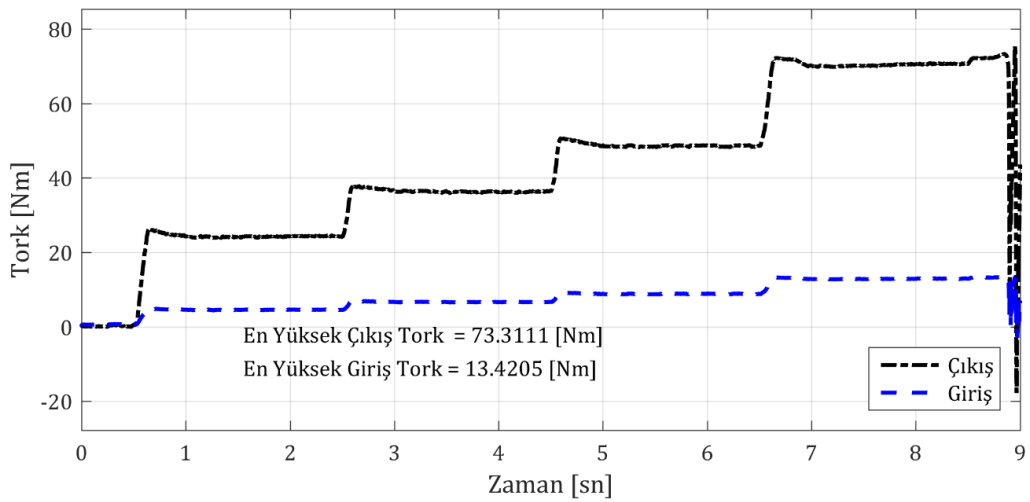
Açıklama	Açısal Hız [°/sn]	Tork [Nm]
Giriş	100,19	9,6
Çıkış	18,78	49,99
<b>Verim</b>	<b>% 97,65</b>	

### 4.3.1. Deneysel hacimsel tork yoğunluğu

MD performans testlerinin çıktularından biri de HTY'dir. ESA'nın en iyileme kriterlerinden biri olan HTY değeri tasarım için önemli parametrelerdendir. Deneysel olarak en yüksek tork değerini elde edebilmek için MD'nin en iyi özelliklerinden biri olan kendi kendini emniyetli koruma özelliği kullanılmıştır. MD'nin mekanik arayüz ile sabitlendiği Şekil 4.2'deki yükleme sisteminin TKYC kısmından kademeli şekilde tork yük emri arttırılmış, aynı zamanda PKYC tarafı  $0^\circ$  pozisyonda sabit tutulmuştur. İlk olarak 25 Nm tork değerinden başlanarak tork yükü kademeli şekilde arttırılmış ve sınır tork yüküne kadar çıkmıştır. MD  $V_1$  tasarımı için en yüksek 71,74 Nm'de sistem boşa düşmüştür (Şekil 4.9). Ardından MD  $V_2$  tasarımı için kademeli şekilde arttırılan tork yükü ile performans sınırları zorlanmış ve 73,31 Nm'de MD emniyet özelliği devreye girerek sistem boşa düşmüştür (Şekil 4.10).

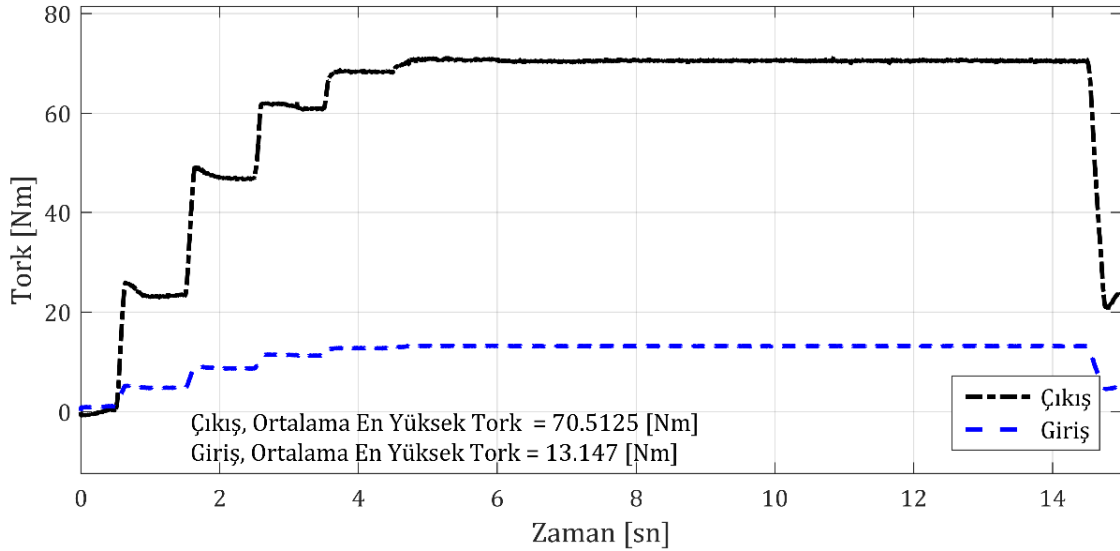


Şekil 4.9. MD  $V_1$  tasarımı için 71,74 Nm tork yükü altında aşırı yükte koruma testi

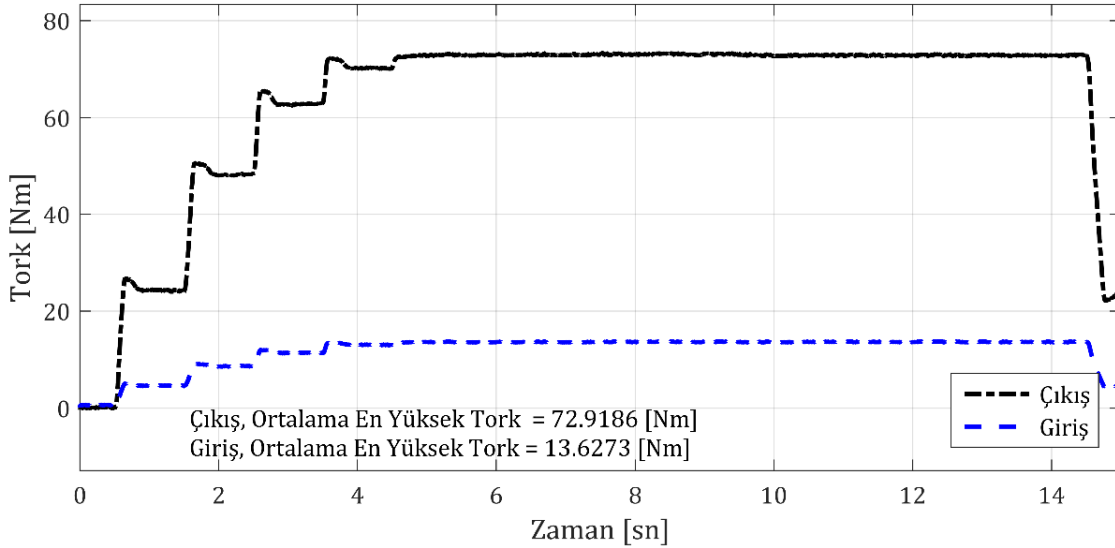


Şekil 4.10. MD  $V_2$  tasarımı için 75,36 Nm tork yükü altında aşırı yükte koruma testi

MD versiyonlarının sınır tork değerlerinin bulunması ile birlikte HTY değerlerini bulmak için yükleme sistemi ile yaklaşık 65-75 Nm arası kademeli olarak yükleme yapılmış ve sistemde boşa dönme başlamadan yani sistem koruma devreye girmeden hemen önceki en yüksek tork değerleri ölçülmüştür. MD V<sub>1</sub> tasarımı için Şekil 4.11 ve MD V<sub>2</sub> tasarımı için ise Şekil 4.12'de gösterilen veriler elde edilmiştir.



Şekil 4.11. MD V<sub>1</sub> tasarımı için 70,51 Nm tork yükü altında test

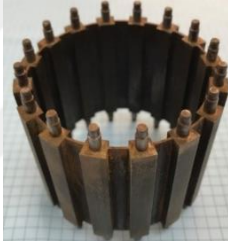
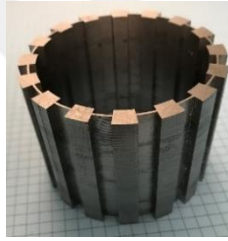


Şekil 4.12. MD V<sub>2</sub> tasarımı için 72,92 Nm tork yükü altında test

Gerçekleştirilen deneysel testlerde MD V<sub>1</sub> ile 70,51 Nm, MD V<sub>2</sub> ile 72,92 Nm en yüksek ortalama çıkış tork değerleri elde edilmiştir. Tork yönünden incelendiğinde MD V<sub>2</sub> tasarımının kayıpları

en aza indirgediği deneysel sonuçlarda gözlemlenmiştir. MD parametrik iyileştirilmiş modelin deneysel verilerine göre uygulanabilen en yüksek tork değerleri hassas ölçüm ile zamana bağlı olarak incelenmiştir. Bu noktada, HTY'yi hesaplamak için çıkış torku olarak ölçülen değerler kabul edilmiş ve Denklem 1.8 kullanılarak hesaplanmıştır. Aktif hacim için Tablo 2.13'teki değerler kullanılmıştır. HTY deneysel veriler ile hesaplanmış ve ESA'da elde edilen 2B ve 3B verileri de Tablo 4.2'de sunulmuştur. MD  $V_1$  açısından 3B ESA sonuçlarına göre HTY değeri %9,7 azalmışken, MD  $V_2$  bakımından da %9,01 azalmıştır. HTY bakımından hedeflenen isterler her iki tasarım için de sağlanmıştır.

**Tablo 4.2.** Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması

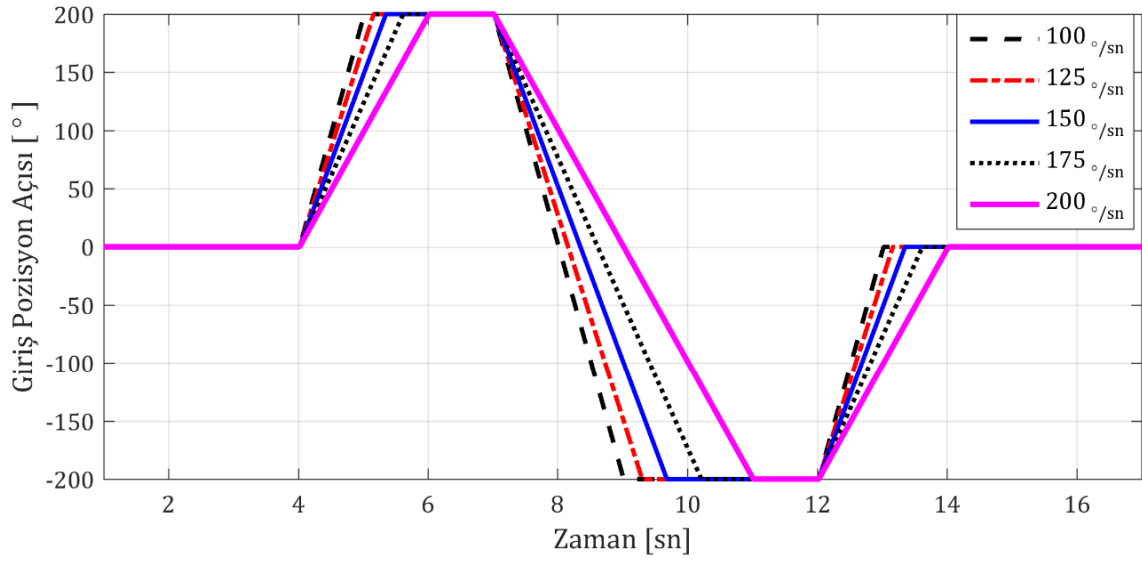
Parametre	Tasarım- $V_1$		Tasarım- $V_2$		Birim
	Deneysel	3B/2B Sayısal	Deneysel	3B/2B Sayısal	
Giriş Tork	13,15	14,7/18,02	13,37	15,1/18,21	Nm
Çıkış Tork	-70,51	-78,1/-96,06	-72,92	-80,3/-97,1	Nm
OR, Malzeme	AISI 1018		M235-35A		-
<b>HTY</b>	<b>221,66</b>	<b>245,53/302,11</b>	<b>229,46</b>	<b>252,41/305,03</b>	<b>Nm/L</b>
					

Deneysel sonuçların da gösterdiği gibi OR tasarımı HTY değerini %3,4 oranında etkilemiştir. M235-35A laminasyonlu yapısı ile manyetik kayıpları bir miktar önlemiş ve yüksek manyetik akı geçirgenliği sağlamıştır. Ayrıca model çalışmasında  $V_1$  tasarımının yük taşıyan pimlerinin aktif hacmin dışına taşması kayıpları arttırmıştır. Mikro yapılarının manyetik alan iletimine daha uygun olması M235-35A kullanımını avantajlı kılmaktadır. Ancak, düşük hızlı bu tip uygulamalarda AISI 1018 kullanımı kayıplar göz ardı edildiğinde rijitlik ve üretim kolaylığı bakımından avantajlı olacaktır.

Deneysel verilerden elde edilen HTY değerlerinin 2B ve 3B sayısal analiz sonuçlarından farklı olmasının birçok olası sebebi vardır. Mıknatısların üretimi esnasında oluşabilen ölçü farkları ve manyetizasyona bağlı olarak elde edilen B-H eğrilerinin sayısal modele tam olarak tanımlanamaması, bu duruma neden olabilir. Ayrıca, parçalarının montajı esnasında boşlukların bir tarafa doğru yığılması ve buna bağlı olarak ortaya çıkan şekilsel farklılıklar, bu farklara neden olabilir. Yine, özellikle mıknatıs çalışmalarında girdap akı kayıplarının bilinmezliği de tasarım noktasındaki bu farklara neden olabilir.

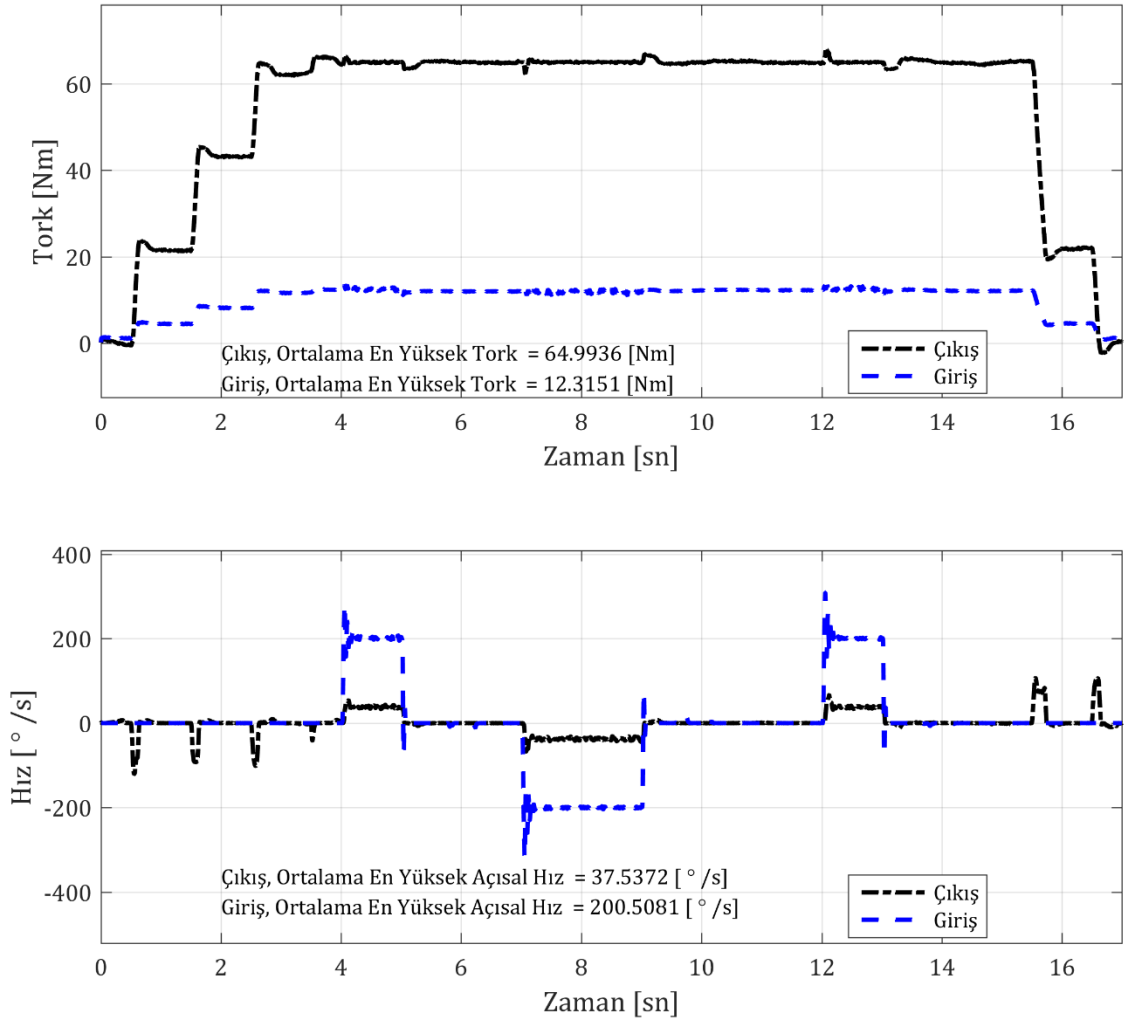
### 4.3.2. Performans testleri

MD performans analizi için Şekil 4.6'ya sabitlenen MD bütünü, farklı açısal hız ve tork yüklerinde test edilmiştir. Giriş kısmına bağlı olan PKYC, Şekil 4.13'te belirtilen MD giriş pozisyon emrini zamana bağlı olarak 17 sn boyunca her biri farklı açısal hıza sahip olan 100, 125, 150, 175 ve 200°/sn profil ile gerçekleştirmiştir. Yük altında performans testleri bu giriş profili üzerinden incelenmiştir. Profilde 0-4 sn arasında 0°'de sabit tutulmuş, yani açısal hareket verilmemiştir. 4-14 sn arasında ilk olarak pozitif (+) devamında negatif (-) şeklinde tamamlanmış ve 14-17 arasında 0° pozisyon emri verilmiştir.



Şekil 4.13. Farklı hızlarda zamana bağlı pozisyon emri

MD performans testi için farklı tork yükleri ve açısal hızlarda testler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen tork profili için elde edilen en yüksek tork yükünde Şekil 4.13'te verilen 4-14 sn arasında açısal hareket senaryosu uygulanarak giriş-çıkış tork değerleri ve hareket esnasındaki hız verileri incelenmiştir. Her bir açısal hız değeri için 13 farklı tork yükünde deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. TKYC sisteminde tork kontrolü uygulandığı sırada MD giriş tarafında uygulanan açısal hareket ile tork yükünde aşım gerçekleşmekte ve sistemin boşa düşebileceği çıkış tork değerine yaklaşılmaktadır. Bu sebeple MD V<sub>1</sub> performans testleri en yüksek 65 Nm çıkış tork değeri altında ve MD V<sub>2</sub> performans testleri ise en yüksek 68 Nm çıkış tork değeri altında gerçekleştirilmiştir. MD V<sub>1</sub> için Şekil 4.14'te 4-14 sn arasında PKYC farklı açısal hıza sahip hareket emrini gerçekleştirirken TKYC tarafından istenilen tork yükü MD'nin çıkış miline uygulanmıştır. MD hareketinin olduğu çalışma aralıklarında çıkış ve giriş torklarının ortalaması hesaplanmış ve grafiklerde belirtilmiştir. Hareketin olduğu kısımlardan alınan giriş ve çıkış açısal hızlarının ortalama değerleri grafiklerde gösterilmiştir.



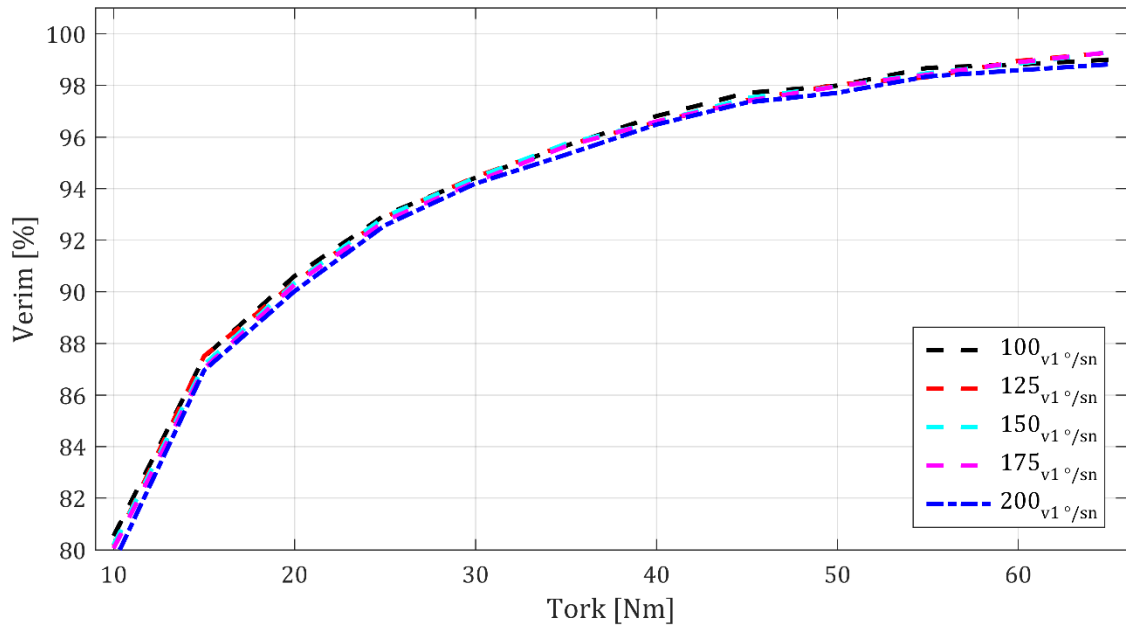
**Şekil 4.14.** 65 Nm tork yükü altında 200°/sn açısal hızda MD V<sub>1</sub> tasarımı için performans testi

MD V<sub>1</sub> için performans testlerinden elde edilen veriler ile Denklem 4.1 kullanılarak sistemin verimi Tablo 4.3'te verilmiştir. MD'nin farklı hız ve tork yükü altında incelenen deneysel verilere ait verim grafikleri EK-5'te sunulmuştur.

**Tablo 4.3.** MD V<sub>1</sub> tasarımı için farklı açısız hız - tork yükünde verim

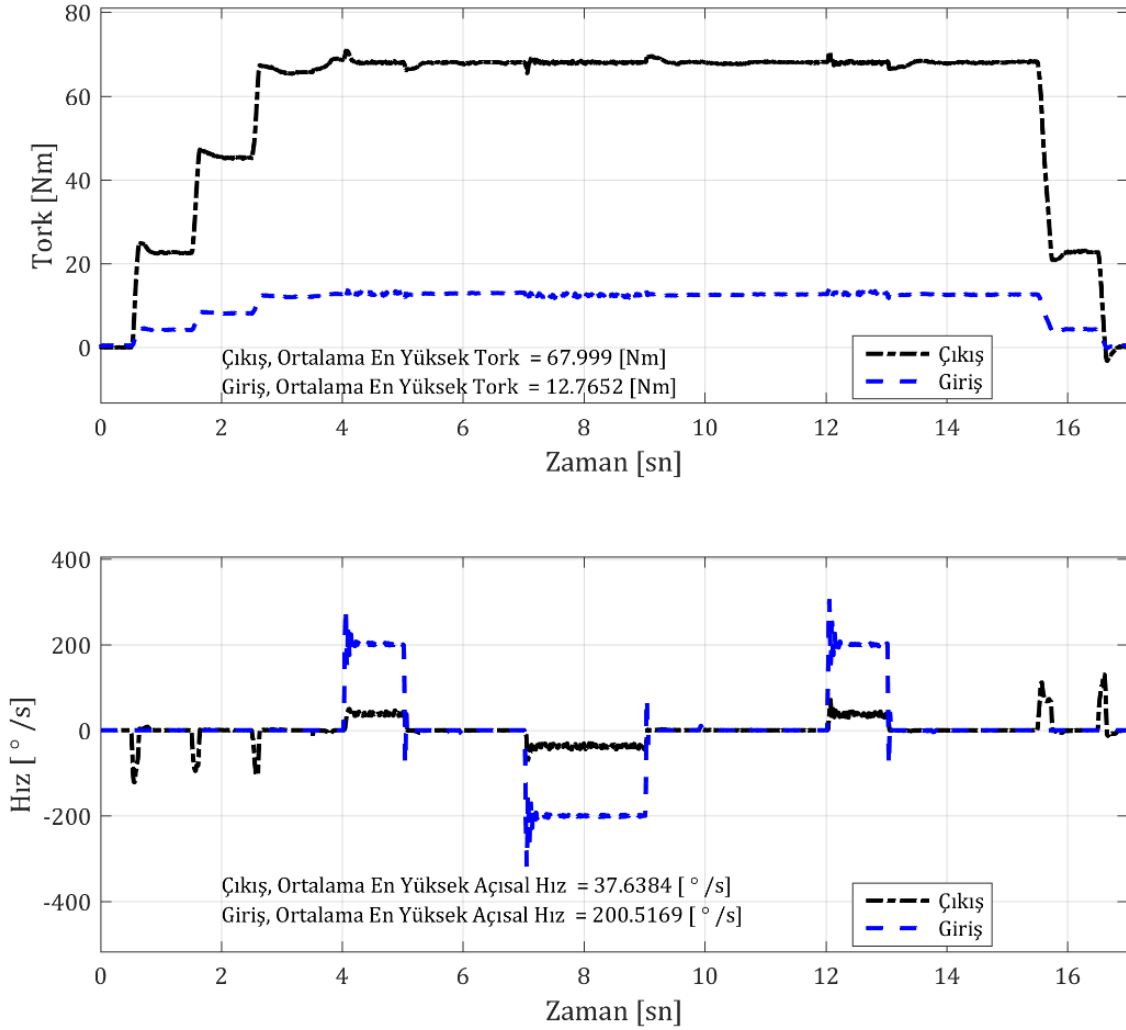
Tork Nm	Verim %	Verim %	Verim %	Verim %	Verim %
	100°/sn	125°/sn	150°/sn	175°/sn	200°/sn
10	80,54	80,16	80,19	80,05	79,51
15	87,47	87,51	87,18	87,03	86,95
20	90,60	90,35	90,33	90,27	90,01
25	92,98	92,89	92,91	92,75	92,57
30	94,42	94,46	94,42	94,26	94,19
35	95,66	95,69	95,73	95,64	95,31
40	96,81	96,56	96,59	96,60	96,48
45	97,70	97,42	97,50	97,38	97,34
50	97,98	98,02	97,95	97,96	97,70
55	98,67	98,32	98,46	98,41	98,34
60	98,80	98,94	98,84	98,89	98,54
65	98,99	99,26	99,28	99,27	98,80

MD V<sub>1</sub>'in çeşitli hız ve torklarda test edilmesi ile Şekil 4.15'te gösterilen verim grafiği elde edilmiştir. Grafiğe göre, uygulanan hızın artışı verimi azaltmıştır. Bununla birlikte, test verilerinin alındığı tork ve hız sensörlerinin belirsizliklerine ek olarak elektriksel gürültülerden dolayı bazı bölgelerde verim hesabında %0,2 farklar meydana gelmiştir. Şekil 4.15'e göre uygulanan tork yükünün artışı, verimi arttırmış ve MD V<sub>1</sub> veriminin %99'a yakınsadığı yüklem test verilerinden elde edilmiştir. Küçük torklarda MD V<sub>1</sub>'in kendi ataleti ve sürtünmesinin uygulanan tork yüküne oranla yüksek kalmasından dolayı verim %80'e yakın hesaplanmıştır.



**Şekil 4.15.** MD V<sub>1</sub> tasarımı için farklı açısız hız ve tork yükü altında verim

MD V<sub>2</sub> için Şekil 4.16'da 4-14 sn arasında PKYC, farklı açısal hızı sahip hareket emrini gerçekleştirirken TKYC tarafından istenilen tork yükü MD'nin çıkış miline uygunlamıştır. MD hareketinin olduğu çalışma aralıklarında çıkış ve giriş torklarının ortalaması hesaplanmış ve grafiklerde belirtilmiştir. Hareketin olduğu kısımlardan alınan giriş ve çıkıştaki ortalama açısal hızlar grafiklerde sunulmuştur.



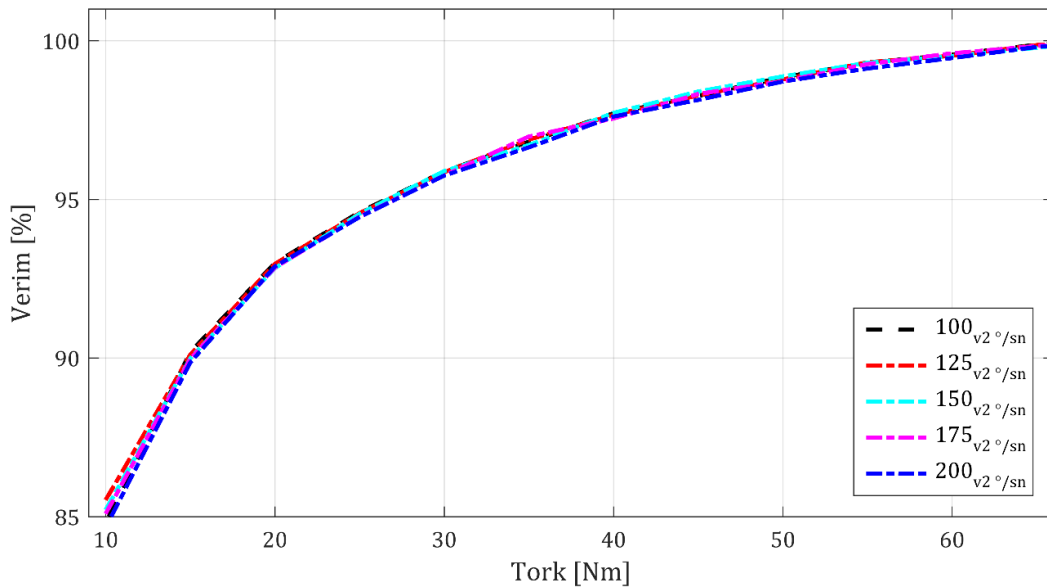
**Şekil 4.16.** 68 Nm tork yükü altında 200°/sn açısal hızda MD V<sub>2</sub> tasarımı için performans testi

MD V<sub>2</sub> için performans testlerinden elde edilen veriler ile sistemin Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanan verimi Tablo 4.4'te verilmiştir. MD'nin farklı hız ve tork yükü altında incelenen deneysel verilerine ait verim grafikleri EK-5'te sunulmuştur.

**Tablo 4.4.** MD V<sub>2</sub> tasarımı için farklı açısız hız - tork yükünde verim

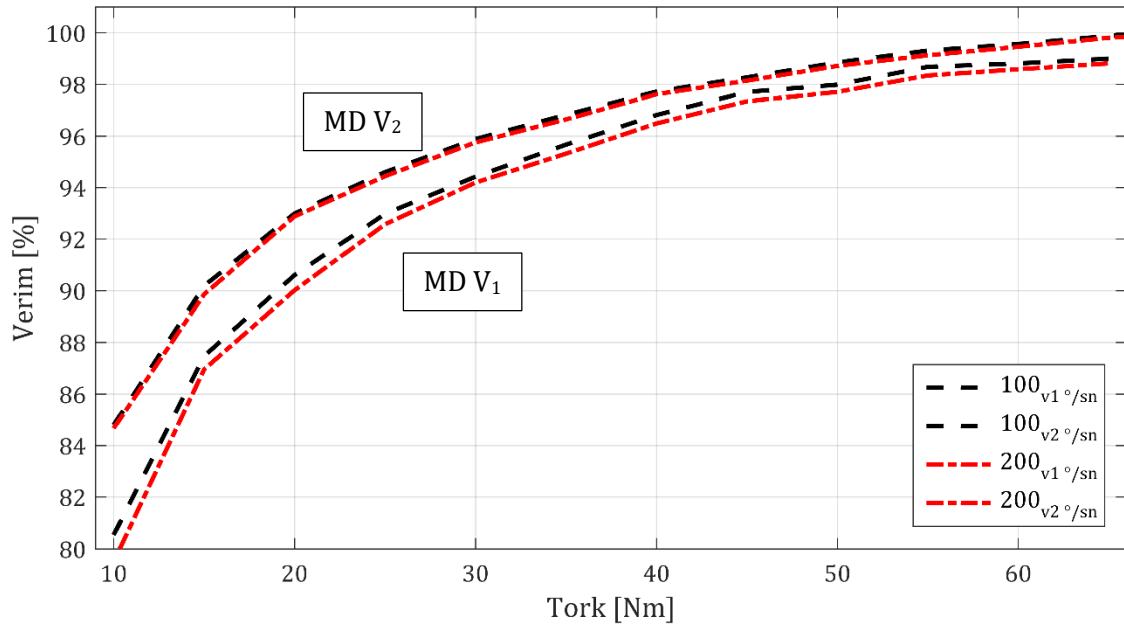
Tork Nm	Verim %	Verim %	Verim %	Verim %	Verim %
	100°/sn	125°/sn	150°/sn	175°/sn	200°/sn
10	84,79	85,52	85,21	85,09	84,67
15	90,19	90,11	89,99	89,97	89,86
20	92,98	92,96	92,83	92,84	92,88
25	94,60	94,57	94,55	94,45	94,44
30	95,88	95,85	95,89	95,75	95,75
35	96,82	96,88	96,71	96,98	96,64
40	97,72	97,66	97,73	97,55	97,61
45	98,26	98,28	98,39	98,32	98,14
50	98,84	98,78	98,87	98,72	98,71
55	99,30	99,32	99,30	99,26	99,12
60	99,56	99,52	99,51	99,60	99,45
65	99,87	99,86	99,77	99,83	99,80
68	99,99	99,97	99,95	99,94	99,91

MD V<sub>2</sub>'nin çeşitli hız ve torklarda test edilmesi ile Şekil 4.157'de gösterilen verim grafiği elde edilmiştir. MD V<sub>2</sub>, MD V<sub>1</sub> ile benzer davranış göstermiştir. Grafiğe göre, uygulanan hızın artışı verimi azaltmıştır. Ama test verilerinin alındığı tork ve hız sensörlerinin belirsizliklerine ek olarak elektriksel gürültülerden dolayı bazı bölgelerde verim hesabında %0,1 fark meydana gelmiştir. Şekil 4.17'ye göre uygulanan tork yükünün artışı, verimi arttırmış ve MD V<sub>2</sub> veriminin %99,9'a yakınsadığı yükleme test verilerinden elde edilmiştir. Küçük torklarda MD V<sub>2</sub>'nin kendi ataleti ve sürtünmesinin uygulanan tork yüküne oranla yüksek kalmasından dolayı verim %86'ya yakın çıkmıştır.



**Şekil 4.17.** MD V<sub>2</sub> tasarımı için farklı açısız hız ve tork yükü altında verimi

MD V<sub>1</sub> ve V<sub>2</sub> performans testlerinin gerçekleştirilmesi ile toplanan veriler işlenmiş ve kıyaslanmıştır. Tork ve hız değişimlerine göre hesaplanan verim grafikleri 100 ve 200°/sn açısal hızları bakımından incelendiğinde Şekil 4.18'deki grafik elde edilmiştir. MD V<sub>2</sub>'nin, MD V<sub>1</sub>'e göre üstün bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. OR'de uygulanan geometri ve malzeme değişikliği, verim değerlerini olumlu etkilemiştir. Düşük tork yüklerinde %6'ya yakın iyileşme, yüksek torklarda ise %0,75-1 arası fark meydana gelmiştir. Yalnızca MD V<sub>1</sub> tasarım incelendiğinde 100 ile 200°/sn hız arasında yapılan testlerde %0,2-0,05 arasında verimsel farklar meydana gelmiştir. Tasarım için hız bakımından bu verim fark değerleri ihmal edilebilir olduğundan bu hız aralıklarında performans, hedef kriterleri sağlamıştır. Sonuç olarak MD V<sub>2</sub> 15 Nm'den sonra, MD V<sub>1</sub> ise 20 Nm'den sonra %90 verim değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.18. MD V<sub>1</sub> ve MD V<sub>2</sub> tasarımları için verim

## 5. BÖLÜM

### KANATÇIK TAHRİK SİSTEMİ

MD'nin performansının hedeflenen isterleri karşılmasıyla birlikte, KTS entegrasyon süreci gerçekleştirilmiştir. MD ile uyumlu bir mekanizma tasarlanarak analizleri yapılmış, ardından MD KTS tasarımının 3B modeli geliştirilerek yapısal davranışı incelenmiştir. Son olarak, MD-KTS sistemine yönelik yükleme testleri gerçekleştirilmiş ve farklı çalışma koşullarındaki performansı değerlendirilmiştir.

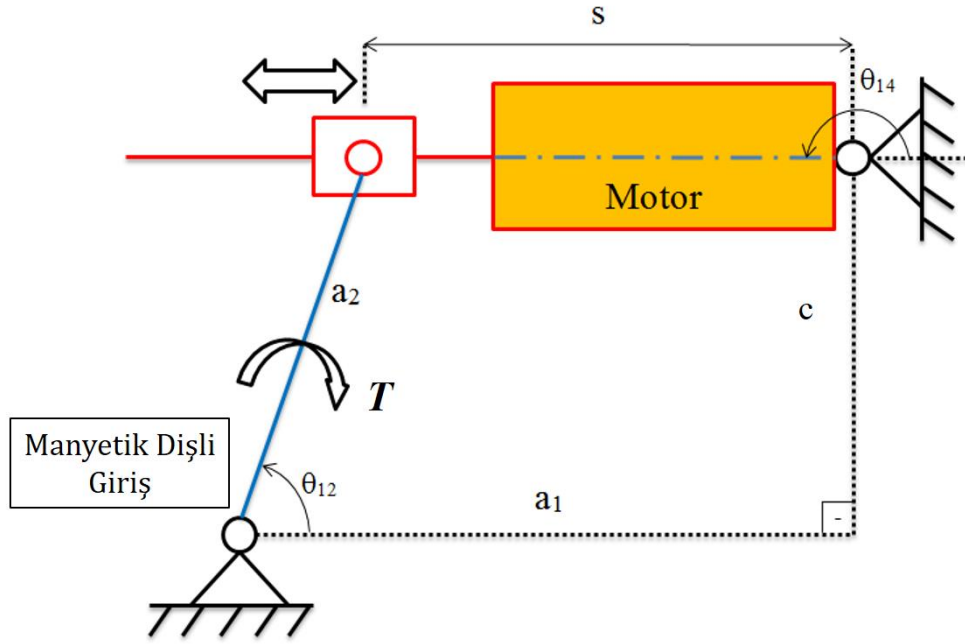
#### 5.1. Mekanizma Analizi

KTS'nin beklenen performansını ve isterlerini sağlayabilen ve literatür çalışmalarında da karşılaşılan bilya vidalı ters krank biyel mekanizması dikkate alınmış, kinematik ve statik yük analizi yapılarak ihtiyaç duyulan elektrik motor torku, aktarma oranı ve diğer parametreler analitik olarak MATLAB®'da hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda, hedeflenen kriterler doğrultusunda kanatçık bağlantı miline gelen en yüksek tork ( $T_{k_{max}}$ ) 14 Nm ve kanatçık bağlantı milinin açısal hızı yani kanatçık açısal hızı ( $\omega_{12}$ ) 250°/s olarak belirlenmiştir. Bu değerler mekanizma çıkışında sağlanmak istenen en yüksek güç değerini belirlemektedir. Ayrıca aktarma kolunun hareket edebilme kabiliyeti  $\pm 30^\circ$  olarak belirlenmiştir.  $\omega_{12}$  ve  $T_{k_{max}}$  değerlerinin yüksek olması ve hacimsel kısıtlamanın fazla olması sebebiyle motor gereksinimlerinin çıkarılması için öncelikle motora kadar kullanılan aktarma mekanizmasının elemanları boyutlandırılmıştır. Bilya vidanın hatvesi ise seçilecek motoru mümkün mertebe hazır motor özelliklerine yaklaştırmak adına hesaplar birkaç kez tekrarlanarak bulunmuştur. Seçilen bilya vidanın çapı 10 mm, hatvesi ise 3 mm'dir. Yine hacim kısıtları göz önüne alınarak kullanılacak en büyük kanatçık kuvvet kolu uzunluğu ( $a_2$ ) 43 mm ve kanatçık dönme eksenini ile motor dönme eksenini arasındaki yatay uzaklık ( $a_1$ ) 149 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 5.1).

##### 5.1.1. Mekanizma kinematik analizi

Bu bölümde, mekanizmanın kinematik analizi için, önce pozisyon değişkenleri cinsinden mekanizmanın kapalı döngü denklemleri yazılmış ve daha sonra bu denklemlerin türevi alınarak hız bilgisine geçilmiştir. Mekanizma şematik olarak Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.1.** Ters krank biyel mekanizması kinematik çizimi

Bu mekanizmada hareket girdisi, kanatçık milinin yatay eksenle yaptığı açı ( $\theta_{12}$ ) olduğundan, pozisyon analizinde  $\theta_{14}$  ve  $s$ 'nin  $\theta_{12}$  cinsinden ifadeleri bulunmalıdır. Ters krank biyel mekanizmasının Şekil 5.1'de gösterilen parametreler cinsinden kapalı döngü denklemi Denklem 5.1'deki gibi yazılabilir:

$$a_2 * e^{i\theta_{12}} = a_1 + s * e^{i\theta_{14}} + ic \quad (5.1)$$

Bu denklemden, x ve y eksenlerine indirgenmiş iki eşitlik sırasıyla Denklem 5.2 ve 5.3 şeklinde elde edilir.

$$a_2 * \cos(\theta_{12}) = a_1 + s * \cos(\theta_{14}) \quad (5.2)$$

$$a_2 * \sin(\theta_{12}) = c + s * \sin(\theta_{14}) \quad (5.3)$$

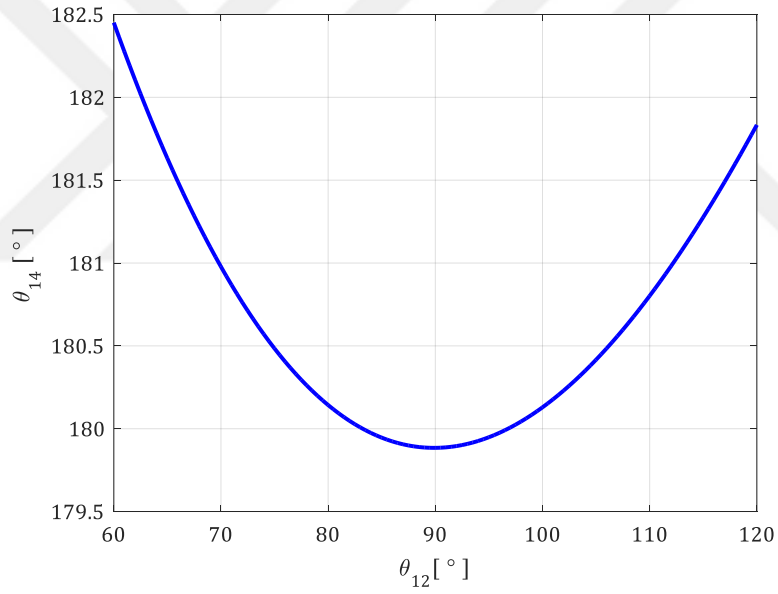
Denklem 5.2 ve Denklem 5.3'ün her iki tarafının kareleri alınarak taraf tarafa toplanıp gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;  $s$  ve  $\theta_{14}$  açısı Denklem 5.4 ve Denklem 5.5.'te verildiği gibi elde edilir:

$$\theta_{14}(\theta_{12}) = \pi + \tan^{-1} \left( \pm \frac{\sqrt{s^2 - (c + a_2 \cdot \sin \theta_{12})^2}}{(c + a_2 \cdot \sin \theta_{12})} \right) \quad (5.4)$$

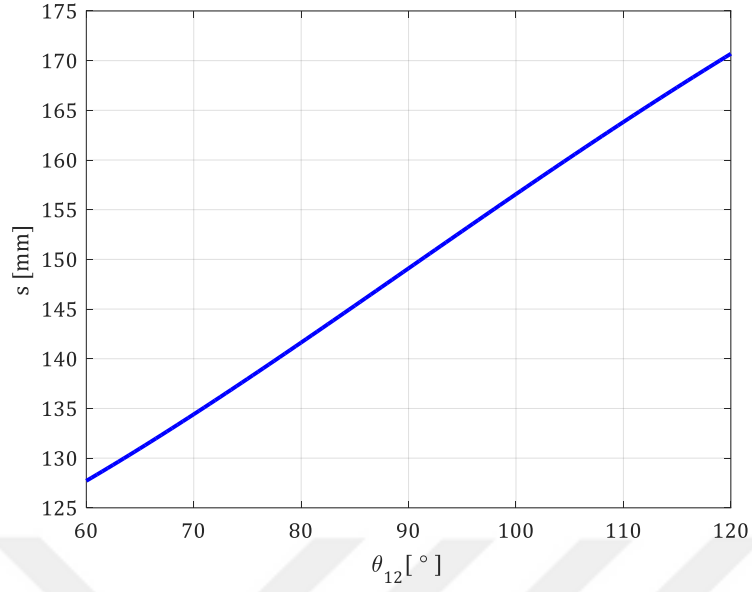
$$s = \sqrt{(a_1^2 + a_2^2 + c^2 - 2 \cdot a_2 \cdot c \cdot \sin \theta_{12} + 2 \cdot a_2 \cdot a_1 \cdot \cos \theta_{12})} \quad (5.5)$$

$$s > 0; \theta_{14} \neq k \cdot \frac{\pi}{2}; k = \pm 1, \pm 3, \dots$$

Mekanizmanın çalıştığı süre boyunca  $\theta_{12}$  açısının  $60^\circ$  ile  $120^\circ$  arasında değiştiği bilinmektedir. Ayrıca  $a_1$  ve  $a_2$  boyutları da 149 mm ve 43 mm olarak alınmıştır. Mekanizmanın yerleşiminden dolayı eksen kaçıklığı ( $c$ ) 42,7 mm olarak belirlenmiştir.  $\theta_{14}$  ve  $s$ 'nin  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimleri grafik olarak Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.2.  $\theta_{14}$ 'ün  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi



**Şekil 5.3.** Somun hareketinin  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi

Şekil 5.3 incelendiğinde bilya vida somununun yaptığı toplam ötelemenin 43 mm olduğu anlaşılmaktadır. KTS motoru olarak kullanılan eyleyicinin, mekanizma analizi sonrası elde edilen somun kuvveti gereksinimini karşılaması gerekir. Motor pozisyon değişimi ( $\theta_m$ ), bilya vida hatvesi vasıtasıyla doğrusal somun yer değiştirmesi  $s$ 'ye dönüştürülür. Bilya vida hatvesi, motor konumu ve doğrusal somun yer değiştirmesi arasındaki matematiksel bağıntının parametrik ilişkileri Denklem 5.6'da verilmiştir. Bu denklemdeki  $s_0$  somunun ilk konumunu,  $\theta_m$  motor konumunu,  $p$  ise bilya vida adımını sembolize etmektedir. Hatve 3 mm'dir.

$$s = s_0 + p \cdot \theta_m \quad (5.6)$$

$$p = \text{hatve} * \frac{1}{\text{rev}} \quad (5.7)$$

Pozisyon analizi sonucu motor açı değişimi ve kanatçık açı değişimi bilindiğinden, mekanizmanın herhangi bir andaki aktarma oranı bu iki pozisyonun oranına eşittir. Buna göre, aktarma oranının  $\theta_{12}$  cinsinden ifadesi Denklem 5.9'daki gibi yazılır.

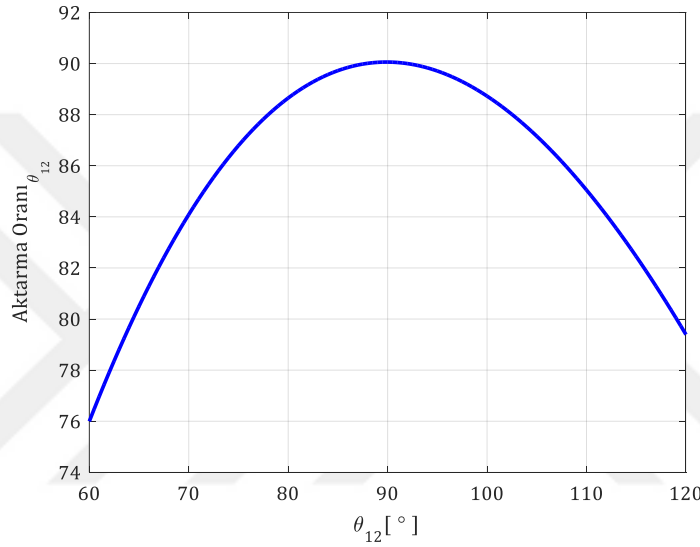
$$N(\theta_{12}) = \frac{\theta_m}{\theta_{12}} = \frac{(s - s_0)/p}{\theta_{12}} \quad (5.8)$$

$$N(\theta_{12}) = \frac{(\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + c^2 - 2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \cos \theta_{12} - 2 \cdot c \cdot a_2 \cdot \sin \theta_{12} - s_0})/p}{\theta_{12}} \quad (5.9)$$

Şekil 5.4'te mekanizma aktarma oranının  $\theta_{12}$  ile değişimi verilmiştir. Buradan en kritik aktarma oranları  $60^\circ$  ve  $120^\circ$ 'de elde edilmektedir. Bunlar sırasıyla,

En küçük açıda aktarma oranı:  $N(60^\circ)=76$

En büyük açıda aktarma oranı:  $N(120^\circ)=79,4$



**Şekil 5.4.** Mekanizma aktarma oranının  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi

KTS mekanizması tasarlanırken, kanatçıklardan belli bir hızda belli bir moment sağlayacak şekilde mekanizma tasarımı ve bu mekanizma için gerekli isterleri sağlayacak tahrik motorunun kullanılması gerekmektedir.

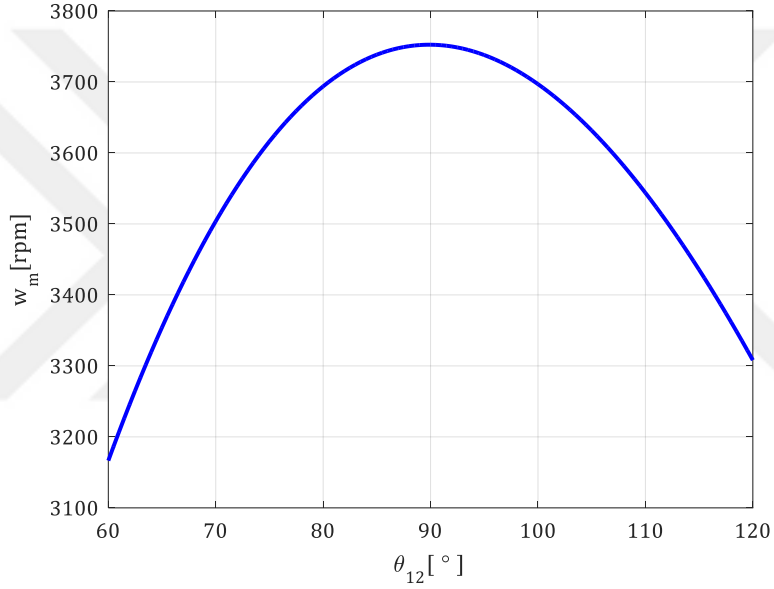
Hız analizi, motor seçimine girdi sağlaması açısından önemlidir. Seçilecek olan motorun, hız analizi sonrası elde edilecek somun hız gereksinimini karşılaması gereklidir. Hız analizinde girdi olarak kanatçık dönüş hızı ( $\omega_{12}$ ) alınır. Hız analizi yapılırken, pozisyon analizinde elde edilen x ve y eksenlerine indirgenmiş denklemlerin birinci türevleri alınarak gerekli düzenlemeler yapılır. Buna göre elde edilen  $\omega_{14}$  ve  $v_4$ 'ün  $\omega_{12}$  cinsinden ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$\omega_{14}(\omega_{12}) = \frac{a_2 * \cos(\theta_{14}(\theta_{12}) - \theta_{12})}{s(\theta_{12})} * \omega_{12} \quad (5.10)$$

$$v_4(\theta_{12}) = a_2 * \omega_{12} * \sin(\theta_{14}(\theta_{12}) - \theta_{12}) \quad (5.11)$$

Buradan, motorun hız gereksinimi elde edilebilir. Bilya vida hatvesi 3 mm ve kanatçık açılma hızı ( $\omega_{12}$ ) 250°/s olarak alınırsa, Denklem 5.11 yardımıyla motorun hız grafiği elde edilir. Buna göre,  $\theta_{12}$ 'nin 60° ile 120° arasındaki hareketi için, motor açılma hızı  $\omega_m$ 'nin  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi Şekil 5.5'te verilmiştir.

$$\omega_m(\theta_{12}) = \frac{v_4(\theta_{12})}{p} \quad (5.12)$$

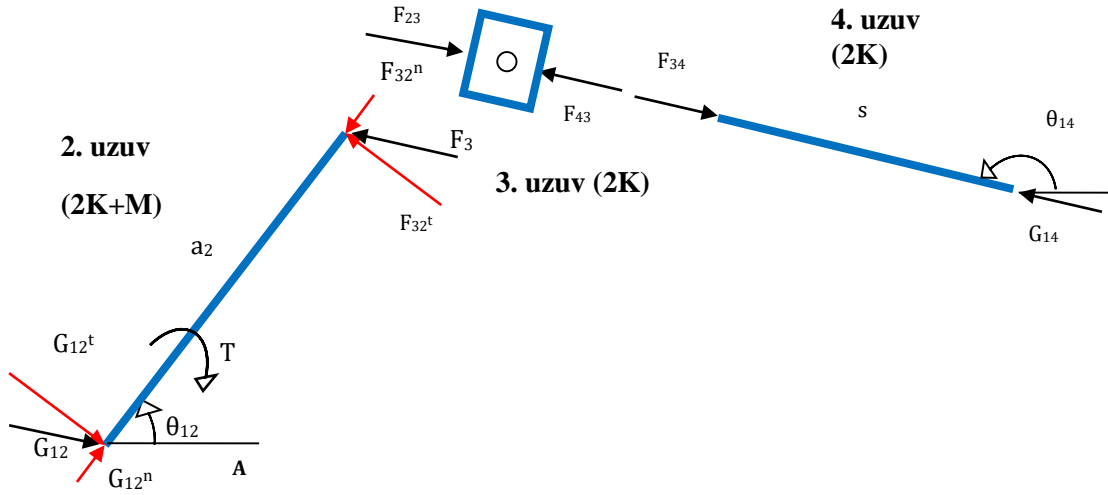


**Şekil 5.5.** Motor açılma hızı  $\omega_m$ 'nin  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi

Şekil 5.5'e göre kullanılacak motorun en büyük açılma hızı,  $\omega_{m,max}$  3750 devir/dakika'dır.

### 5.1.2. Mekanizma kuvvet analizi

Mekanizmanın kuvvet analizi, mekanizma elemanlarının tasarımında önemli bir yere sahiptir. Kuvvet analizi sonrası elde edilecek somun yükleri yardımıyla, mekanizmayı sürmek için gereken motor torku yaklaşık olarak bulunabilir ve mekanizmanın değişik noktalarındaki yataklamaların taşıması gereken yükler belirlenebilir. Bu tasarım hesabında mekanizmanın statik analizi yapılmıştır. Statik analiz için aşağıda mekanizma elemanlarının serbest cisim diyagramları verilmiştir (Şekil 5.6).



**Şekil 5.6.** Mekanizma uzuvlarının serbest cisim diyagramları

Kuvvet kolunun hareket açısı ( $\theta_{12}$ ) bilindiğinden, mekanizmaya etkiyen kuvvet ve momentler  $\theta_{12}$  değişkeni cinsinden bulunabilir. Şekil 5.6'da verilen kuvvet ve momentler için uygun yönlere kuvvet ve moment dengesi denklemleri yazılarak mekanizmanın statik analizi yapılır. Buna göre, her uzuv için kuvvet ve moment denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

### 2. Uzuv

$$G_{12}^t - F_{12}^t = 0 \quad (5.13)$$

$$G_{12}^n - F_{12}^n = 0 \quad (5.14)$$

$$-T + F_{32}^t a_2 = 0 \quad (5.15)$$

$$F_{32}^t = F_{32} \cos(\theta_{12} - \theta_{14}) \quad (5.16)$$

$$F_{32}^n = F_{32} \sin(\theta_{12} - \theta_{14}) \quad (5.17)$$

### 3. Uzuv

$$F_{23} = -F_{32} \quad (5.18)$$

$$F_{23} + F_{43} = 0 \quad (5.19)$$

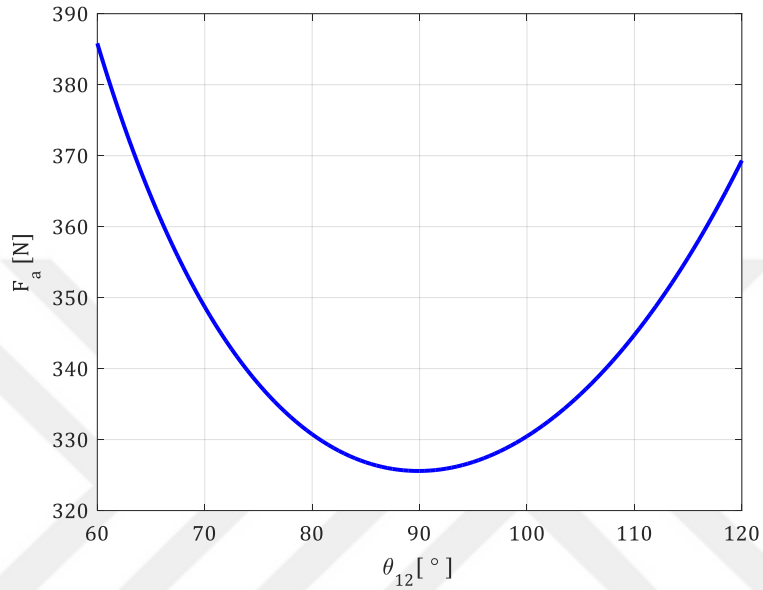
### 4. Uzuv

$$F_{34} = -F_{43} \quad (5.20)$$

$$F_{34} + G_{14} = 0 \quad (5.21)$$

Bu denklemlerin birlikte çözülmesiyle, kuvvetler  $\theta_{12}$  ve  $\theta_{14}$  cinsinden elde edilir. Kanatçık torkunun en büyük değerinin hareketin ters yönünde etki ettiği kabul edilerek  $F_{23}$  bulunur.

$$F_{23} = F_a = -F_{32} = \frac{-T}{a_2 \sin(\theta_{12} - \theta_{14})} \quad (5.22)$$

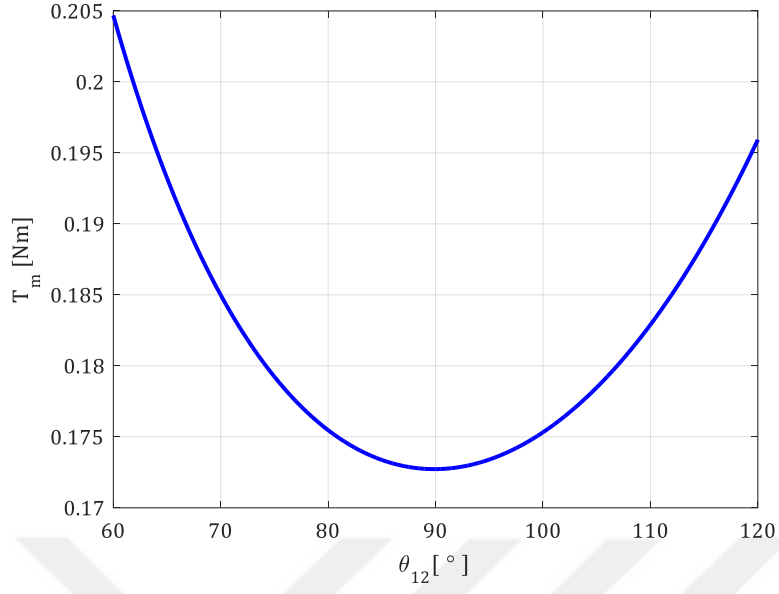


Şekil 5.7. Somun üzerine düşen kuvvetin  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi

$F_a$  kuvveti büyüklük olarak motorun yataklarında kanatçık torku dolayısıyla oluşacak kuvvete de eşittir. Buna göre  $60^\circ$  ile  $120^\circ$  arasındaki  $\theta_{12}$  değerleri için  $F_a$ 'nın  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir.

Grafikten anlaşıldığı üzere somuna etki eden en büyük kuvvet  $60^\circ$ 'de oluşur ve yaklaşık 385 N'dur. Buna göre, seçilecek motor bu kuvveti sağlayabilmelidir. Buradan, somun üzerine düşen kuvvetler kullanılarak bilya vidayı çevirmek için gereken motor torkuna ulaşılabilir. Bilya vidanın hatvesi 3 mm ve verimliliği ( $\eta$ ) %90 alınarak motor tork gereksiniminin  $\theta_{12}$ 'ye bağlı grafiği Şekil 5.8'deki gibi elde edilir.

$$T_m = \frac{F_a \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (5.23)$$

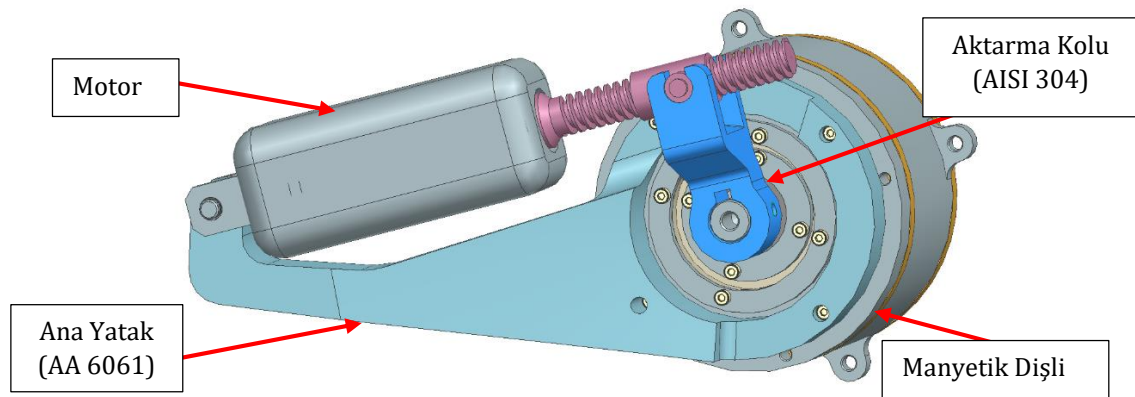


**Şekil 5.8.** Motor tork gereksiniminin  $\theta_{12}$ 'ye göre değişimi

Grafiğe göre, mekanizmanın hareketi boyunca gereken en büyük motor durdurma torku 0,205 Nm'dir. Sonuç olarak KTS'de kullanılacak motorun isterleri sağlayabilmesi için en yüksek torku 0,205 Nm ve en yüksek açısal hızı 3750 devir/dakika olmalıdır.

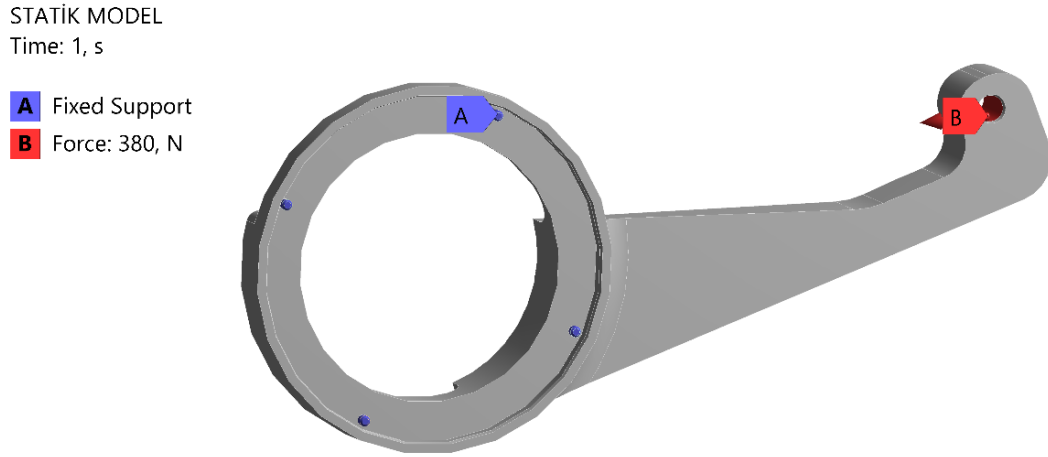
## 5.2. Model ve Yapısal Analiz

KTS mekanizmasının analitik analizi ile birlikte MD giriş kısmına bağlanacak mekanizmanın uzuvları geometrik olarak belirlenmiştir. Uzuvların geometrisine uygun olarak katı modelleme yapılmış ve mekanizmanın ana hatları meydana gelmiştir. Şekil 5.9'da MD KTS modeli gösterilmiştir.



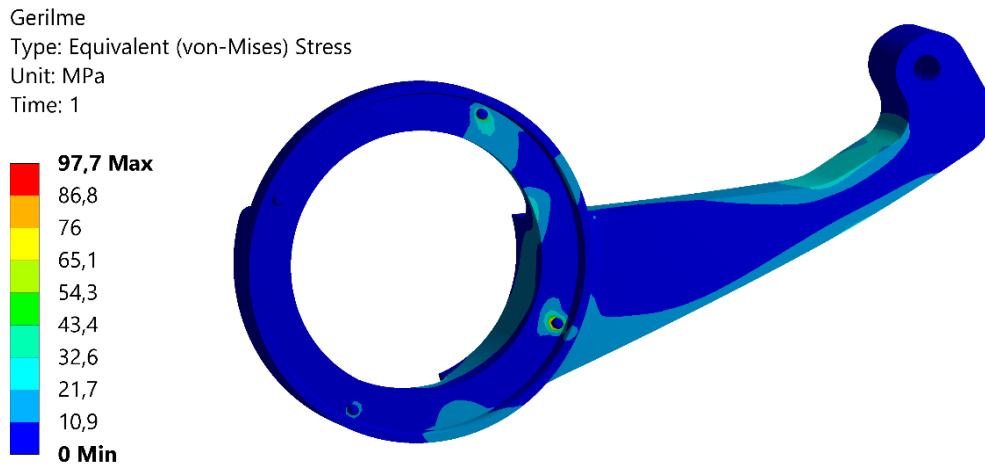
**Şekil 5.9.** MD KTS tasarımı ve malzemeleri

MD KTS ana bileşenleri ana yatak, aktarma kolu ve motordan oluşmaktadır. Motor kısmı rijit olarak kabul edilmiş ve motora mekanizma analizinden hesaplanan en yüksek kuvvet uygulanmıştır. MD KTS modelinin yapısal analizi için hesaplanan kuvvet Şekil 5.10'da verilen ana yatağa pim deliğinden motor eksenine doğrultusunda tanımlanmıştır. En kritik parçalardan birisi olan ana yatak, civata deliklerinden sabitlenerek yapısal davranışı incelenmiştir.



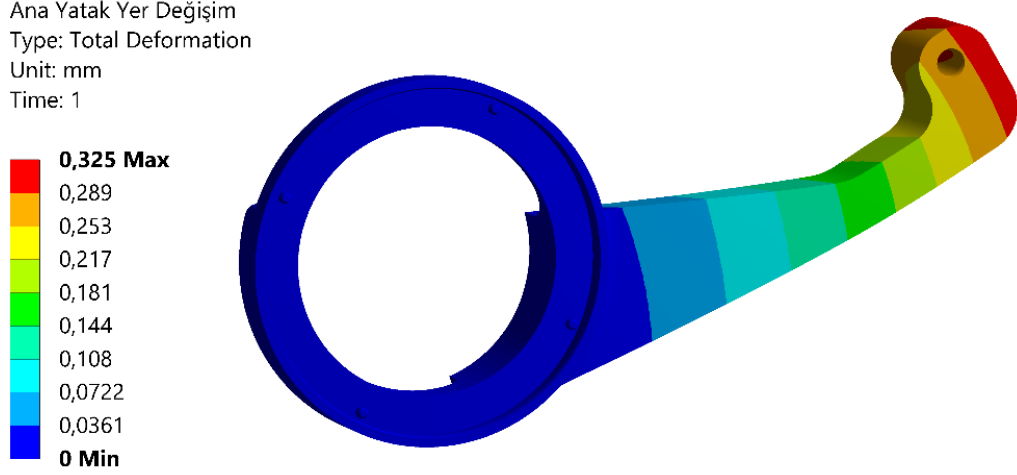
Şekil 5.10. Ana yatak yapısal analiz

Ana yatak malzemesinin tanımlanması ve uygun ağ yapısı işlemlerinin ardından en yüksek gerilme 97,7 MPa olarak sayısal analizlerden elde edilmiştir (Şekil 5.11).



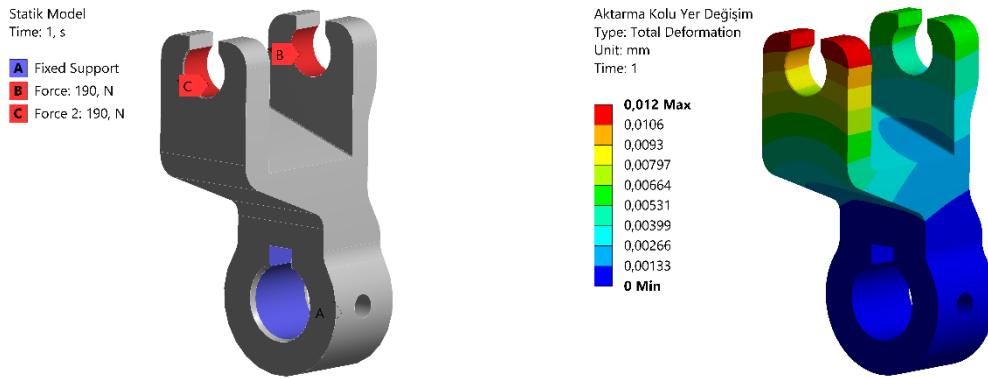
Şekil 5.11. Ana yatak gerilme analizi

Şekil 5.12 incelendiğinde ana yatak parçasının motor eksenı boyunca 0,325 mm hareket ettiği gözlemlenmiştir. En yüksek kuvvet altında mekanizmanın  $a_1$  uzvunun, bu değişimi aktarma oranına çevrildiğinde %0,2'lik fark meydana getirebileceği hesaplanmış ve yüksek tork yüklerinde bu değişim dikkate alınmıştır.



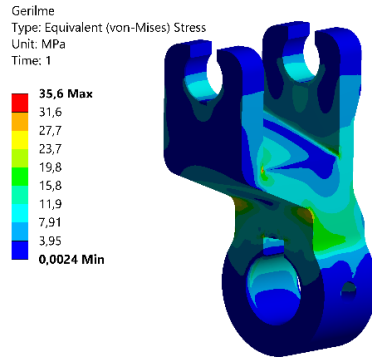
Şekil 5.12. Ana yatak yer değişimi

MD KTS'nin diğer parçası olan aktarma kolunun motor eksenı doğrultusunda Şekil 5.13'te belirtilen kısımlarına toplam 380 N kuvvet tanımlanmış ve uzuv, mil göbek kısmından sabitlenerek yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar en yüksek yer değişiminin 0,012 mm olduğunu göstermiştir.



Şekil 5.13. Aktarma kolunun yapısal analizi ve toplam yer değiştirmesi

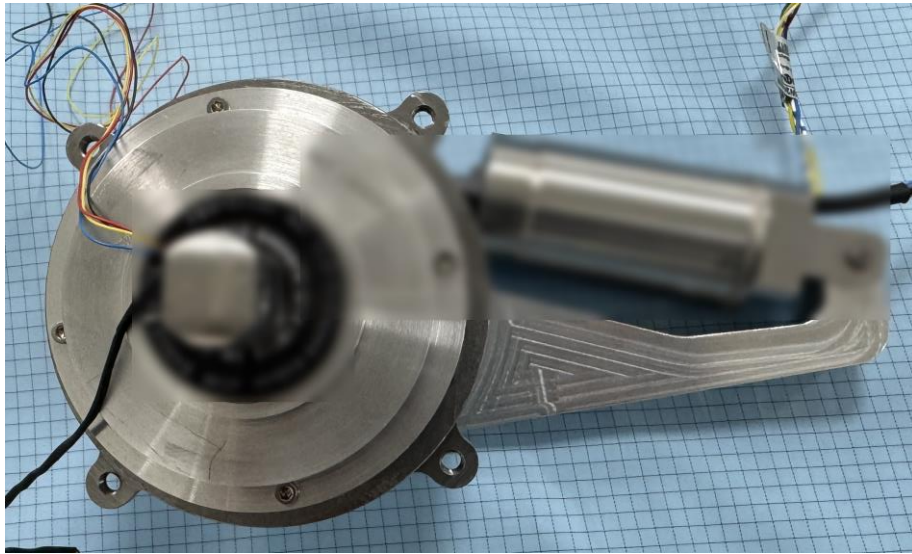
Aktarma kolu parçasının gerilme analizi, parçada en yüksek 35,6 MPa gerilme oluştuğunu göstermiştir (Şekil 5.14). Genel olarak MD KTS'nin yapısal davranışı incelendiğinde geliştirilen tasarımın emniyetli olduğu görülmüş ve performans testlerine geçilmiştir.



Şekil 5.14. Aktarma kolunun gerilme analizi

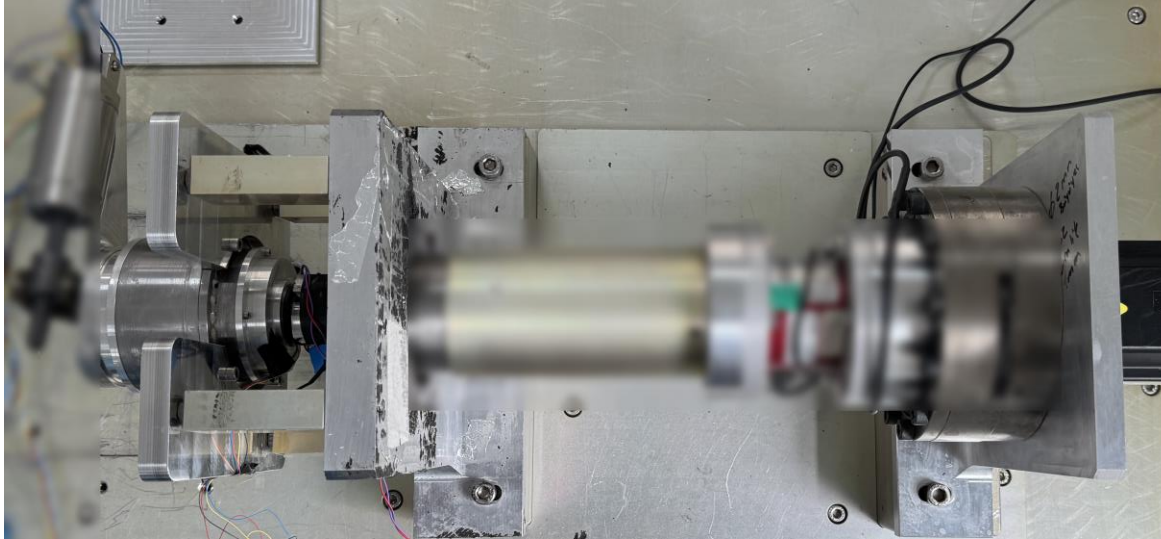
### 5.3. KTS Performans Test Sonuçları

MD KTS için tasarlanan parçaların imal edilmesi ile montajlama işlemi yapılmıştır. MD KTS'nin yapısı gereği, motorun arkasında bulunan kodlayıcı ile pozisyon kontrolü yapılmıştır. Motor arkasında 12 bite sahip  $0,087^\circ$  hassasiyetinde arttırımlı kodlayıcı kullanılmıştır. Mekanizmanın aktarma oranı hesaba katıldığında MD giriş kısmı yani mekanizma çıkışında  $0,001^\circ$  hassasiyete sahip pozisyon değeri elde edilmiştir. Ayrıca, MD çıkış kısmına bağlanan 16 bite sahip  $0,0054^\circ$  ölçüm hassasiyetli çözücü sayesinde giriş ile çıkış tarafları arasında hassas pozisyon ölçümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.15).



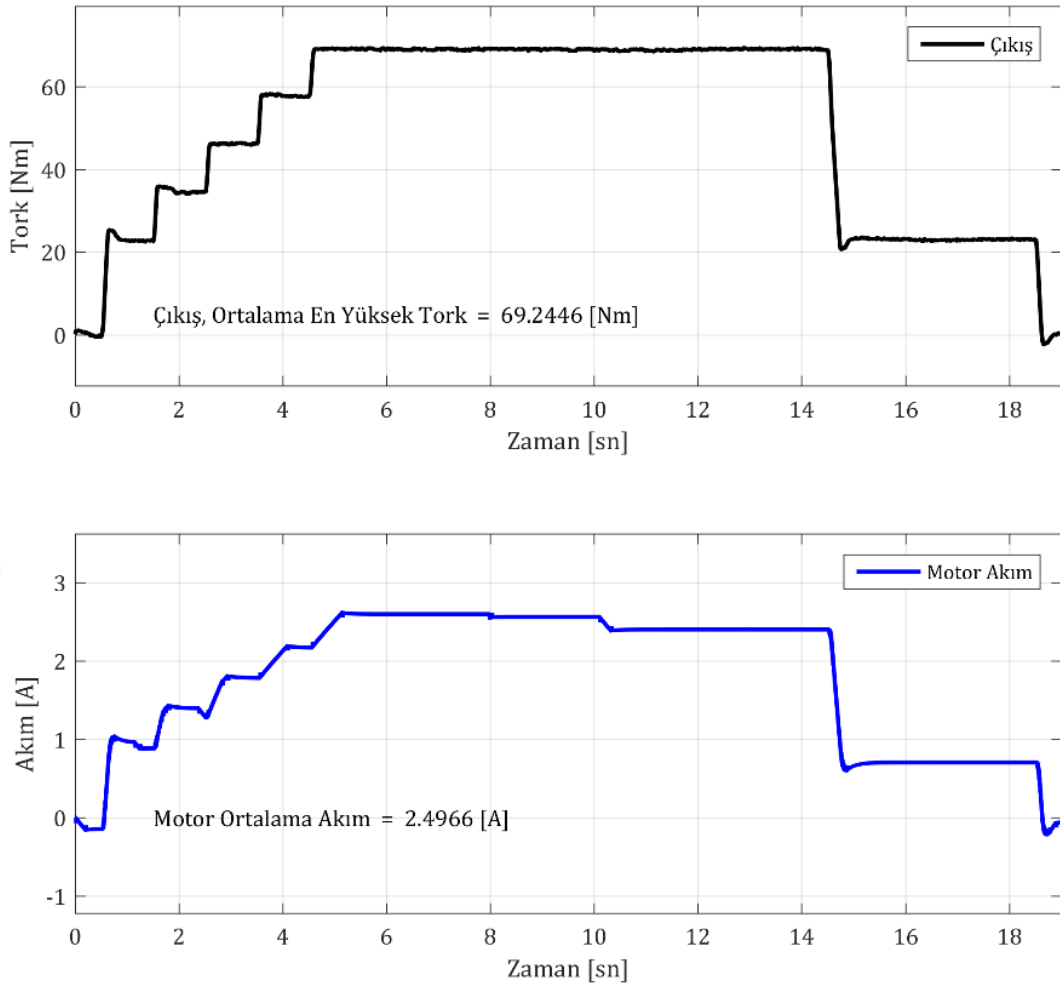
Şekil 5.15. Manyetik dişlili kanatçık tahrik sistemi prototipi

MD KTS, performans ölçümleri için TKYC'ye bağlanarak gerçek zamanlı testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.16). MD KTS'ye istenilen pozisyonda tork yükü uygulanarak performansı gözlemlenmiştir.



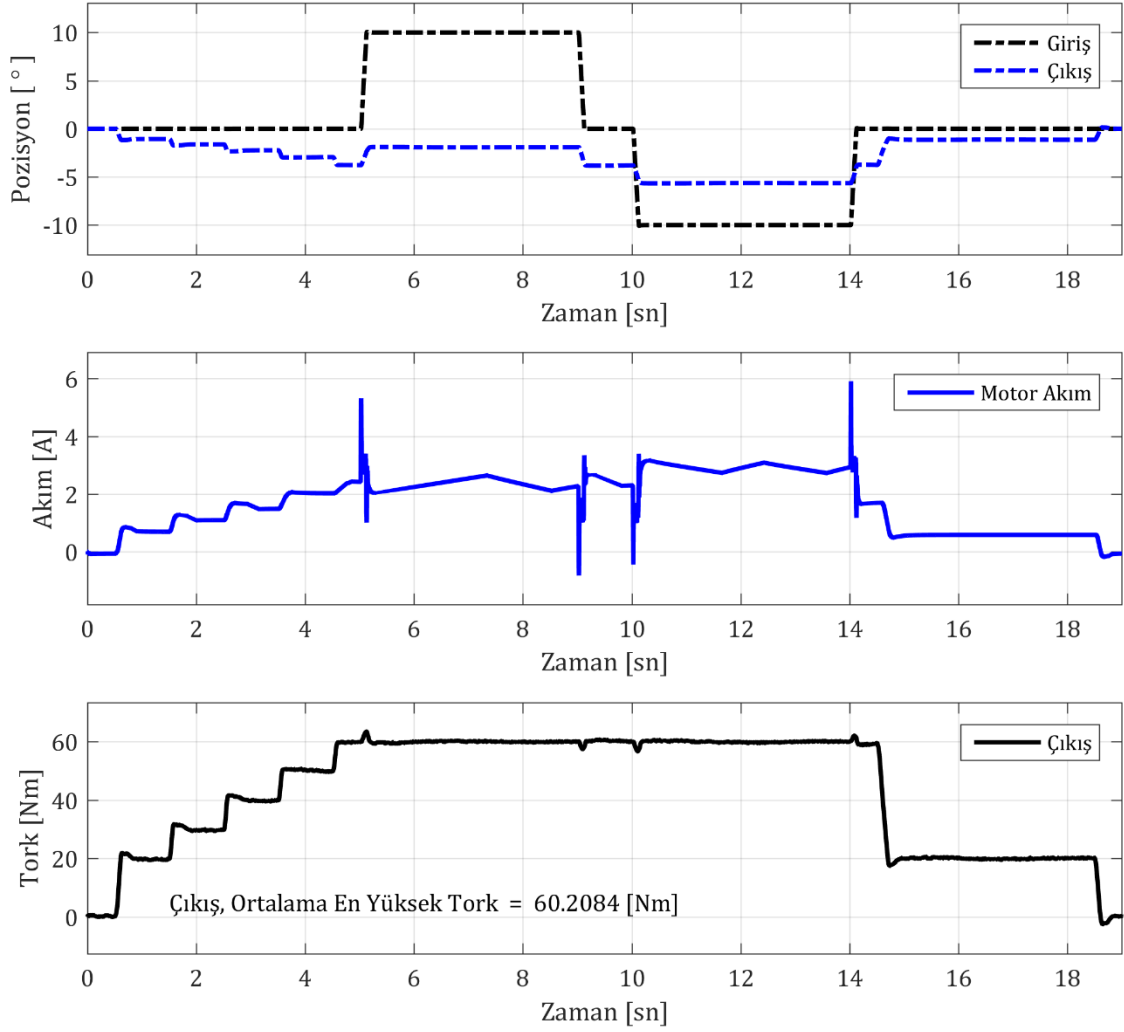
**Şekil 5.16.** MD KTS prototip ve TKYC

Şekil 4.3'teki elektriksel şemaya benzer şekilde KTS kısmına pozisyon emri verilerek TKYC kısmından tork yükü oluşturulmuştur. İlk testlerde KTS'ye 'tut' emri yani 0°'de 'dur' emri verilmiş ve ardından TKYC'de kademeli olarak tork yükü oluşturulmuştur. MD  $V_1$  KTS'ye 5 sn boyunca ortalama 69,24 Nm tork değerinde yük uygulanmıştır (Şekil 5.17). Yük altında motor sürücüsü ortalama olarak 2,49 A akım çekmiştir. Kullanılan motorun tork katsayısı 0,055 Nm/A kabul edilerek mekanizmanın 90°'deki aktarma oranı Şekil 5.4'ten hesaplanan 90 olarak belirlenmiştir. Motor akımı üzerinden hesaplanan mekanizma çıkış tork değeri yani MD giriş tork değeri 12,58 Nm ( $90 \cdot 0,056 \cdot 2,49$ ) olarak elde edilmiştir. MD aktarma oranı ile bu değer çarpıldığında analitik olarak 67,01 Nm ( $12,58 \cdot 5,33$ ) çıkış torku hesaplanmıştır. KTS kısmında bulunan motor katsayısının ideal şartlarda sağlanmış olması ve sürücü belirsizlikleri bulunması sebebiyle deneysel ile analitik değerler arasında fark çıkması muhtemel bir durumdur.



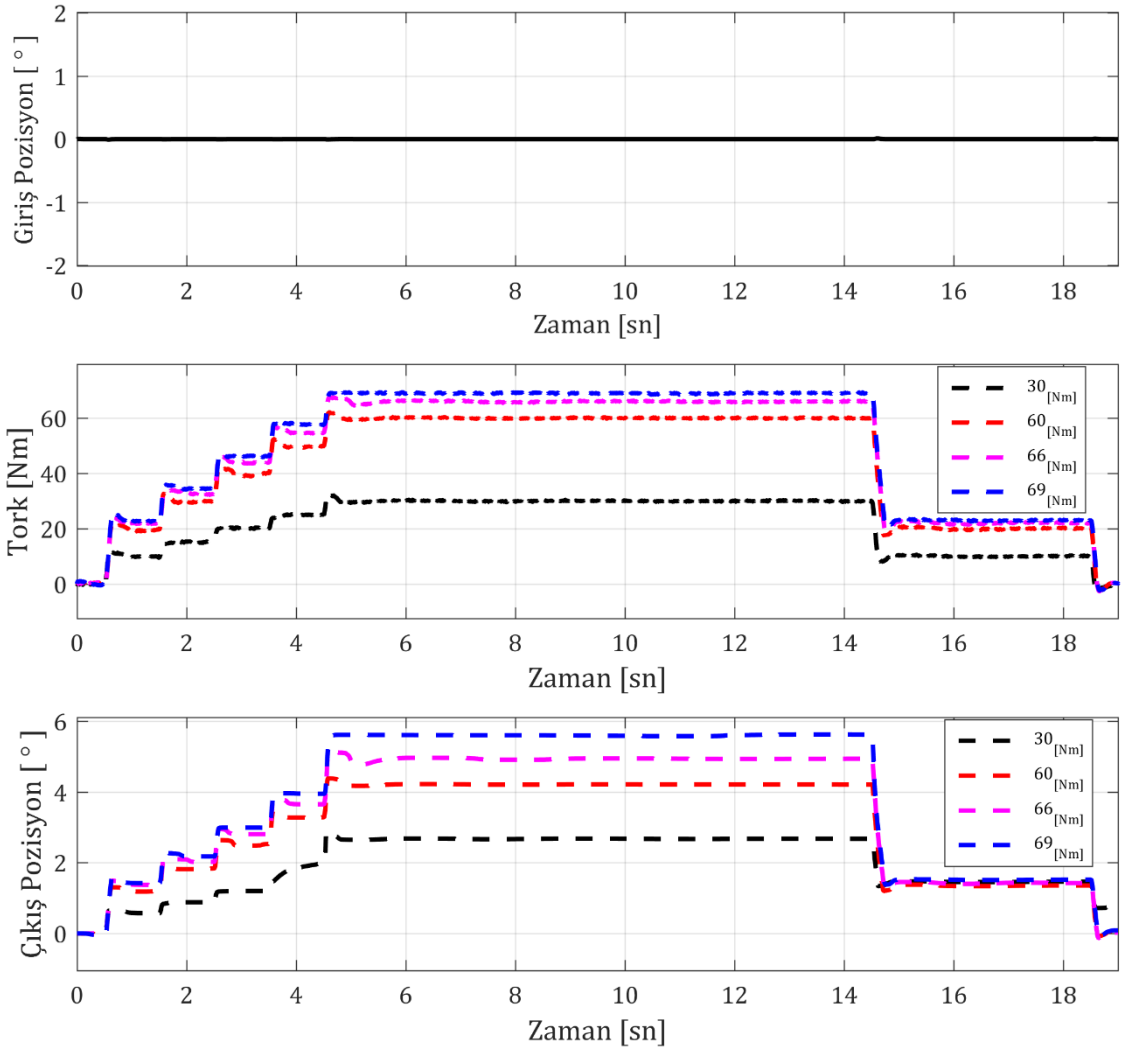
**Şekil 5.17.** MD V<sub>1</sub> KTS tasarımı için performans testi

TKYC sistemine bağlanmış MD V<sub>1</sub> ile yapılan testlerde hareket esnasında performansı incelenmiştir. KTS kısmında motora  $\pm 10^\circ$  kare pozisyon emri verilerek 60 Nm altında hareket ettirilmiştir. MD giriş ile çıkış arasında meydana gelen pozisyon değişimi verilmiştir. Aktarma oranı 5,33'e yakın kalmış ama yükleme ile birlikte çıkış kısmında açı değişimi meydana gelmiştir (Şekil 5.18). 5, 9, 10 ve 14. sn'deki akım değerleri hareket esnasında hızdan kaynaklı artış göstermiş olup kontrolcü performansına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. 60 Nm tork yükü altında sabit tork uygulanan bölgelerde Şekil 5.17'de gerçekleşen teste benzer sonuçlar meydana gelmiştir.



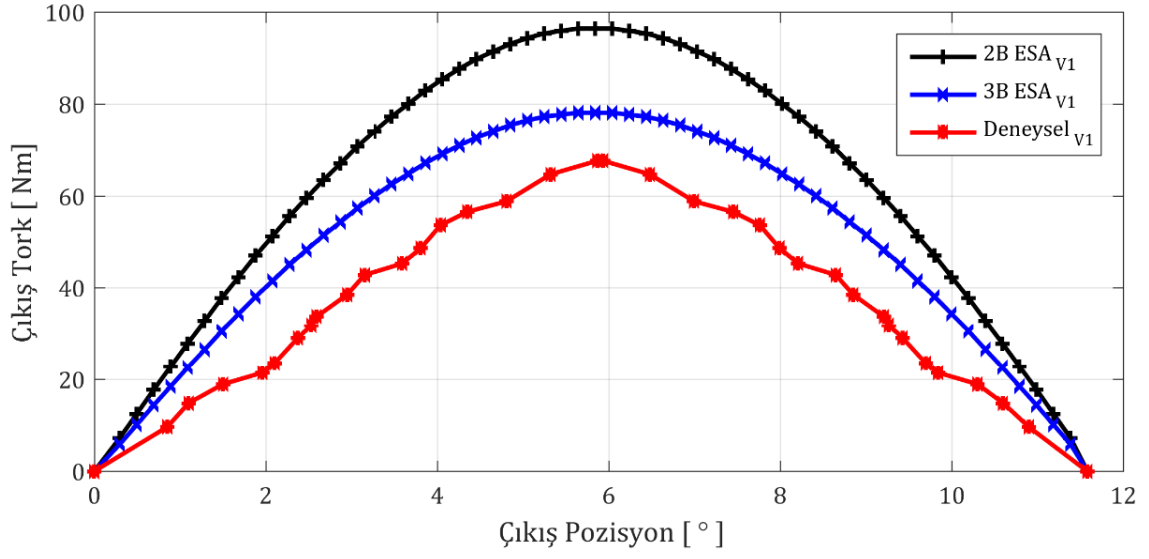
**Şekil 5.18.** MD V<sub>1</sub> KTS tasarımı için 60 Nm altındaki harekette motor akım grafiği

MD V<sub>1</sub> KTS'nin çıkış kısmına bağlı olan pozisyon okuyucudan alınan veriler ile uygulanan tork yükü birbirleri ile kıyaslanmıştır. Bu işlemde KTS tarafına 0° 'tut' emri verilerek farklı tork yükleri uygulanmıştır. Şekil 5.19'da çıkış tarafından elde edilen pozisyon verisinin farklı tork yüklerinde farklı pozisyonlar elde edildiği gözlemlenmiştir. MD V<sub>1</sub> giriş kısmı pozisyonu 0°'de dururken tork yüküne göre çıkış kısmı değişkenlik göstermiştir. MD tasarımında karşılaşılan bu olay manyetik akının MD'de farklı pozisyonlarda farklı yük taşıma kapasitesi olduğunu göstermiştir. ESA'da elde edilen Şekil 2.34'teki en yüksek tork çıktısı pozisyonu hesaplanan 5,9°, Şekil 5.19'daki grafikte 69 Nm yük altında deneysel olarak 5,77° olarak ölçülmüştür. ESA ile deneysel veri arasındaki farkın sebebi deneysel şartlarda uygulanan tork değerinin en yüksek tork değerine yaklaşamamasıdır. Sistem, boşa düşme tehlikesinden dolayı en yüksek tork yükü altında incelenememiştir. Açısal fark bu sebeple meydana gelmiştir.

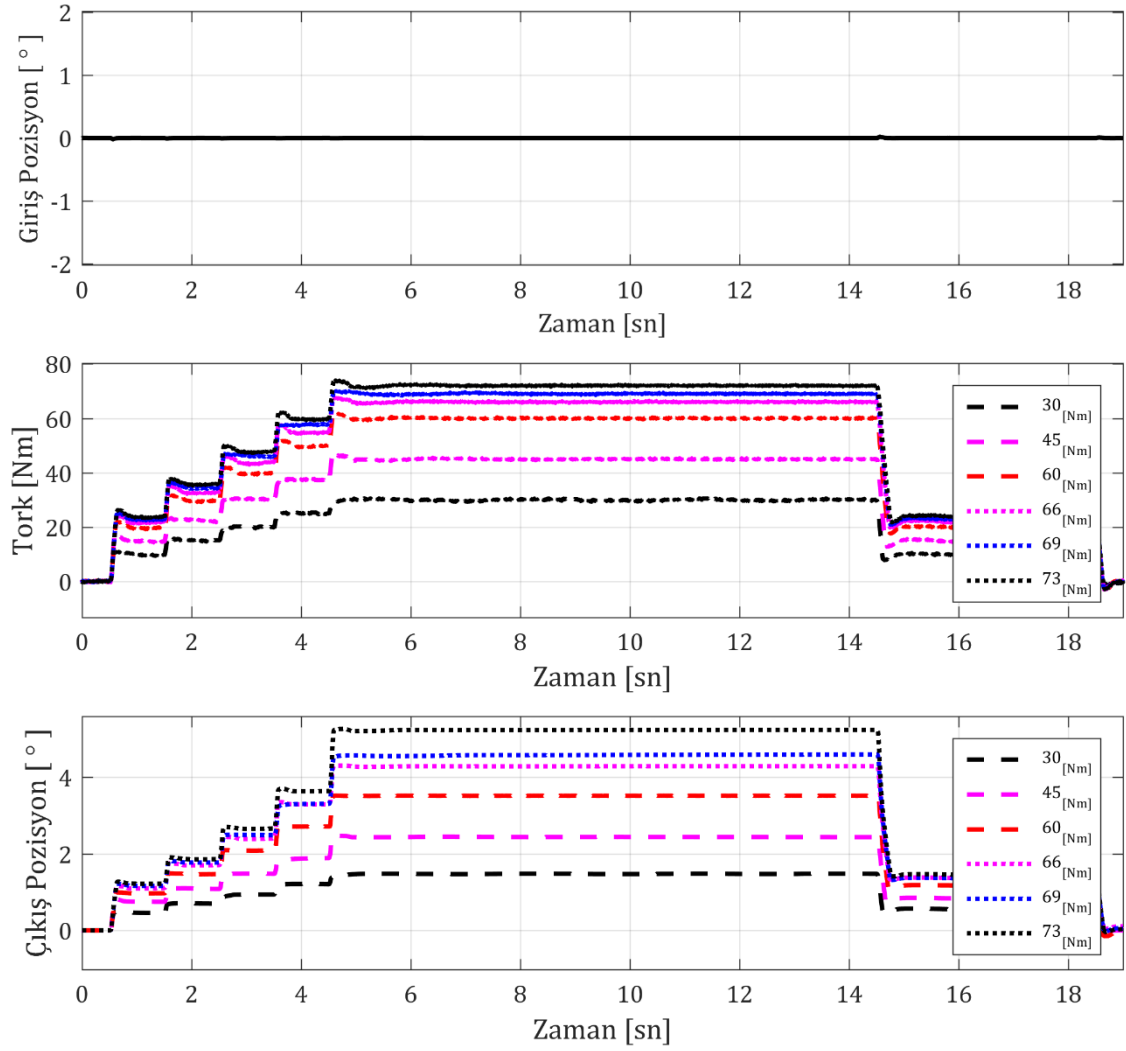


**Şekil 5.19.** MD V<sub>1</sub> KTS tasarımı için farklı yük pozisyon değişimi

MD V<sub>1</sub> tasarımı için giriş kısmı KTS tarafından 0°'de tutularak çıkış kısmından farklı tork yükleri uygulanmış ve çıkış kısmındaki açı değişimi Şekil 5.19'da sunulmuştur. Ayrıca tork değerine bağlı olarak çıkış pozisyonunun değişimi ESA verilerinden elde edilen veriler ile Şekil 5.20'de kıyaslanmıştır. Benzer eğilimlerde olsalar da 2B, 3B ve deneysel tork değerlerinde beklenildiği gibi farklar oluşmuştur.

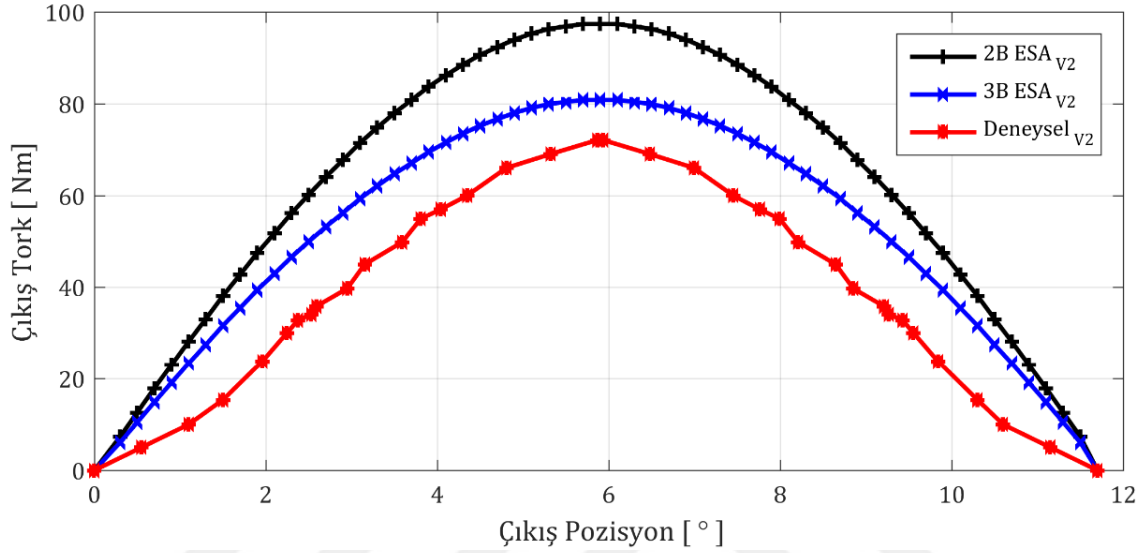


Şekil 5.20. MD V<sub>1</sub> KTS tasarımı için sayısal ve deneysel tork-pozisyon karşılaştırması



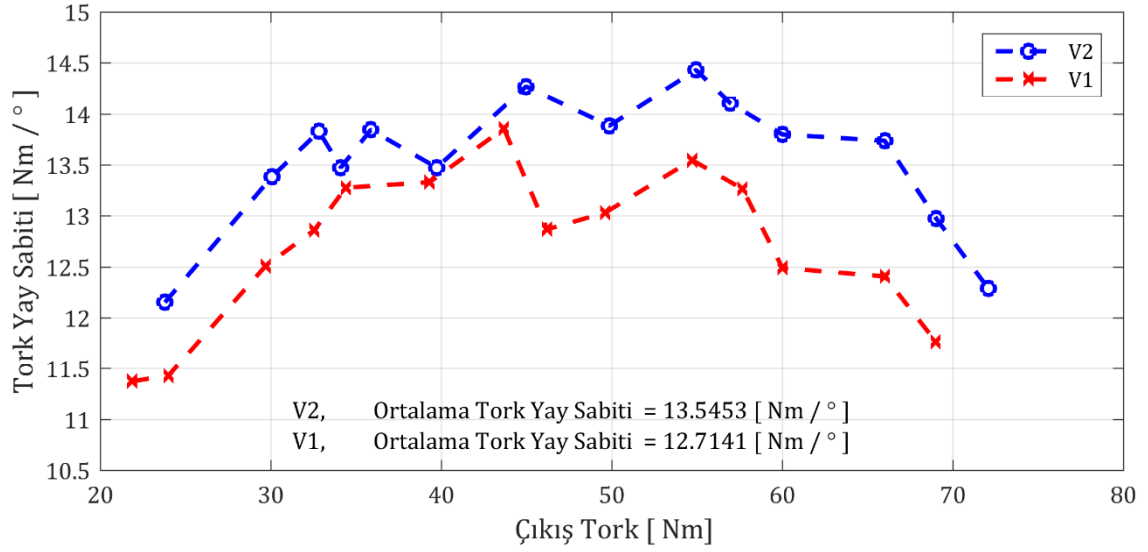
Şekil 5.21. MD V<sub>2</sub> KTS tasarımı için farklı yük pozisyon değişimi

MD V<sub>2</sub> için giriş kısmı KTS tarafından 0°'de tutularak çıkış kısmından farklı tork yükleri uygulanmış ve çıkış kısmındaki açı değişimi Şekil 5.21'de sunulmuştur. Ayrıca, tork değerine bağlı olarak çıkış pozisyonunun değişimi ESA verilerinden elde edilen veriler ile Şekil 5.22'de kıyaslanmıştır. Birinci MD versiyonuna benzer şekilde eğilimlerde olsalarda 2B, 3B ve deneysel tork değerlerinde beklenildiği gibi farklar oluşmuştur.



**Şekil 5.22.** MD V<sub>2</sub> KTS tasarımı için sayısal ve deneysel tork-pozisyon karşılaştırması

MD'nin temel çalışma prensibi incelendiğinde DR ve İR'de bulunan mıknatısların oluşturduğu manyetik alan OR'deki segmentlere yay gibi davranmış ve Şekil 5.23'te gösterilen değişim meydana gelmiştir. Tork yükünün açı değişimine oranından MD V<sub>1</sub> ve MD V<sub>2</sub> için ortalama manyetik tork yay sabiti sırasıyla 12,71 Nm/° ve 13,54 Nm/° olarak hesaplanmış ve Şekil 5.23'te sunulmuştur. MD tasarımları için deneysel manyetik tork yay sabiti değerleri karşılaştırılmış ve ortalama değerleri farklılık gösterse de manyetik tork yay sabiti değişimi benzer eğilim göstermiştir.



**Şekil 5.23.** MD KTS tasarımı için manyetik tork yay sabiti

MD KTS çalışma prensibinde, motorun kontrolü pozisyona bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. KTS gibi hassas mekanizmalarda bağlantı noktalarındaki belirsizlik çıkış tarafında küçük açılara eşit olduğundan ihmal edilerek motor tarafına yerleştirilen pozisyon sensörü ile kontrolcü çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, MD KTS yapısında çıkış kısmı, MD'nin çıkış tarafına eş geldiğinden dolayı bazı belirsizlikler meydana gelmiştir. Manyetik alan, segmentlere yük olarak dönüştürüldüğünde segment ile mıknatıslar arasında bir yay etkisi meydana geldiğinden KTS tarafında farklı bir bilinmezlik ortaya çıkmıştır. Bu durum mekanik olarak düşünülürse dişliler arasında sanki yay varmış gibi bir davranış ortaya çıkmıştır. Bu mekanik hareketten dolayı KTS gibi hassas mekanizmaların motor tarafından pozisyon sensörü ile kontrol edilmesi bu belirsizliği hesaba katmamak demektir. Çıkış tarafındaki yüke bağlı bu ciddi pozisyon değişimini kontrol sistemine dahil etmek için MD KTS'de kontrolcü tasarımında pozisyon geri beslemesinin MD çıkış tarafından alınması KTS'deki bu belirsizliği çözebilecektir. Bu sayede MD'nin tork yayı gibi davranışı, sistem kontrolü ve matematiksel modele dahil edilerek belirsizlikler en aza indirilebilir. Bu tip kontrolcüler geliştirilerek MD KTS performansı uygun hale getirilebilir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Kanatçık Tahrik Sistemleri (KTS) için güç aktarım mekanizmalarında kullanılabilecek, yağsız ve sürtünmesiz koşullarda çalışabilen eş eksenli Manyetik Dişliler (MD) geliştirilmiştir. Tasarım sürecinde, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) Sonlu Elemanlar Modelleme (SEM) yaklaşımıyla gerçekleştirilen Elektromanyetik Sayısal Analiz (ESA) bulguları dikkate alınarak optimum performans kriterlerini sağlayan prototipler geliştirilmiş ve üretilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel testlerle, MD'lerin uygulama açısından potansiyeli detaylı bir şekilde incelenmiştir. KTS uygulamalarında gerekli aktarma oranı ve Hacimsel Tork Yoğunluğu (HTY) gereksinimlerini (5-5,5 ve ~230 Nm/L) karşılayabilecek MD tasarımlarını oluşturmak amacıyla, öncelikle farklı kutup çifti ve segment kombinasyonları analiz edilerek en uygun yapı belirlenmiştir. Ardından, Radyal Dizilim (RD), Halbach Dizilim (HD) ve Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilim (AKHD) olmak üzere üç farklı mıknatıs dizilim tipi dikkate alınmış ve belirlenen geometrik parametreler çerçevesinde gerçekleştirilen 2B ve 3B ESA analizleri sonucunda, en yüksek performans sağlayan dizilim tipi tespit edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, AKHD dizilimine sahip MD'lerin performans hedeflerini en üst seviyede karşıladığını göstermiştir. Ayrıca, uygun tasarım parametreleri ve mıknatıs seviyesi seçimleri ile AKHD MD performansının önemli ölçüde iyileştirilebileceği belirlenmiştir. Bu kapsamda, AKHD MD tasarımlarında Orta Rotor (OR) malzemesi olarak AISI 1018 çeliği ve laminasyonlu elektrik çeliği (M235-35A) kullanılarak iki farklı versiyon oluşturulmuş ve bu tasarımların HTY açısından performansları karşılaştırılmıştır. SEM yaklaşımıyla, ESA analizleri sonucunda elde edilen kuvvetler ve mekanik sınır koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilen yapısal analizler sonucunda, tasarımların mekanik performansları da değerlendirilmiştir. Tasarlanan AKHD MD bileşenlerinin üretimi ve montajı, farklı imalat yöntemleri ve özel olarak geliştirilen yardımcı aparatlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen MD kutup çifti ve segment sayılarından türetilen aktarma oranları, deneysel olarak test düzeneğinde ölçülmüş ve sayısal analiz sonuçları ile uyumlu olduğu doğrulanmıştır. Yapılan deneylerde, AKHD MD versiyonlarının aktarma oranlarının 5,32-5,35 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen MD tasarımlarının performansları gerçek zamanlı yükleme test sistemi ile detaylı şekilde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. İki farklı tasarımın en yüksek çıkış tork değerleri belirlenmiş ve HTY değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Buna göre, HTY değerleri birinci ve ikinci MD versiyonları için sırasıyla 221,66 Nm/L ve 229,46 Nm/L olarak elde edilmiştir. Bu kapsamda, MD'nin giriş kısmına uygulanan farklı hızlardaki pozisyon emirleri ve çıkış kısmına etki eden farklı tork yükleri altında sistemin verimi analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, MD V<sub>1</sub> tasarımı için 20 Nm, MD V<sub>2</sub> tasarımı için ise 15Nm çıkış tork yükünde %90'ın üzerinde verim değerlerine ulaşıldığını göstermiştir. Ayrıca, sonuçlar her iki tasarım için farklı yükleme durumlarında verimin %99,9'a varan değerlere ulaşabildiğini göstermiştir. Geliştirilen MD'ler, tipik bir KTS mekanizmasına entegre edilerek performansları deneysel olarak değerlendirilmiştir. Mekanizma kuvvet analizinden elde edilen yükler ve KTS çalışma prensibine göre belirlenen sınır koşulları, SEM yöntemi ile tasarımlara uygulanmış ve

gerçekleştirilen yapısal analizler sistemin güvenli bir şekilde yükleri taşıyabileceğini ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, farklı OR versiyonlarının kullanıldığı MD'li KTS tasarımlarının performansı gerçek zamanlı yükleme sistemiyle incelenmiş ve KTS için hedeflenen HTY değerine ulaşıldığı deneysel olarak doğrulanmıştır. Hassas pozisyon kodlayıcılar yardımıyla gerçekleştirilen testler sonucunda manyetik tork yay sabitleri hesaplanmış ve elde edilen veriler sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Testler doğrultusunda, MD KTS  $V_1$  için ortalama manyetik tork yay sabiti  $12,7 \text{ Nm}/^\circ$  olarak hesaplanırken,  $V_2$  için bu değer  $13,5 \text{ Nm}/^\circ$  olarak belirlenmiştir. Farklı tork yüklerinde çıkış pozisyonunun doğrusal olmayan bir davranış sergilemesi, bu sistemler için farklı yapıda kontrol algoritmalarının geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu tez kapsamında elde edilen bulgular, MD'lerin bir güç aktarım elemanı olarak KTS ve benzeri uygulamalarda kullanım potansiyelini, avantajlarını ve sınırlamalarını ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, MD'lerin tasarım ve optimizasyon süreçlerinde araştırmacılar için yol gösterici olacaktır.

Bu tez kapsamında geliştirilen AKHD'li MD tasarımının geliştirilmeye açık çeşitli yönleri ve gelecekte üzerinde araştırmalar yapılabilecek çeşitli konular bulunmaktadır. OR segment arası desteklerin sağladığı mekanik bütünlüğün farklı bir üretim yöntemi ile tamamen ortadan kalkması ya da ferromanyetik olmayan bir malzeme kullanılması durumunda MD'nin performansı iyileştirilebilir. Ayrıca, üretim yöntemleri geliştirilip hava boşlukları daha az seviyelere indirilerek MD'nin performansı iyileştirilebilir. Test sisteminin kapasitesi artırılarak daha farklı çalışma hızlarında verim hesaplamaları deneysel olarak ortaya konabilir. Farklı sıcaklıklarda ve uzun süreli çalışma koşullarında testler gerçekleştirilerek verim ve performans gibi bulgular daha detaylı şekilde tartışılabilir. Ayrıca, manyetik tork yay sabiti karakteristiği kullanılarak MD KTS için farklı bir yaklaşım ve matematiksel model oluşturulabilir. Ayrıca, tork yay sabiti fenomenini bastırabilecek kontrolcü çalışmaları ile çıkış kısmında hassas pozisyonlama gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKÇA

- Ackermann, Bernd, and Leo Honds. 1997. Magnetic drive arrangement comprising a plurality of magnetically cooperating parts which are movable relative to one another. United States US5633555A, filed February 21, 1995, and issued May 27, 1997.
- Afsari, Seyed Ahmadreza Afsari. 2021. "Design and Optimization of Coaxial Reluctance Magnetic Gear with Different Rotor Topologies." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 69 (1): 101–9.
- Alosa, Ciro, Fabio Immovilli, and Emilio Lorenzani. 2022. "Design and Optimization of a Magnetic Gear for a Conveyor System Application." In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 434–40. <https://doi.org/10.1109/ICEM51905.2022.9910844>
- Alotto, Piergiorgio, Eric Armando, Elvio Bonisoli, Vincenzo Cirimele, Luca Dimauro, Mattia Filippini, Maurizio Repetto, et al. 2022. "Design, Analysis and Realisation of a Magnetic Gear Prototype with Experimental Validation." In *2022 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/COMPUMAG55718.2022.9827514>
- Anonim. 2024a. "A1101 Standard Specification for Sintered and Fully Dense Neodymium Iron Boron (NdFeB) Permanent Magnets." Accessed June 28, 2024. <https://www.astm.org/a1101-16.html>
- Anonim. 2024b. "Alliance N-45 Neodymium Iron Boron Magnetic Material." Accessed November 12, 2024. [https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=e7eda0f5b11243a6a9ea46f21d667dc1](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e7eda0f5b11243a6a9ea46f21d667dc1)
- Anonim. 2024c. "Aluminum 6061-T6; 6061-T651." Accessed November 11, 2024. <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>
- Anonim. 2024d. "ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell Documentation." Accessed November 11, 2024. <https://ansoft-maxwell.narod.ru/english.html>
- Anonim. 2024e. "Deep Groove Ball Bearings | SKF." Accessed June 29, 2024. <https://www.skf.com/au/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings>
- Anonim. 2024f. "Electrical Steels." Accessed December 11, 2024. pg. 23 [https://ssc.arcelormittal.com/IMG/pdf/electricalsteelsbrochure\\_en.pdf](https://ssc.arcelormittal.com/IMG/pdf/electricalsteelsbrochure_en.pdf)
- Anonim. 2024g. "Y14.5 Dimensioning and Tolerancing - ASME." Accessed June 29, 2024. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing>
- Armstrong, Charles G. 1901. Power-transmitting device. United States US687292A, filed September 6, 1900, and issued November 26, 1901.
- Atallah, K., S.D. Calverley, and D. Howe. 2004. "Design, Analysis and Realisation of a High-Performance Magnetic Gear." *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 151 (2): 135. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20040224>
- Atallah, K., and D. Howe. 2001. "A Novel High-Performance Magnetic Gear." *IEEE Transactions on Magnetics* 37 (4): 2844–46. <https://doi.org/10.1109/20.951324>
- Aytaç, Ayhan, Mehmet Samir Işık, Burak Çanakçı, Tekin Özdemir, Kadir Aztekin, and Hüseyin İpek. 2018. "AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi." *Savunma Bilimleri Dergisi* 17 (2): 139–65. <https://doi.org/10.17134/khosbd.477252>
- Binanajar, Hossein, and Jonathan Bird. 2023. "Electromagnetic Design of a Wave Energy Converter Magnetic Gear with a Torque Density Above 300Nm/L." In *2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 1–5. IEEE.

- Baninajar, Hossein, Sina Modaresahmadi, H. Y. Wong, J. Z. Bird, W. Williams, and B. Dechant. 2022a. "Experimental Evaluation of a 63.3: 1 Dual-Stage Coaxial Magnetic Gear." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 38 (1): 158–69.
- Baninajar, Hossein, Sina Modaresahmadi, Ho Yin Wong, Jonathan Bird, Wesley Williams, and Bertrand Dechant. 2022b. "Designing a Halbach Rotor Magnetic Gear for a Marine Hydrokinetic Generator." *IEEE Transactions on Industry Applications* 58 (5): 6069–80. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3180705>
- Baninajar, Hossein, Sina Modaresahmadi, Ho Yin Wong, Jonathan Z. Bird, Wesley Williams, Bertrand DeChant, and Parker Southwick. 2022c. "A Dual-Stack Coaxial Magnetic Gear for a Wave Energy Conversion Generator." *IEEE Transactions on Magnetics* 58 (10): 1–12.
- Başaran, Sinan. 2020. "Manyetik Dişli Sisteminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi." *European Journal of Science and Technology* 21 (December):37–42. <https://doi.org/10.31590/ejosat.820561>
- Bird, Jonathan, and Wesley Williams. 2015. "A Flux-Focusing Cycloidal Magnetic Gearbox." *IEEE Transactions on Magnetics* 51 (11): 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2440218>
- Bird, Jonathan Z. 2021. "A Review of Electric Aircraft Drivetrain Motor Technology." *IEEE Transactions on Magnetics* 58 (2): 1–8.
- Cansiz, Ahmet, and Emre Akyerden. 2019. "The Use of High Temperature Superconductor Bulk in a Co-Axial Magnetic Gear." *Cryogenics* 98:80–86.
- Daş, Ersin, İsmail İlker Delice, and Murat Keleş. 2020. "Analysis and Robust Position Control of an Electromechanical Control Actuation System." *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 42 (3): 628–40. <https://doi.org/10.1177/0142331218813421>
- Dragan, Radu Stefan, Richard E. Clark, Essam Khalaf Hussain, Kais Atallah, and Milijana Odavic. 2019. "Magnetically Geared Pseudo Direct Drive for Safety Critical Applications." *IEEE Transactions on Industry Applications* 55 (2): 1239–49. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2873511>
- Esnoz-Larraya, Judit, Ignacio Valiente-Blanco, Cristian Cristache, Juan Sanchez-Garcia-Casarrubios, Fernando Rodriguez-Celis, Efrén Diez-Jimenez, and Jose Luis Perez-Diaz. 2017. "Optimagdrive: High-Performance Magnetic Gears Development for Space Applications." *Proceedings of the ESMATS*.
- Filippini, Mattia, Riccardo Torchio, Piergiorgio Alotto, Elvio Bonisoli, Luca Dimauro, and Maurizio Repetto. 2023. "A New Class of Devices: Magnetic Gear Differentials for Vehicle Drivetrains." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 9 (2): 2382–97. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3208628>
- Frankovský, Peter, and Darina Hroncová. 2015. "Kinematic Analysis of the Crank Mechanism with Rotating Cylinder Using MSC Adams/View." *Applied Mechanics and Materials* 816:213–23.
- Gardner, Matthew C., Matthew Johnson, and Hamid A. Toliyat. 2018. "Comparison of Surface Permanent Magnet Coaxial and Cycloidal Radial Flux Magnetic Gears." In *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 5005–12. IEEE.
- Gardner, Matthew C., Matthew Johnson, and Hamid A. Toliyat. 2019. "Performance Impacts of Practical Fabrication Tradeoffs for a Radial Flux Coaxial Magnetic Gear with Halbach Arrays and Air Cores." In *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 3129–36. IEEE.
- Gardner, Matthew C., Bryton Praslicka, Matthew Johnson, and Hamid A. Toliyat. 2021. "Optimization of Coaxial Magnetic Gear Design and Magnet Material Grade at Different Temperatures and Gear Ratios." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 36 (3): 2493–2501.
- Griffiths, David J. 1999. "Introduction to Electrodynamics 3rd Edition, 1999 by Prentice-Hall." Year.
- Halim, MFMA, E. Sulaiman, R. Aziz, RNFKR Othman, and A. A. Rahman. 2022. "Torque Density Design Optimization of Rotating Pole Piece Concentric Magnetic Gear." *Arabian Journal for Science and Engineering* 47 (3): 2797–2806.

- Hastürk, Özgür. 2015. "A Novel Electromechanical Actuator for Missile Jet Vane Thrust Control." In *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 1298–1302. IEEE.
- Hastürk, Özgür. 2016. "Applications of Slider Chain Inversion in Control Actuation Systems." In *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 1579–84. IEEE.
- Hesmondhalgh, D. E., and D. Tipping. 1980. "A Multielement Magnetic Gear." In *IEE Proceedings B-Electric Power Applications*, 3:129–38.
- Huang, Hailin, Ronghai Qu, and Jonathan Bird. 2019. "Performance of Halbach Cycloidal Magnetic Gears with Respect to Torque Density and Gear Ratio." In *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 1977–84. San Diego, CA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785259>
- Kassab, Yasser, Abdelhady Ghanem, and Eid Gouda. 2024. "Analysis of a Coaxial Magnetic Gear Optimally Designed Using Particle Swarm Optimization." *Mansoura Engineering Journal* 49 (4). <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3206>
- Keleş, Murat, and Cengiz Baykasoğlu. 2020. "Experimental and Numerical Investigation on the Effect of the Structural Characteristics of a Fin Actuation System on System Performance." *Gazi Journal of Engineering Sciences* 6 (1). <https://doi.org/10.30855/gmbd.2020.01.04>
- Keleş, Murat, and Cengiz Baykasoğlu. 2022. "Bir Manyetik Dişli Tasarımının Analizi ve Performans En İyileştirmesi." In *ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*. Bursa.
- Kim, Sang Hwa, and Min-Jea Tahk. 2016. "Modeling and Experimental Study on the Dynamic Stiffness of an Electromechanical Actuator." *Journal of Spacecraft and Rockets* 53 (4): 708–19. <https://doi.org/10.2514/1.A33483>
- Kim, Sung Jin, Eui-Jong Park, Sang-Yong Jung, and Yong-Jae Kim. 2017. "Transfer Torque Performance Comparison in Coaxial Magnetic Gears with Different Flux-Modulator Shapes." *IEEE Transactions on Magnetics* 53 (6): 1–4.
- Kucuk, Fuat, and Sadra Mousavi. 2017. "Development of a Novel Coaxial Magnetic Gear." In *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 22–25. IEEE.
- Lee, Jeong-In, Kyung-Hun Shin, Tae-Kyoung Bang, Dong-Wan Ryu, Kyong-Hwan Kim, Keyyong Hong, and Jang-Young Choi. 2020. "Design and Analysis of the Coaxial Magnetic Gear Considering the Electromagnetic Performance and Mechanical Stress." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 30 (4): 1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2968267>
- Li, Kang, and Jonathan Z. Bird. 2018. "A Review of the Volumetric Torque Density of Rotary Magnetic Gear Designs." In *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016–22. Alexandroupoli: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507059>
- Li, Kang, Sina Modaresahmadi, Wesley B. Williams, Jason D. Wright, Debarupa Som, and Jonathan Z. Bird. 2019. "Designing and Experimentally Testing a Magnetic Gearbox for a Wind Turbine Demonstrator." *IEEE Transactions on Industry Applications* 55 (4): 3522–33. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2905838>
- Li, Kang, Sina Modaresahmadi, Wesley Williams, and Jonathan Z. Bird. 2018. "Electromagnetic Analysis of a Wind Turbine Magnetic Gearbox." *The Journal of Engineering*, no. 17 (October), 4101–5. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8006>
- Martin Jr, Thomas B. 1968. "Magnetic Transmission." *US Pat.* 3378710. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570009750849556224>
- Masoudi, Mohammad Amin, and Seyed Ahmadreza Afsari. 2024. "The Optimal Design and an Analysis of a Hybrid W-Shaped IPM Rotor of Coaxial Magnetic Gear." *IEEE Access*. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10547239/>

- Mateev, Valentin, Miglenna Todorova, and Iliana Marinova. 2023. "Design Aspects of Conical Coaxial Magnetic Gears." *Energies* 16 (10): 4191.
- Meessen, K. J., J. H. Paulides, and E. A. Lomonova. 2013. "Force Calculations in 3-D Cylindrical Structures Using Fourier Analysis and the Maxwell Stress Tensor." *IEEE Transactions on Magnetics* 49 (1): 536–45. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2206821>
- Modaresahmadi, Sina, David Barnett, Hossein Baninajar, Jonathan Z. Bird, and Wesley B. Williams. 2021. "Structural Modeling and Validation of Laminated Stacks in Magnetic Gearing Applications." *International Journal of Mechanical Sciences* 192 (February):106133. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106133>
- Modaresahmadi, Sina, Casey Nichols, and Wesley Williams. 2018. "Mechanical Design of Magnetic Gearboxes Optimized for Assembly." In *Volume 6A: Energy*, V06AT08A012. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2018-86878>
- Neves, C. G. C., and A. F. F. Filho. 2017. "Magnetic Gearing Electromagnetic Concepts." *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* 16 (1): 108–19. <https://doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1874>
- Park, Eui-Jong, Sang-Yong Jung, and Yong-Jae Kim. 2019. "Structure and Electromagnetic Characteristics of Pole-Piece Support Materials in Magnetic Gear." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 30 (4): 1–4.
- Park, Eui-Jong, Sang-Yong Jung, and Yong-Jae Kim. 2020. "Comparison of Magnetic Gear Characteristics Using Different Permanent Magnet Materials." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 30 (4): 1–4.
- Penzkofer, Andreas, and Kais Atallah. 2014. "Magnetic Gears for High Torque Applications." *IEEE Transactions on Magnetics* 50 (11): 1–4.
- Praslicka, Bryton, Matthew C. Gardner, Matthew Johnson, and Hamid A. Toliyat. 2021. "Review and Analysis of Coaxial Magnetic Gear Pole Pair Count Selection Effects." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3053544>
- Praslicka, Bryton, Matthew Johnson, Daniel Zamarron, Avery Marshall, Shima Hasanpour, Matthew C. Gardner, Alex Nguyen, Abas Goodarzi, Enzo Bauk, and Hamid A. Toliyat. 2021. "Practical Analysis and Design of a 50:1 Cycloidal Magnetic Gear with Balanced Off-Axis Moments and a High Specific Torque for Lunar Robots." In *2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 1–8. Hartford, CT, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMDC47953.2021.9449504>
- Rasmussen, P.O., T.O. Andersen, F.T. Jorgensen, and O. Nielsen. 2005. "Development of a High-Performance Magnetic Gear." *IEEE Transactions on Industry Applications* 41 (3): 764–70. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.847319>
- Ruiz-Ponce, Gerardo, Marco A. Arjona, Concepcion Hernandez, and Rafael Escarela-Perez. 2023. "A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission." *Energies* 16 (4): 1721.
- Scheidler, Justin J. 2018. "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. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4988>
- Scheidler, Justin J., Zachary A. Cameron, and Thomas F. Tallerico. 2019. "Dynamic Testing of a High-Specific-Torque Concentric Magnetic Gear." In *Annual Forum & Technology Display-The Future of Vertical Flight*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190025467>
- Shelan, Sameh Fathey, Mohammed Abozied Hassan, Hossam Hendy, and Yehia Zakarya Elhalwagy. 2020. "FPGA-Based Controller For Electro-Mechanical Fin Actuation System Using Processor In The Loop (PIL)." In *2020 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)*, 363–70. <https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171710>

- Sheshaprasad, Shrikesh, Matthew Johnson, and Hamid A. Toliyat. 2023. "Design Optimization of Radial Flux-Focusing Coaxial Magnetic Gears and Comparison with Conventional Surface Permanent Magnet and Halbach Topologies." In *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 4580–87. IEEE.
- Shoaei, Aran, Farnam Farshbaf-Roomi, and Qingsong Wang. 2024. "Surrogate-Based Multi-Objective Optimization of Flux-Focusing Halbach Coaxial Magnetic Gear." *Energies* 17 (3): 608.
- Siouris, George M. 2006. *Missile Guidance and Control Systems*. Springer Science & Business Media.
- Som, Debarupa, Kang Li, Joshua Kadel, Jason Wright, Sina Modaresahmadi, Jonathan Z. Bird, and W. William. 2017. "Analysis and Testing of a Coaxial Magnetic Gearbox With Flux Concentration Halbach Rotors." *IEEE Transactions on Magnetics* 53 (11): 1–6. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2715799>
- Tallerico, Thomas, Zachary A. Cameron, and Justin J. Scheidler. 2019a. "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. <https://doi.org/10.2514/6.2019-4477>
- Tallerico, Thomas, Justin Scheidler, and Zachary Cameron. 2019b. "Magnetic Gears and Their Structural Limitations." September 9. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190032274>
- Tallerico, Thomas, Justin J. Scheidler, and Zachary Cameron. 2019c. "Electromagnetic Mass and Efficiency of Magnetic Gears for Electrified Aircraft." In *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*. Indianapolis, IN: American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2019-4475>.
- Tlali, P. M., R-J. Wang, and S. Gerber. 2014. "Magnetic Gear Technologies: A Review." In *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 544–50. Berlin, Germany: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960233>
- Todorova, Miglenna, and Iliana Marinova. 2023. "Operational Torque Characteristics of Innovative Coaxial Magnetic Gear's Constructions." In *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ELMA58392.2023.10202217>
- Todorova, Miglenna, Valentin Mateev, and Iliana Marinova. 2023. "Investigation of Coaxial Magnetic Gears with Variable Gear Ratio." In *2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BULEF)*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/BuleF59783.2023.10406242>
- Tombul, G. Serdar. 2016. "Real Time Control of a Fin Loading System." In *2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 747–52. IEEE.
- Tsurumoto, K., and S. Kikuchi. 1987. "A New Magnetic Gear Using Permanent Magnet." *IEEE Transactions on Magnetics* 23 (5): 3622–24.
- Uppalapati, K K, J Z Bird, J Wright, J Pritchard, M Calvin, and W Williams. 2017. "A Magnetic Gearbox with an Active Region Torque Density of 239Nm/L." *IEEE Transactions on Industry Applications* 54 (2): 1331–38. <https://doi.org/doi:10.1109/TIA.2017.2779418>
- Uppalapati, K., J. Kadel, J. Wright, K. Li, W. Williams, and J. Z. Bird. 2016. "A Low Assembly Cost Coaxial Magnetic Gearbox." In *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, 1–6. Auckland, New Zealand: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPEC.2016.7846207>
- Uppalapati, Krishna K., Walter B. Bomela, Jonathan Z. Bird, Matthew D. Calvin, and Jason D. Wright. 2014. "Experimental Evaluation of Low-Speed Flux-Focusing Magnetic Gearboxes." *IEEE Transactions on Industry Applications* 50 (6): 3637–43.
- Wang, Aiguo, Xiaolong Zhao, Longhui Liu, Jin Cheng, Han Qiao, Hongwei Wang, and Jin Wang. 2023. "Design and Analysis of the Coaxial Magnetic Gears with Halbach PM Arrays for Downhole Electric Drilling Tools." In *2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 3979–83. <https://doi.org/10.1109/ICEMS59686.2023.10344620>

- Wang, JunGang, CaiFu Yu, Bin Zhang, and RuiNa Mo. 2024. "Electromagnetic Performance Analysis of a Novel Hybrid Double-Modulated Magnetic Gear with Transverse Skewed Slotted Magnetic Field Modulation Ring." *Journal of Electrical Engineering & Technology*, June. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-01950-4>
- Wang, Yawei, Mattia Filippini, Nicola Bianchi, and Piergiorgio Alotto. 2019. "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects." *IEEE Transactions on Industry Applications* 55 (5): 4557–66. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2916765>
- Wingett, Paul T., Casey Hanlon, and Calvin C. Potter. 2009. Flight control surface actuator assembly including a free trial mechanism. United States US7610828B2, filed January 13, 2006, and issued November 3, 2009.
- Wong, H. Y., Jonathan Z. Bird, S. Essakiappan, A. Verma, and M. Manjrekar. 2022a. "Electromagnetic Analysis of a High Gear-Ratio Magnetically Geared Motor." In *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1–6. IEEE.
- Wong, Ho Yin, Hossein Baninajar, Bert Dechant, Parker Southwick, and Jonathan Z. Bird. 2023. "Design and Experimental Testing of a Magnetic Gear for an Electric Aircraft Drivetrain." *IEEE Transactions on Industry Applications* 59 (4): 3934–44. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3260060>
- Wong, Ho Yin, Hossein Baninajar, Bertrand Dechant, and Jonathan Bird. 2020. "Designing a Magnetic Gear for an Electric Aircraft Drivetrain." In *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1–6. Detroit, MI, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9235977>
- Wong, Ho Yin, Hossein Baninajar, Bertrand W. Dechant, Parker Southwick, and Jonathan Z. Bird. 2022b. "Experimentally Testing a Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear with 279 Nm/L Torque Density." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 38 (1): 507–18.
- Wong, Ho Yin, Jonathan Z. Bird, David Barnett, and Wesley Williams. 2019. "A High Torque Density Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear." In *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 233–39. San Diego, CA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785188>
- Yerlikaya, Ümit, and Raif Tuna Balkan. 2017. "Dynamic Modeling and Control of an Electromechanical Control Actuation System." In *ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference*. Tysons, Virginia, USA. <https://doi.org/10.1115/DSCC2017-5056>
- Yoo, Chung-Hee. 2017. "Active Control of Aeroelastic Vibrations for Electromechanical Missile Fin Actuation Systems." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40 (12): 3299–3306. <https://doi.org/10.2514/1.G002821>
- Zhu, Weidong, Steve Pekarek, Babak Fahimi, and Bradley J. Deken. 2007. "Investigation of Force Generation in a Permanent Magnet Synchronous Machine." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 22 (3): 557–65. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.888034>

## EKLER



## EK-1. Mıknatıs Kalite Kontrol Raporu ve B-H eğrisi

**VECTOR**

Hangzhou Vector Magnets Co., Ltd  
6-1A, 88 Jiangling Rd, Linjiang, Hangzhou, Zhejiang, China, 310051  
Tel: +86-571-5666-8956 Fax: +86-571-5666-8957 [www.vectormagnets.com](http://www.vectormagnets.com)

NO. PTR/V240108-005  
DATE 2024/1/8  
INV NO. VIRT01240108

TYPE Sintered\_NdFeB\_Magnet  
GRADE N45SH  
DIMENSION D88xD78x5.1X50X6.92"

**TEST REPORT**

Shape: Arc  
Surface: NiCuNi

Customer Information		Vector Magnets Information	
Purchase Order Number	Part Number	Production Order Number	Drawing Number
2023502401	136263_G01/136257_G01	VPIN0923102706	
Drawing Number	Ordered Quantity	Part Number	Manufactured Quantity
	26+26	VIRT01NSI088078051A&B	26+26

Inspection Items	Dimensions								Magnetic Properties						Appearance
	Outer Radius	88	Inner Radius	78	Length	50	Width	5.1	Flux density(mT)	Magnetic flux	Deviation Angle				
Tolerance	-0.050	0.050	-0.050	0.050	-0.100	0.100	-0.050	0.050							
Range	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
Measure Instrument	Image Measurement		Image Measurement		Micrometer		Micrometer		Fluxmeter, k=0.08428						
TEST DATA	1	88.030		78.031		50.060		5.089						18.33	OK
	2	88.023		78.026		50.058		5.098						18.35	OK
	3	88.030		78.011		50.052		5.081						18.29	OK
	4	88.011		78.020		50.068		5.088						18.38	OK
	5	88.012		78.030		50.058		5.098						18.37	OK
	6	88.016		78.037		50.062		5.083						18.33	OK
	7	88.019		78.018		50.051		5.098						18.31	OK
	8	88.025		78.020		50.066		5.091						18.33	OK
	9	88.028		78.031		50.051		5.093						18.40	OK
	10	88.027		78.033		50.066		5.091						18.37	OK
	11	88.027		78.025		50.065		5.084						18.26	OK
	12	88.013		78.017		50.054		5.081						18.28	OK
	13	88.013		78.024		50.053		5.097						18.39	OK
	14	88.017		78.039		50.064		5.089						18.27	OK
	15	88.026		78.016		50.052		5.095						18.36	OK
	16	88.019		78.023		50.068		5.098						18.36	OK
	17	88.018		78.013		50.068		5.082						18.29	OK
	18	88.019		78.022		50.068		5.095						18.26	OK
	19	88.025		78.018		50.063		5.097						18.30	OK
	20	88.020		78.033		50.058		5.090						18.31	OK
Max	88.030		78.039		50.068		5.098						18.40		
Min	88.011		78.011		50.051		5.081						18.26		
A/V	88.021		78.024		50.060		5.091						18.33		
Hysteresis	Required	Residual Induction Br (kGs)		Coercive Force Hc (kOe)		Intrinsic Coercive Force Hcj (kOe)		Maximum Energy Product (BH)max (MGOe)		Actual	Residual Induction Br (kGs)	Coercive Force Hc (kOe)	Intrinsic Coercive Force Hcj (kOe)	Maximum Energy Product (BH)max (MGOe)	
		min	max	min	max	min	max	min	max						
		13.3	13.6	11.4	-	20	-	43	45		13.52	13.06	20.24	44.03	

Conclusion ✓ The products has been well inspected and are compliant with all customer drawing specs.

Inspector Signature

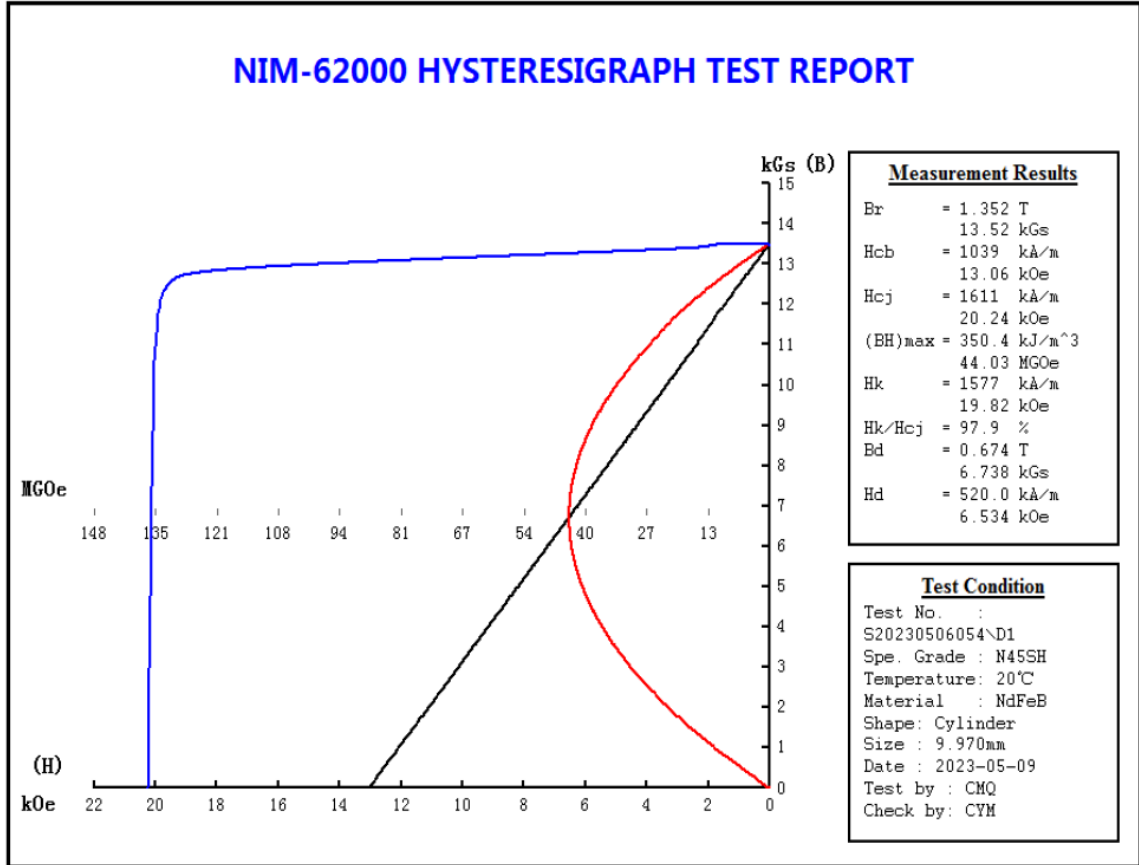
VM NS09

Date 2024/1/8

Inspector Signature


ET

Date 2024/1/8



Şekil Ek-1.1. Mıknatıs kalite kontrol raporu ve B-H eğrisi

## EK-2. Elektrik Çeliği Sertifikası

 ArcelorMittal ArcelorMittal Saint Chely D'Apcher France		<b>Inspection Certificate</b> According to EN 10204 3.1				<b>Electrical Steel</b>				Package number : 63000 Coils : F02920A 03 Coating : M24 Side : 2						
ArcelorMittal Méditerranée Avenue des Martyrs du Maquis 48200 Saint Chely D'Apcher		<b>Customer and / or consignee :</b>				<b>Customer order references :</b> ArcelorMittal order reference: 53179-1				<b>Steel grade and specifications:</b> M235-35A						
Product identification		Item N°	Pieces N°	Size (mm)		Net Weight (Kg)	Chemical composition (ppm)				Losses50Hz (W/Kg)		Polarization (T)			Bend
Coil N°	Heat N°			Thickness	Width		C	Mn	Si	S	1 $\tau$	1,5 $\tau$	J 2500	J 5000	J 10000	
F02920A 03	118347	1	1	0,350	845,0	3370	34	2146	32479	12	0,87	2,11	1,541	1,640	1,769	31

Metallurgy - Quality  
03/06/2022

Şekil Ek-2.1. Elektrik çeliği malzeme sertifikası

### EK-3. Torkmetre

Torkmetre, bağlandığı sistemde oluşan tork kuvvetini ölçmeye yarayan yüksek hassasiyetli bir ölçüm cihazıdır. Çalışma prensibi, sistemdeki tork yükünden dolayı oluşan açısız yer değişimlerinin torkmetrede bulunan gerinim ölçerler ile hesaplanmasıdır. Hassas gerinim ölçerlerin oluşturduğu elektriksel farktan doğan voltaj, sinyal şartlandırıcıya girer. Sinyal şartlandırıcı elektriksel gürültüsü azaltılmış  $\pm 10$  V analog çıkışı veri toplama kartına gönderir. xPc Target vasıtasıyla MATLAB®-Simulink yazılımı, verileri hazır bloklar sayesinde okur. Kullanılan torkmetre 225 Nm tork yüküne kadar ölçebilme özelliğine sahiptir.



Şekil Ek-3.1. Torkmetre

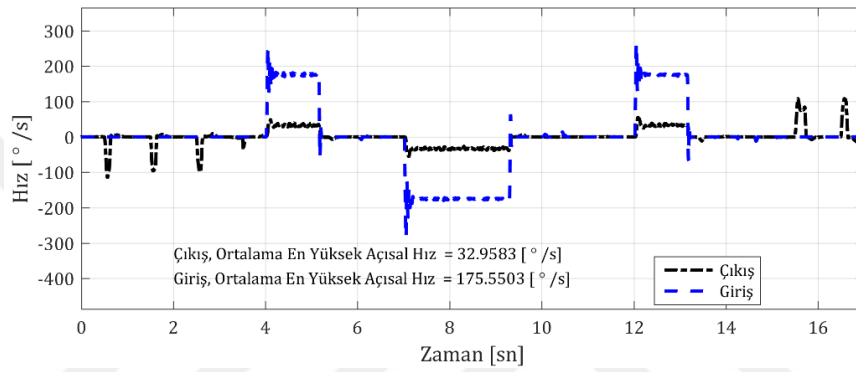
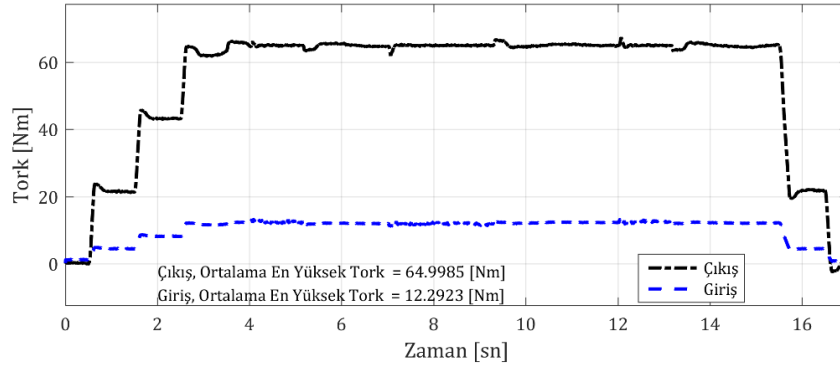
#### **EK-4. Kodlayıcı**

Kodlayıcı, bağı olduğu milin açısai yer değiştirmesini dijital sinyallere dđnüştürerek açısai konumun ölçülmesini sağlar. Kodlayıcı, doğası gereği genelde dijital çıktı verir, böylece modern kontrol sistemlerine kolayca bağlanabilir. Elektriksel gürültüyü indirgemedede başarılıdır. Kesin konum, yumuşak tork ve kararlı hız kontrolü gerektiren uygulamalarda, genelde kodlayıcı tabanlı sistemler tercih edilir. Şekil Ek-4'de kullanılan kodlayıcı 65.536 ppr'lik yani 0,0054° yüksek çözünürlüklüğe sahip olup 5V güç ile dijital kanallardan okunabilmektedir.

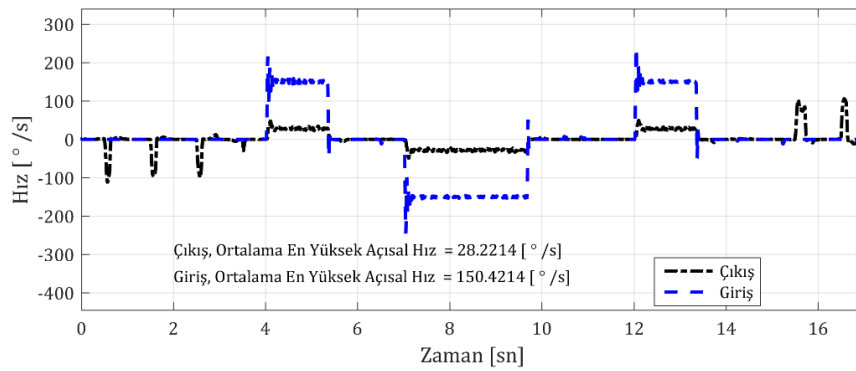
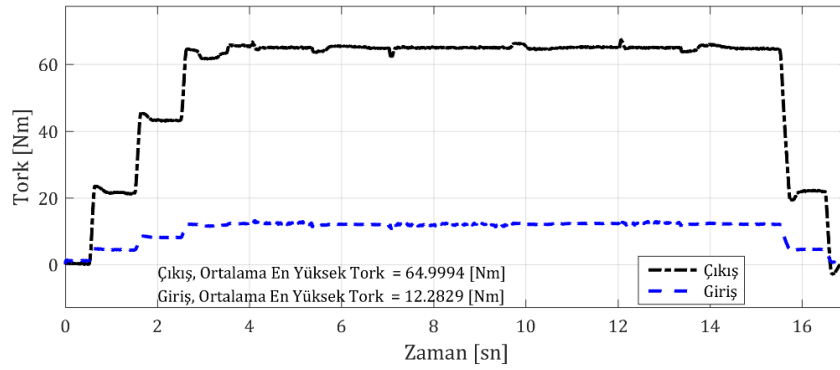


**Şekil Ek-4.1. Kodlayıcı**

## EK-5. Farklı açısız hızlarda MD performansları

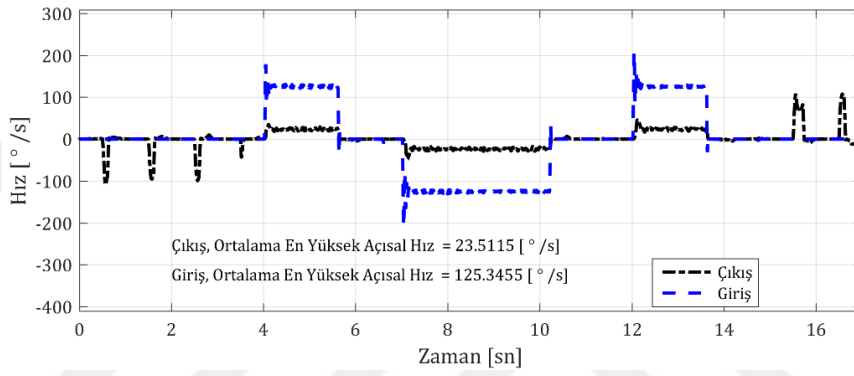
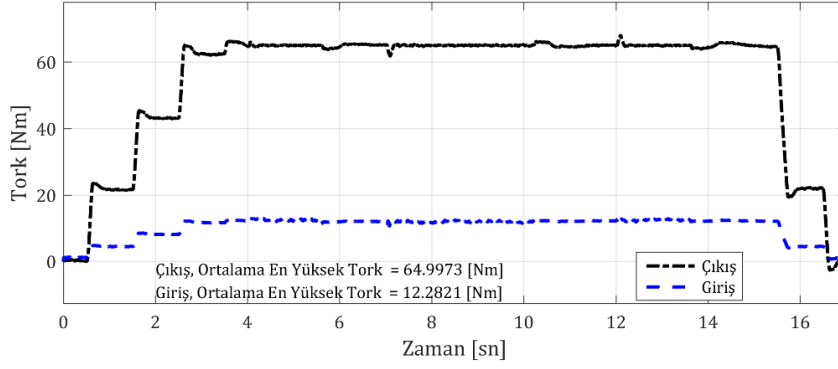


Şekil Ek-5.1. 65 Nm tork yükü altında 175°/sn açısız hızda MD V<sub>1</sub> performans testi

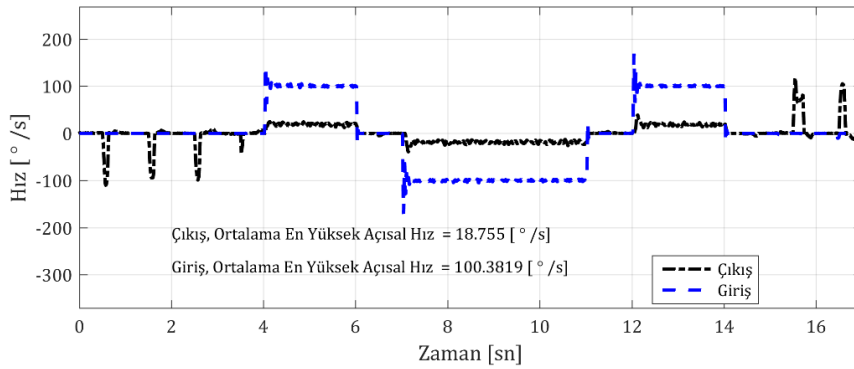
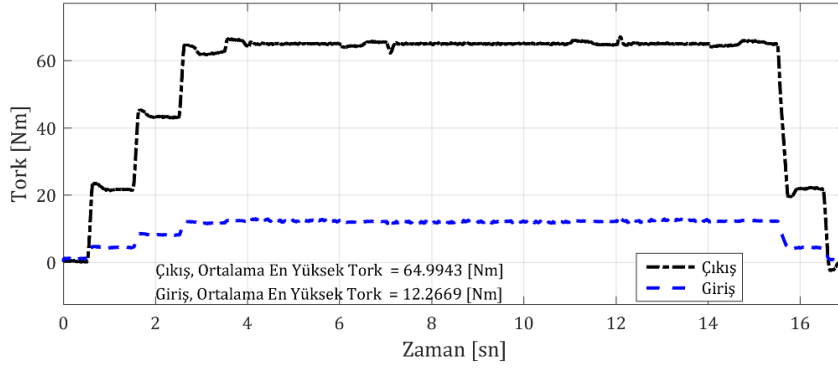


Şekil Ek-5.2. 65 Nm tork yükü altında 150°/sn açısız hızda MD V<sub>1</sub> performans testi

### EK-5. Farklı açısız hızlarda MD performansları (Devam)

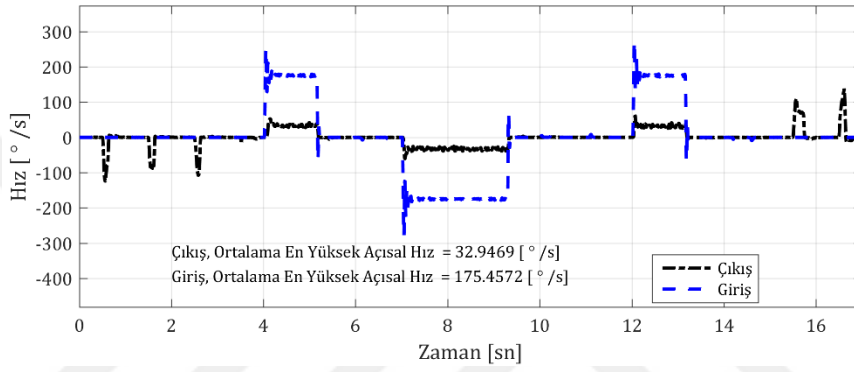
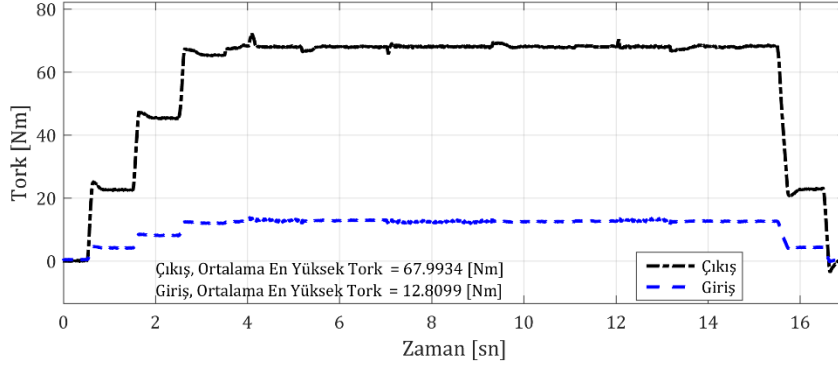


Şekil Ek-5.3. 65 Nm tork yükü altında 125°/sn açısız hızda MD V<sub>1</sub> performans testi

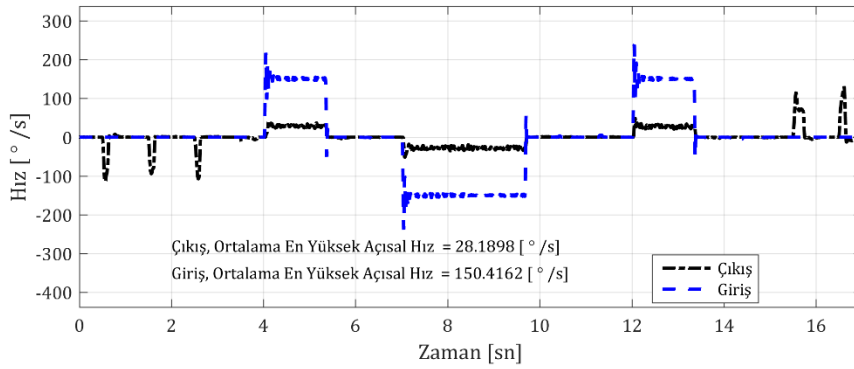
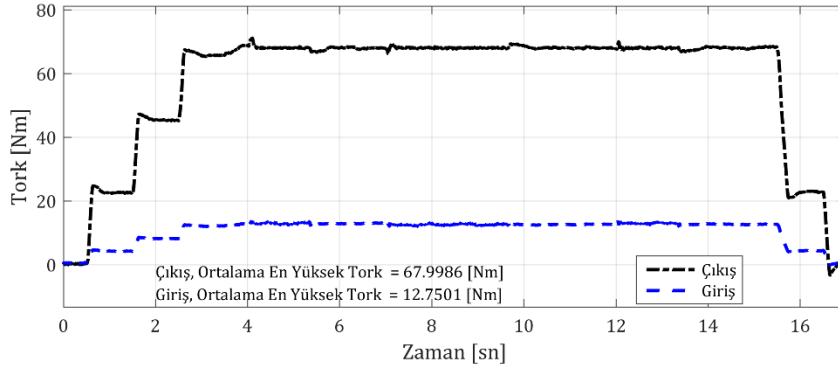


Şekil Ek-5.4. 65 Nm tork yükü altında 100°/sn açısız hızda MD V<sub>1</sub> performans testi

### EK-5. Farklı açısız hızlarda MD performansları (Devam)

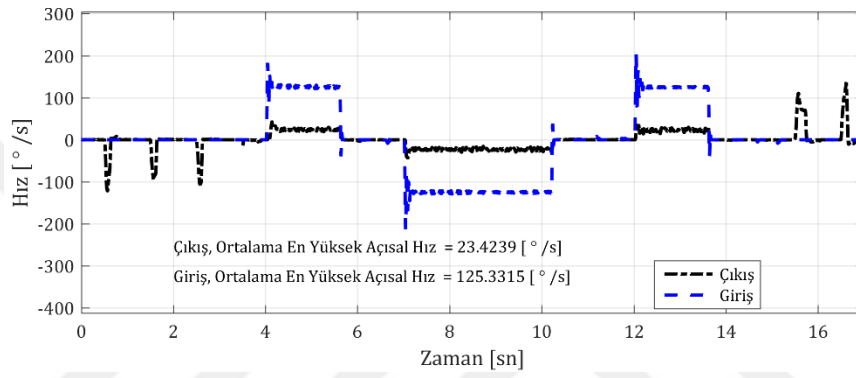
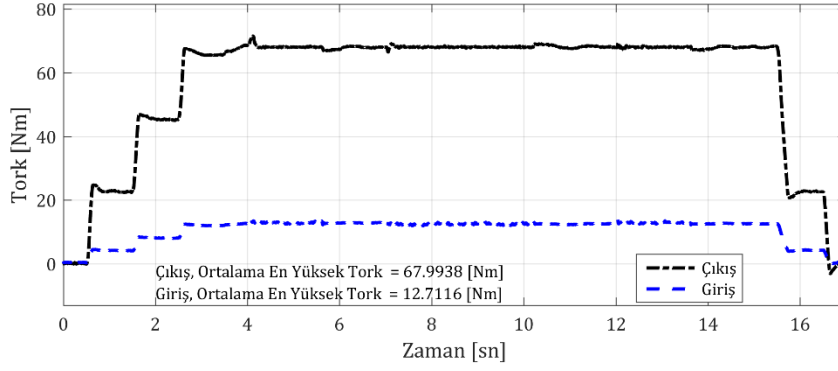


Şekil Ek-5.5. 68 Nm tork yükü altında 175°/sn açısız hızda MD V<sub>2</sub> performans testi

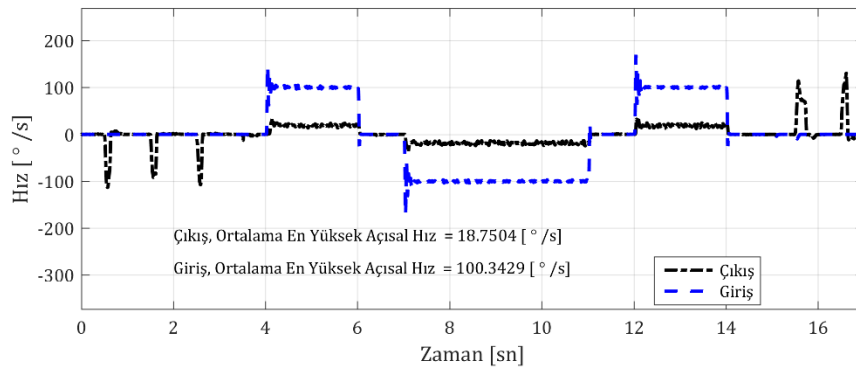
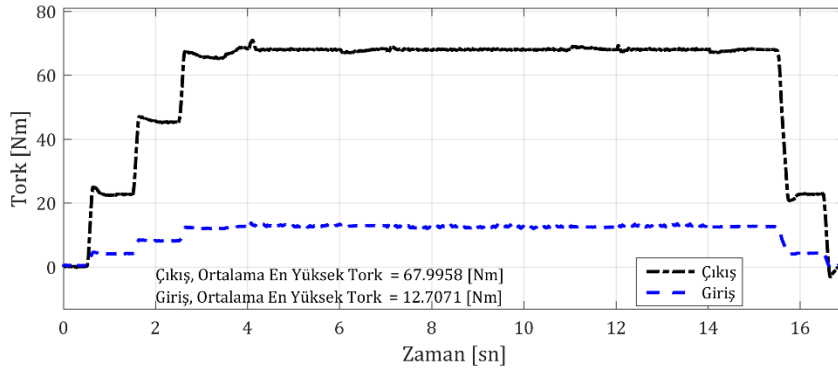


Şekil Ek-5.6. 68 Nm tork yükü altında 150°/sn açısız hızda MD V<sub>2</sub> performans testi

### EK-5. Farklı açısız hızlarda MD performansları (Devam)



Şekil Ek-5.7. 68 Nm tork yükü altında 125°/sn açısız hızda MD V<sub>2</sub> performans testi



Şekil Ek-5.8. 68 Nm tork yükü altında 100°/sn açısız hızda MD V<sub>2</sub> performans testi

**EK-6. Farklı açısal hızlarda MD performans verileri**

**Tablo Ek-6.1. MD  $V_1$  sabit  $200^\circ/\text{sn}$  açısal hız - farklı tork yükü**

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	200	37,60	200,44	9,99	2,36	79,51	5,33
15	200	37,62	200,56	14,99	3,23	86,95	5,33
20	200	37,58	200,45	19,99	4,16	90,01	5,33
25	200	37,64	200,59	24,99	5,07	92,57	5,33
30	200	37,59	200,33	29,99	5,97	94,19	5,33
35	200	37,57	200,45	34,98	6,88	95,31	5,34
40	200	37,61	200,47	39,99	7,78	96,48	5,33
45	200	37,63	200,55	44,99	8,67	97,34	5,33
50	200	37,57	200,59	49,99	9,58	97,70	5,34
55	200	37,62	200,63	54,99	10,49	98,34	5,33
60	200	37,63	200,54	60,00	11,42	98,54	5,33
65	200	37,54	200,51	64,99	12,31	98,80	5,34

**Tablo Ek-6.2. MD  $V_1$  sabit  $175^\circ/\text{sn}$  açısal hız - farklı tork yükü**

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	175	32,92	175,44	9,99	2,34	80,05	5,33
15	175	32,97	175,54	14,99	3,24	87,03	5,32
20	175	32,92	175,39	19,99	4,16	90,27	5,33
25	175	32,93	175,47	24,99	5,06	92,75	5,33
30	175	32,89	175,42	29,99	5,97	94,26	5,33
35	175	32,94	175,43	34,99	6,87	95,64	5,33
40	175	32,93	175,42	39,99	7,77	96,60	5,33
45	175	32,92	175,55	44,99	8,66	97,38	5,33
50	175	32,93	175,50	50,00	9,58	97,96	5,33
55	175	32,92	175,54	54,99	10,48	98,41	5,33
60	175	32,94	175,48	59,99	11,39	98,89	5,33
65	175	32,96	175,55	65,00	12,29	99,27	5,33

**Tablo Ek-6.3. MD  $V_1$  sabit  $150^\circ/\text{sn}$  açısal hız - farklı tork yükü**

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	150	28,26	150,36	9,99	2,34	80,19	5,32
15	150	28,20	150,44	15,00	3,22	87,18	5,33
20	150	28,23	150,37	19,99	4,15	90,33	5,33
25	150	28,20	150,39	24,99	5,04	92,91	5,33
30	150	28,23	150,38	30,00	5,96	94,42	5,33
35	150	28,22	150,39	34,99	6,86	95,73	5,33
40	150	28,21	150,39	39,99	7,77	96,59	5,33
45	150	28,22	150,51	44,99	8,65	97,50	5,33
50	150	28,20	150,39	49,99	9,57	97,95	5,33
55	150	28,22	150,51	54,99	10,47	98,46	5,33
60	150	28,22	150,48	59,99	11,38	98,84	5,33
65	150	28,22	150,42	65,00	12,28	99,28	5,33

EK-6. Farklı açısız hızlarda MD performans verileri (Devam)

**Tablo Ek-6.4.** MD  $V_1$  sabit  $125^\circ/\text{sn}$  açısız hız - farklı tork yükü

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	125	23,47	125,29	9,99	2,33	80,16	5,34
15	125	23,56	125,34	14,99	3,22	87,51	5,32
20	125	23,48	125,28	19,99	4,14	90,35	5,33
25	125	23,51	125,32	25,00	5,05	92,89	5,33
30	125	23,50	125,32	29,99	5,95	94,46	5,33
35	125	23,5	125,32	34,99	6,85	95,69	5,33
40	125	23,48	125,30	39,99	7,76	96,56	5,33
45	125	23,51	125,44	44,99	8,65	97,42	5,34
50	125	23,51	125,37	49,99	9,56	98,02	5,33
55	125	23,49	125,44	54,99	10,47	98,32	5,34
60	125	23,53	125,36	59,99	11,38	98,94	5,33
65	125	23,51	125,35	64,99	12,28	99,26	5,33

**Tablo Ek-6.5.** MD  $V_1$  sabit  $100^\circ/\text{sn}$  açısız hız - farklı tork yükü

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	100	18,83	100,33	10,00	2,33	80,54	5,32
15	100	18,77	100,35	15,00	3,2	87,47	5,34
20	100	18,83	100,33	20,00	4,14	90,60	5,33
25	100	18,77	100,33	25,00	5,03	92,98	5,34
30	100	18,78	100,35	30,00	5,94	94,42	5,34
35	100	18,78	100,34	34,99	6,84	95,66	5,34
40	100	18,81	100,36	40,00	7,74	96,81	5,33
45	100	18,82	100,40	44,99	8,63	97,70	5,33
50	100	18,79	100,37	49,99	9,55	97,98	5,34
55	100	18,83	100,41	54,99	10,45	98,67	5,33
60	100	18,78	100,36	59,99	11,36	98,80	5,34
65	100	18,75	100,38	64,99	12,26	98,99	5,35

**Tablo Ek-6.6.** MD  $V_2$  sabit  $200^\circ/\text{sn}$  açısız hız - farklı tork yükü

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	200	37,50	200,65	9,99	2,21	84,67	5,35
15	200	37,55	200,57	14,99	3,12	89,86	5,34
20	200	37,54	200,40	19,99	4,03	92,88	5,34
25	200	37,59	200,54	24,99	4,96	94,44	5,34
30	200	37,60	200,56	29,99	5,87	95,75	5,33
35	200	37,60	200,59	34,99	6,79	96,64	5,33
40	200	37,55	200,35	39,99	7,68	97,61	5,34
45	200	37,58	200,62	44,99	8,59	98,14	5,34
50	200	37,58	200,50	49,99	9,49	98,71	5,34
55	200	37,60	200,47	54,99	10,41	99,12	5,33
60	200	37,67	200,43	59,99	11,30	99,80	5,32
65	200	37,61	200,45	65,00	12,22	99,80	5,33
68	200	37,64	200,52	68,00	12,76	99,91	5,33

**EK-6. Farklı açısal hızlarda MD performans verileri (Devam)**

**Tablo Ek-6.7. MD  $V_2$  sabit  $175^\circ/\text{sn}$  açısal hız - farklı tork yükü**

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	175	32,86	175,55	9,99	2,20	85,09	5,34
15	175	32,87	175,56	14,99	3,12	89,97	5,34
20	175	32,86	175,43	19,99	4,03	92,84	5,34
25	175	32,83	175,52	24,99	4,95	94,45	5,35
30	175	32,84	175,49	29,98	5,86	95,75	5,34
35	175	32,92	175,59	34,99	6,76	96,98	5,33
40	175	32,83	175,42	39,99	7,67	97,55	5,34
45	175	32,92	175,49	44,99	8,58	98,32	5,33
50	175	32,85	175,40	49,99	9,48	98,72	5,34
55	175	32,92	175,47	54,99	10,39	99,26	5,33
60	175	32,88	175,41	59,99	11,29	99,60	5,33
65	175	32,92	175,43	64,99	12,21	99,83	5,33
68	175	32,95	175,46	67,99	12,81	99,94	5,33

**Tablo Ek-6.8. MD  $V_2$  sabit  $150^\circ/\text{sn}$  açısal hız - farklı tork yükü**

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	150	28,16	150,46	10,00	2,20	85,21	5,34
15	150	28,15	150,41	14,99	3,12	89,99	5,34
20	150	28,16	150,41	19,99	4,03	92,83	5,34
25	150	28,17	150,41	24,99	4,95	94,55	5,34
30	150	28,19	150,45	30,00	5,86	95,89	5,34
35	150	28,13	150,41	35,00	6,77	96,71	5,35
40	150	28,21	150,43	40,00	7,67	97,73	5,33
45	150	28,19	150,34	44,99	8,57	98,39	5,33
50	150	28,19	150,32	49,99	9,48	98,87	5,33
55	150	28,21	150,36	55,00	10,39	99,30	5,33
60	150	28,17	150,33	60,00	11,30	99,51	5,34
65	150	28,18	150,41	64,99	12,20	99,77	5,34
68	150	28,19	150,42	68,00	12,75	99,95	5,34

**Tablo Ek-6.9. MD  $V_2$  sabit  $125^\circ/\text{sn}$  açısal hız - farklı tork yükü**

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	125	23,51	125,37	10,00	2,19	85,52	5,33
15	125	23,46	125,40	14,99	3,11	90,11	5,35
20	125	23,47	125,29	19,99	4,03	92,96	5,34
25	125	23,47	125,35	25,00	4,95	94,57	5,34
30	125	23,47	125,36	29,99	5,86	95,85	5,34
35	125	23,49	125,38	34,99	6,77	96,88	5,34
40	125	23,48	125,35	40,00	7,67	97,66	5,34
45	125	23,46	125,34	45,00	8,57	98,28	5,34
50	125	23,47	125,34	50,00	9,48	98,78	5,34
55	125	23,50	125,32	55,00	10,39	99,32	5,33
60	125	23,47	125,30	60,00	11,29	99,52	5,34
65	125	23,49	125,33	64,99	12,20	99,86	5,34
68	125	23,42	125,33	67,99	12,71	99,97	5,35

**EK-6. Farklı açısal hızlarda MD performans verileri (Devam)**

**Tablo Ek-6.10. MD  $V_2$  sabit  $100^\circ/\text{sn}$  açısal hız - farklı tork yükü**

Tork	Hız	Ortalama hız ( $^\circ/\text{sn}$ )		Ortalama Tork (Nm)		Verim %	Aktarma Oranı
		Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş		
10	100	18,77	100,39	9,99	2,2	84,79	5,35
15	100	18,82	100,35	15,00	3,12	90,19	5,33
20	100	18,78	100,39	20,00	4,02	92,98	5,34
25	100	18,79	100,37	24,99	4,94	94,60	5,34
30	100	18,79	100,35	29,99	5,86	95,88	5,34
35	100	18,79	100,36	35,00	6,76	96,82	5,34
40	100	18,80	100,34	39,99	7,66	97,72	5,33
45	100	18,79	100,34	44,99	8,57	98,26	5,34
50	100	18,80	100,34	50,00	9,45	98,84	5,34
55	100	18,81	100,34	54,99	10,38	99,30	5,33
60	100	18,79	100,30	60,00	11,29	99,56	5,34
65	100	18,80	100,30	64,99	12,20	99,87	5,34
68	100	18,79	100,32	68,00	12,71	99,99	5,34

