

**T.C.  
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOBİNLİ FIRLATICILAR İÇİN VOLANLI EKSENEL AKILI  
SABİT MIKNATISLI MOTOR ALTERNATÖR SİSTEMİ  
TASARIMI VE 3D MANYETİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mürşide SEVER**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Engin HÜNER**

**HAZİRAN 2019**

**T.C.  
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOBİNLİ FIRLATICILAR İÇİN VOLANLI EKSENEL AKILI  
SABİT MIKNATISLI MOTOR ALTERNATÖR SİSTEMİ  
TASARIMI VE 3D MANYETİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mürşide SEVER  
(1158204110)**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Engin HÜNER**

**HAZİRAN 2019**

Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1158204110 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Mürşide SEVER**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BOBİNLİ FIRLATICILAR İÇİN VOLANLI EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI MOTOR ALTERNATÖR SİSTEMİ TASARIMI VE 3D MANYETİK ANALİZİ** “ başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Dr.Öğr.Üyesi Engin HÜNER** .....  
Kırklareli Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr.Öğr.Üyesi Aydın MÜHÜRÇÜ** .....  
Kırklareli Üniversitesi

**Dr. Öğr.Üyesi Süreyya KOCABEY** .....  
Sağlık Bilimleri Üniversitesi

**Teslim Tarihi :** **10 Haziran 2019**  
**Savunma Tarihi :** **27 Haziran 2019**

*Eşime ve çocuklarıma,*



## ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması boyunca her zaman yanımda olan,emeğini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, katkılarını her daim şükran ile hatırlayacağım kıymetli hocam Sayın Dr.Öğretim Üyesi Engin HÜNER' e teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca her zaman yanımda olan sevgili eşime ve kızlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma Tübitak 3501 Kariyer Projesi kapsamında 115E964 proje numarası ile desteklenmiştir.

Haziran 2019

Mürşide SEVER  
(Öğretmen)

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
KISALTMALAR .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xii
SUMMARY .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
<b>2. EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI MAKİNELER (EASM).....</b>	<b>9</b>
2.1 Eksenel Akılı Makinelerin Yapısı ve Sınıflandırılması .....	9
2.1.1 Tek taraflı EASM.....	10
2.1.2 Çift taraflı EASM.....	11
2.1.2.1 Tek rotor-çift statorlu oluksuz yapıllı çift taraflı EASM.....	12
2.1.2.2 Nüveli ve statoru içte olan makineler.....	13
2.1.2.3 Oluklu ve statoru içte olan makineler .....	14
2.1.2.4 Nüvesiz ve statoru içte olan makineler .....	14
2.1.3 Çok rotor-çok statorlu EASM .....	15
2.2 EASM Makinelerin Stator ve Rotor Yapıları.....	16
2.3 Easm Makinelerde Vuruntu Momenti.....	17
2.3.1 Statora uygulanan vuruntu momentini azaltıcı teknikler .....	17
2.3.2 Rotora uygulanan vuruntu momentini azaltıcı teknikler.....	18
2.3.2.1 Mıknatıs adımlarının mıknatıs kutuplarına oranı .....	18
2.3.2.2 Klasik kaykы metodu .....	18
2.3.2.3 Diğer kaykы teknikleri .....	19
2.3.2.4 Kutup veya mıknatıs kaydırma .....	19
2.3.2.5 Rotoru dairesel olarak kaydırma .....	19
2.4 Eksenel Akılı Makinelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	20
<b>3. BOBİNLİ FIRLATICILAR .....</b>	<b>21</b>
3.1 Bobinli Fırlatıcılarda Elektromanyetik Fırlatma .....	22
3.2 Bobinli Fırlatıcı Tasarımına Etki Eden Faktörler.....	23
3.2.1 Ferromanyetik gövde .....	23
3.2.2 Manyetik alan çizgileri.....	24
3.2.3 Rondelalar .....	25
3.2.4 Bobinli manyetik fırlatıcıda sürücü devreye direnç eklenmesi.....	25
3.2.5 Kapasitör etkisi .....	26
3.2.6 İndüktans etkisi .....	27
<b>4. VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ .....</b>	<b>29</b>
4.1 Volan .....	29
4.2 Volanın Enerji Denkleminin Çıkartılması.....	33
<b>5. TASARIMIN MANYETİK ANALİZİ.....</b>	<b>37</b>

5.1 2P=2 Kutuplu EASM Motorun Manyetik Analizi .....	37
5.1.1 Ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi .....	38
5.1.2 Ayak genişliğinin etkisi.....	39
5.1.3 Ayak genişliğinin vuru momentine etkisi .....	43
5.1.4 Ayak yüksekliği “Ah” ve ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi .....	45
5.1.5 Ayak genişliği “Ag”, mıknatıs yay açısı “Md” ve mıknatıs yüksekliği “Mh” değişiminin etkisi.....	46
5.1.6 Mıknatısların yüzeyde kalan yüksekliklerinin analizi.....	47
5.1.7 2P=2 kutuplu EASM motorun değerlendirilmesi .....	48
5.2 2P=12 Kutuplu EASM Motor-Alternatör Manyetik Analizi .....	49
5.2.1 Ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi .....	50
5.2.2 Ayak yüksekliği “Ah” ve ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi .....	54
5.2.3 Mıknatıs açısı Md’nin değişimi.....	57
5.2.4 Rotor açısal dönüş derecesi (AlfaR) vuru momentine etkisi .....	63
5.2.5 2P=12 kutuplu EASM motorun değerlendirilmesi .....	64
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>65</b>
6.1 Çalışmanın Uygulama Alanı .....	69
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>71</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>75</b>

## **KISALTMALAR**

<b>VEASM</b>	: Volanlı Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
<b>VEDS</b>	: Volanlı Enerji Depolama Sistemi
<b>EASM</b>	: Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
<b>RASM</b>	: Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı
<b>BMF</b>	: Bobinli Manyetik Fırlatıcı
<b>SEY</b>	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>KW</b>	: KiloWatt
<b>MW</b>	: MegaWatt
<b>d/dk</b>	: devir/dakika



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Rotor tarafına uygulanan teknikler .....	19
Çizelge 4.1 : Farklı malzemeler için katsayılar .....	31
Çizelge 4.2 : Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması .....	32
Çizelge 4.3 : NiH <sub>2</sub> batarya ile volanlı enerji depolama sisteminin karşılaştırılması..	33
Çizelge 5.1 : Maxwell programında değişken parametreler .....	37
Çizelge 5.2 : Oluk ayak genişliğinin ortalama manyetik akıya etkisi .....	39
Çizelge 5.3 : Ayak genişliği ile çevre uzunluğu oranı .....	39
Çizelge 5.4 : Ayak genişliğinin hava aralığındaki yüzey boyunca ortalama manyetik akı yoğunluğu değerleri .....	43
Çizelge 5.5 : Ah ve Ag değişiminin ortalama manyetik akıya etkisi .....	45
Çizelge 5.6 : Ag=2,5mm bağlı olarak Md ve Mh değişimi .....	47
Çizelge 5.7 : Ag=3mm bağlı olarak Md ve Mh değişimi .....	47
Çizelge 5.8 : Ag=2,5mm, Ah=12mm, Md=5 <sup>0</sup> ,Mh=7mm iken mıknatıs yüzey çıkıntısının analizi .....	48
Çizelge 5.9 : 2P=12 kutup için maxwell değişken parametreler .....	50
Çizelge 5.10 : Oluk ayak genişliğinin ortalama manyetik akıya etkisi .....	53
Çizelge 5.11 : Ayak genişliği ile çevre uzunluğu oranı .....	54
Çizelge 5.12 : Ah ve Ag değişiminin ortalama manyetik akıya etkisi .....	56
Çizelge 5.13 : Ah ve Ag değişiminin hava aralığında ortalama manyetik akıya etkisi .....	57

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : (a) Oluksuz tip stator (b) Oluklu tip stator. ....	11
Şekil 2.2 : (a) Oluklu tek stator iki rotorlu, (b) Oluklu tek rotor iki statorlu..... EASM makine. ....	12
Şekil 2.3 : Nüveli oluksuz aksenal akılı sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator..... makine yapısı.....	13
Şekil 2.4 : Oluklu aksenal akılı sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator makine yapısı. .....	14
Şekil 2.5 : Nüvesiz aksenal akılı sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator makine yapısı. .....	15
Şekil 2.6 : Nüvesiz aksenal akılı sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator makine yapısı. .....	16
Şekil 2.7 : EASM makinelerde kullanılan neodyum mıknatıslar. ....	16
Şekil 2.8 : Stator tarafına uygulanan vuruuntu momentini giderici teknikler ..... a) Değişken oluk açıklıkları b) Kaydırılmış oluklar c) Kaykılı verilmiş oluklar d) Yardımcı oluklar tarafına uygulanan vuruuntu momentini giderici teknikler. ....	18
Şekil 3.1 : Bobinli elektromagnetik fırlatıcı a)Genel yapı, b)Örnek prototip.....	21
Şekil 3.2 : Bobinli elektromanyetik fırlatıcı. ....	22
Şekil 3.3 : Ferromanyetik Rondela ve Boru. ....	23
Şekil 3.4 : Manyetik akı dağılımı a) Tüm yüzeylerdeki “B” b) Tam model görünümü. .....	24
Şekil 3.5 : Bobinli manyetik fırlatıcının manyetik devresi.....	25
Şekil 4.1 : Volanlı enerji depolama sistemi genel yapısı (Zhou ve Qi, 2009).....	30
Şekil 4.2 : Farklı volan şekilleri (Pena Alzola,2011). ....	32
Şekil 5.1 : VEDS Maxwell’de modellenmesi.....	37
Şekil 5.2 : VEDS a) $A_g=2\text{mm}$ b) $A_g=5\text{mm}$ durumu için.....	38
Şekil 5.3 : VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi..	38
Şekil 5.4 : Stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu ( $A_{irg}=2\text{mm}$ için) ..... a) Vektörel b) Yoğunluk. ....	40
Şekil 5.5 : Stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu ( $A_{irg}=2.5\text{ mm}$ için) ..... a) Vektörel b) Yoğunluk. ....	41
Şekil 5.6 : Stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu ( $A_{irg}=3\text{ mm}$ için) ..... a) Vektörel b) Yoğunluk. ....	42
Şekil 5.7 : Ayak genişliğinin vuruuntu momenti üzerine etkisi. ....	44
Şekil 5.8 : Ayak yüksekliği “Ah” ve Ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi ..... a) $A_h=12\text{mm}$ , $A_g=2,5\text{mm}$ b) $A_h=6\text{mm}$ $A_g=3\text{mm}$ . ....	45
Şekil 5.9 : $A_g$ , $M_d$ ve $M_h$ değişimi a) $M_d=0^0$ b) $M_d=15^0$ .....	46
Şekil 5.10 : $M_{gh}$ parametresinin manyetik akı yoğunluğuna etkisi.....	48
Şekil 5.11 : $2P=2$ Kutuplu EASM motor-alternatör setinin maxwell’de ..... modellenmesi. ....	49

Şekil 5.12 : VEDS a) $A_g=2\text{mm}$ b) $A_g=5\text{mm}$ c) $A_g=8\text{mm}$ durumu.....	50
Şekil 5.13 : VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi ( $A_g=2-3,5$ mm arası).....	51
Şekil 5.14 : VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi ( $A_g=4-5,5$ mm arası).....	51
Şekil 5.15 : VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi ( $A_g=6-8$ mm arası).....	52
Şekil 5.16 : $A_g$ 'nin değişimine bağlı olarak statordaki B'nin değişimi.....	53
Şekil 5.17 : Ayak yüksekliği " $A_h=12\text{mm}$ " ve ayak genişliği " $A_g=5\text{mm}$ " ..... değişiminin etkisi. ....	55
Şekil 5.18 : Ayak yüksekliği " $A_h=12\text{mm}$ " ve ayak genişliği " $A_g=5,5\text{mm}$ " ..... değişiminin etkisi. ....	55
Şekil 5.19 : Ayak yüksekliği " $A_h=12\text{mm}$ " ve ayak genişliği " $A_g=6\text{mm}$ " ..... değişiminin etkisi. ....	56
Şekil 5.20 : Miknatis açısı $M_d=0^0$ durumunda ..... a) Stator yüzeyinde b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.....	58
Şekil 5.21 : Miknatis açısı $M_d=5^0$ durumunda a) Stator yüzeyinde ..... b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.....	58
Şekil 5.22 : Miknatis açısı $M_d=10^0$ durumunda a) Stator yüzeyinde ..... b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.....	59
Şekil 5.23 : Miknatis açısı $M_d=15^0$ durumunda a) Stator yüzeyinde ..... b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.....	59
Şekil 5.24 : Miknatis açısı $M_d=20^0$ durumunda a) Stator yüzeyinde ..... b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.....	60
Şekil 5.25 : Miknatis açısı $M_d=25^0$ durumunda a) Stator yüzeyinde ..... b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.....	60
Şekil 5.26 : Miknatis açısı $M_d=30^0$ durumunda a) Stator yüzeyinde ..... b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.....	61
Şekil 5.27 : Miknatis açısı $M_d=25^0$ durumunda a) $\text{AlfaR}=0^0$ b) $\text{AlfaR}=2^0$ ..... c) $\text{AlfaR}=4^0$ d) $\text{AlfaR}=6^0$ e) $\text{AlfaR}=8^0$ f) $\text{AlfaR}=10^0$ durumunda hava aralığındaki B'nin değişimi.....	62
Şekil 5.28 : Miknatis açısı $M_d=30^0$ durumunda a) $\text{AlfaR}=0^0$ b) $\text{AlfaR}=2^0$ ..... c) $\text{AlfaR}=4^0$ d) $\text{AlfaR}=6^0$ e) $\text{AlfaR}=8^0$ f) $\text{AlfaR}=10^0$ durumunda hava aralığındaki B'nin değişimi.....	63
Şekil 5.29 : Miknatis açısına bağlı olarak vuru momentinin elde edilişi.....	63

# **BOBİNLİ FIRLATICILAR İÇİN VOLANLI EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI MOTOR ALTERNATÖR SİSTEMİ TASARIMI VE 3D MANYETİK ANALİZİ**

## **ÖZET**

Dünyada ve ülkemizde mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olması ve gittikçe azalması enerjinin depolanması ihtiyacını doğurmuştur. Bunun için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Volanlı enerji depolama sistemleri de bunlardan biridir. Volanlar bir eksen etrafında dönerek enerji depolayan birimlerdir. Genel olarak volanlar, hızlanması esnasında üzerinde enerjiyi toplayıp, yavaşlaması sırasında ise bu enerjiyi gerekli yerlere iletir. Geçmişten günümüze enerji depolama birimi olarak dönme hareketinin kesintiye uğramaması gereken yerlerde kullanılmaktadırlar.

Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı alternatörler ise günümüzde yaygın olarak kullanılan alternatör tipidir. Bu makineler radyal akıllı makinelere göre bazı benzersiz özelliklere ve avantajlara sahiptir. Gürültü ve titreşim seviyeleri geleneksel makinelerden daha azdır. Sağladıkları güç yoğunluğu ve verimlilik avantajlarından dolayı elektrik makinelerinin kullanıldığı, özellikle düşük devirde yüksek momentin gerekli olduğu alanlarda kullanılmaktadır.

Eksenel akıllı makinelerde dikkat edilmesi ve giderilmesi gereken hususlardan biri de kalıcı mıknatıslar ile stator olukları arasında oluşan vuru momentidir. Literatür incelendiğinde vuru momentini azaltmak ve en aza indirmek için stator ve rotor tarafında olmak üzere çeşitli tekniklerin kullanıldığı görülmüştür. Stator tarafında uygulanan teknikler maliyetin fazla olması ve üretim zorluğu açısından tercih edilmemektedir. Bu sebeple rotor tarafında uygulanan teknikler daha çok kullanılmaktadır.

Son yıllarda elektromanyetik fırlatıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Elektromanyetik fırlatıcıların çalışma prensibi manyetik teoriye dayanır. Bu teoriye göre; güçlü bir manyetik alan oluşturularak, fırlatılacak cismin bu manyetik alanı izlemesi sağlanır. Elektromanyetik fırlatıcılar genel olarak bobinli ve raylı olmak üzere ikiye ayrılır.

Bobinli fırlatıcılar ardışıl sürücü bobinleri kullanılarak oluşturulan elektriksel itme kuvveti ile bu bobinler arasındaki cismin fırlatılması prensibine dayanır. Bobinli fırlatıcılar daha çok, orta hızlarda fakat büyük kütleli cisimlerin fırlatılmasında önemli rol oynamaktadırlar. Bununla beraber 1-2sn gibi kısa sürelerde yüksek enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bu enerjinin sinüsoidal ve yüksek akım değerine sahip olması gerekir. Günümüzde askeri ve savunma alanlarında, uçak ve füze fırlatma sistemlerinde, denizaltılardaki torpidoların fırlatılmasında, mermilerin yüksek menzilli atışlarında ve daha birçok alanda manyetik fırlatıcılar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada bobinli manyetik fırlatıcılar için Volanlı Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı (VEASM) motor-alternatör seti tasarlanmış ve bu tasarımın manyetik analizleri ANSYS firmasının 3D Maxwell programı ile gerçekleştirilmiştir.

Makine önce 2P=2 kutuplu, sonra da 2P=12 kutuplu olarak tasarlanmış olup her iki durumda da değişen parametreler dikkate alınarak manyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece en uygun makine yapısına ulaşmak amaçlanmıştır.

Manyetik analiz sonuçları doğrultusunda sonraki çalışmalarda volanlı enerji depolama sistemi (VEDS)'nin üretimi gerçekleştirilecektir.

2 kutuplu EASM makine için ayak genişliği  $A_g$ , ayak yüksekliği  $A_h$ , sargı genişliği  $S_g$ , boyunduruk yüksekliği  $B_h$ , mıknatıs açısı  $M_d$ , hava aralığı  $A_{irg}$ , mıknatıs yüksekliği  $M_h$  ve mıknatısın gömülü olmayan kısım yüksekliği  $M_{gh}$  değerleri programda değişken olarak alınmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda da  $A_g$ ,  $A_h$ ,  $M_d$ ,  $M_h$  ve  $M_{gh}$  için sırasıyla elde edilen değerler 2,5-3mm, 10-12mm, 5°, 7-8mm ve 0mm olarak bulunmuştur.

12 kutuplu EASM makine yapısı için yapılan manyetik analizlerde Maxwell 3d programında ayak genişliği  $A_g$ , ayak yüksekliği  $A_h$ , boyunduruk yüksekliği  $B_h$ , mıknatıs açısı  $M_d$ , hava aralığı  $A_{irg}$  ve rotor açısız dönüş derecesi  $\alpha_R$  değerleri değişken olarak alınmıştır. 12 kutuplu EASM makine yapısı için sonuçlar incelendiğinde  $A_g$ ,  $A_h$  ve  $M_d$  sırasıyla 5-6mm, 12mm ve 30 derece en uygun değerler olarak tespit edilmiştir.

# **FLYWHEEL AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR ALTERNATOR SYSTEM DESIGN AND 3D MAGNETIC ANALYSIS FOR ELECTROMAGNETIC COIL LAUNCHER**

## **SUMMARY**

The limited energy resources available in the world and in our country has caused the need to store energy. Different methods are used for this. Flywheel energy storage systems (FESS) are one of them. Flywheels are units that store energy by turning around an axis. In general, the flywheels collect the energy on the acceleration, and during the deceleration it transmits this energy to the necessary places. They have been used as energy storage units from past to present in places where rotation movement should not be interrupted.

Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) alternators are commonly used alternator type. These machines have some unique features and advantages over radial flux machines. Noise and vibration levels are less than conventional machines. They are used in areas where electric machines are used due to their power density and efficiency advantages, especially where high torque is required at low speed.

One of the points that should be taken into consideration and eliminated in axial flux machines is the cogging torque formed between the permanent magnets and the stator grooves. When the literature is examined, it has been seen that various techniques have been used in order to reduce and minimize the cogging torque, on the stator and rotor side. The techniques applied on the stator side are not preferred for the cost and production difficulties. Therefore, the techniques applied on the rotor side are used more frequently.

In recent years, studies on electromagnetic launchers have gained speed. The principle of operation of the electromagnetic launchers is based on magnetic theory. According to this theory; By creating a strong magnetic field, it is ensured that the object to be launched is monitored by this magnetic field. Electromagnetic launchers are generally divided into two types as coils and rails.

Coil launchers are based on the principle of ejecting the object between these coils with the electrical pushing force generated by the successive drive coils. Coil launchers play an important role in the launching of medium, but large objects. However, they need high energy in short periods such as 1-2 $\mu$ s. This energy must have a sinusoidal and high current value. Nowadays, magnetic launchers are used in military and defense areas, aircraft and missile launch systems, launching torpedoes in submarines, high-range shots of bullets and many other areas.

In this study, flywheel axial flux permanent magnet motor-alternator set was designed for electromagnetic coil launchers and the magnetic analysis of this design was carried out by the 3D Maxwell program of ANSYS.

The machine was first designed as  $2P = 2$  poles and then  $2P = 12$  poles. In both cases, magnetic analyzes were performed considering the changing parameters. Thus, it is aimed to reach the most suitable machine structure.

In line with the results of magnetic analysis, the production of energy storage system with flywheel will be carried out in subsequent studies.

For the 2-pole AFPM machine, the foot width  $A_g$ , the foot height  $A_h$ , the width  $S_g$ , the yoke height  $B_h$ , the magnet angle  $M_d$ , the air gap  $A_{irg}$ , the magnet height  $M_h$  and the non-embedded part height  $M_{gh}$  values of the magnet are taken as variable in the program. As a result of the analyzes, the values obtained for  $A_g$ ,  $A_h$ ,  $M_d$ ,  $M_h$  and  $M_{gh}$  were 2.5-3mm, 10-12mm, 50, 7-8mm and 0mm respectively.

Magnetic analysis for 12-pole AFPM machine structure included Maxwell 3d program with foot width  $A_g$ , foot height  $A_h$ , yoke height  $B_h$ , magnet angle  $M_d$ , air gap  $A_{irg}$  and rotor angular rotation degree  $\text{Alpha}_R$  values as variable. When the results for 12-pole EASM machine structure were examined,  $A_g$ ,  $A_h$  and  $M_d$  were determined as the most suitable values of 5-6mm, 12mm and 30 degree, respectively.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde bobinli ve raylı fırlatıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Elektromanyetik fırlatıcı sistemleri 1-2 saniye gibi kısa sürelerde yüksek enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu enerjinin kısa sürede karşılanması için yüksek akım değerine sahip enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan bu enerjinin karşılanması amacıyla son yıllarda volanlı enerji depolama sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar artmıştır. Volanlı enerji depolama sistemleri yüksek hızda döndürülen bir volanda kinetik enerjinin depolanması mantığını içerir. Volanlı enerji depolama sistemleri tekrar şarj edilebilir olması, deşarj olma imkanları ve uzun ömürleri sayesinde kısa süreli enerji ihtiyacının karşılanması için idealdirler.

Volanlı enerji depolama sistemleri rüzgar santrallerindeki ve güç sistemlerindeki enerji dalgalanmalarını gidermek için veya güneş enerji santrallerinde 3-4 saate kadar enerji depolamak için kullanılmaktadırlar. Bununla beraber çok kısa süreli yüksek enerji ihtiyacının karşılanması için de volanlı enerji depolama sistemlerinin kullanılmasının uygun olduğu literatürde görülmüştür.

Bu çalışmada bobinli manyetik fırlatıcılar için bir Volanlı Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı makine tasarlanarak ANSYS firmasının 3D Maxwell programı yardımıyla manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın;

Giriş bölümünde; konu ile ilgili literatür çalışmaları özetlenmiştir.

İkinci bölümde; eksenel akıllı sabit mıknatıslı makinelerin özellikleri, yapıları, çeşitleri, avantaj ve dezavantajları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde; bobinli manyetik fırlatıcılar ve çalışma prensipleri, manyetik fırlatıcıların tasarımına etki eden faktörler anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde; volanlı enerji depolama sistemleri, yapısı, volanın enerji denkleminin elde edilmesine yer verilmiştir.



Beşinci bölümde; 3D tasarımı yapılan modelin manyetik analizleri yapılmış ve anlatılmıştır.

Altıncı bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

## **1.1 Tezin Amacı**

Bobinli manyetik fırlatıcılar (BMF) son yıllarda önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bobinli manyetik fırlatıcıların tasarımlarının yanısıra bobinleri besleyen enerji kaynakları da önemlidir. Yapılan bu çalışmada volanlı enerji depolama sistemi (VEDS) tasarlanarak BMF'nin kısa sürede yüksek enerji ihtiyacının karşılanması hedeflenmiştir. Bunun için eksenel akıllı sürekli mıknatıslı (EASM) motor-alternatör yapısı kullanılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan VEDS motor-alternatör sisteminin ANSYS Maxwell programı ile manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlara göre VEDS'nin motor-alternatör setinin üretimi gerçekleştirilecektir.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Son yıllarda enerjinin depolanması ve farklı uygulama alanları üzerinde yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu depolama yöntemlerinden biri de volanlı enerji depolama sistemleridir. Volanlı Enerji Depolama Sistemi (VEDS) ile ilgili yapılan çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

Zhang ve arkadaşları 2004 yılında önerdikleri sistemde manyetik ve mekanik rulmanlar bulunmaktadır. Manyetik rulmanlar enerji verimliliği, kullanım ömrü ve çalışma sıcaklıkları açısından büyük değere sahiptirler. Bununla birlikte aktif kontrole sahip manyetik rulmanların kontrol zorluğu dikkat çekicidir. Mekanik rulmanlar kontrol açısından manyetik rulmanlara göre daha üstündür (Zhang ve Tseng, 2004).

Chu ve arkadaşlarının yaptığı çalışma yüksek hızlı VEDS'ye dayanmaktadır. Yaptıkları bu çalışmada volan hızı 20.000 d/dk'ya kadar çıkmaktadır. Bunun için manyetik yataklama kullanılmıştır. Dolayısıyla bu çalışma manyetik yataklamanın kontrolü üzerine odaklanmıştır (Chu ve diğ, 2005).

Zhang ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları çalışmada manyetik ve mekanik yataklama kullanmışlardır. Manyetik levitasyon 5 eksen olarak tasarlanmıştır. Kontrol zorluğu açısından mekanik rulmanlar eklenerek 5 eksenli yataklama 2 eksene

düşürülmüştür. Yapılan değişiklik kontrol kolaylığı sağlayarak maliyeti düşürmüş ve daha kolay kontrol edilebilen bir sistem elde edilmiştir. Bununla birlikte 5 eksenli levitasyon sistemlerinde sensör, kontrolör, mekanik ve elektriksel parçalarının arttığı ve bunun da maliyet ve kontrol açısından büyük bir dezavantaj oluşturduğu belirtilmiştir (Zhang ve Tseng, 2007).

Yi ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları çalışmada küçük ölçekli bir volanlı sistem tasarlamışlardır. Kullanılan elektrik makinası aksenal akıya sahiptir. Manyetik levitasyon için yüksek sıcaklıklı süper iletken kullanılarak 51.000 d/dk hızlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Önerilen tasarımın avantajı manyetik levitasyon için aktif kontrolün gerekmemesidir (Yi ve diğ., 2007).

Aydın ve arkadaşı yaptıkları çalışmada uydulara etkili bir yönelim özelliği kazandırabilecek moment kontrol jiroskobu ve çalışma prensipleri üzerinde durmuşlardır. Bu kontrol jiroskoplarında kimyasal bataryalara karşı volanlı sistemden oluşan mekanik bataryaların kullanılmasının daha verimli olacağı vurgulanmıştır. Böylece uzay araçlarındaki ağırlık ve boyut sınırlaması açısından önemli bir gelişme olduğu söylenmiştir (Aydın ve Aydemir, 2007).

Zhou ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları çalışmada önerdikleri VEDS enerji nakil hatlarında oluşan gerilim dalgalanmalarını gidermek için tasarlanmıştır. Tasarımda VEDS için sabit mıknatıslı radyal akılı makine kullanılmıştır (Zhou ve Qi, 2009).

Fu ve arkadaşları 2010 yılında VEDS'yi elektrikli araçlar için önermişlerdir. VEDS'de kullanılan generatör seti Aksenal Akıllı Sabit Mıknatıslı (EASM) yapıya sahiptir. Elektrikli araçlarda VEDS'nin kullanılması şarj deşarj sayısı ve maliyet açısından avantaj sağladığı belirtilmiştir (Fu, 2010).

Qian 2010 yılında yaptığı çalışmada rüzgar ve güneş enerji sistemlerinde volanlı enerji depolama sisteminin uygunluğu araştırılmıştır. Rüzgar ve güneş enerjisi hava şartlarına göre gün içinde değişiklik gösterebilmektedir. Bundan dolayı enerjinin sürekliliği açısından VEDS özellikle kısa süreli enerji depolama için önemlidir. Ayrıca VEDS'ler kimyasal bataryalara göre uzun ömürlü, yüksek akımlarda şarj ve deşarj kabiliyetleri açısından da dikkat çekicidir (Qian, 2010).

Aydın 2010 yılında tasarladığı VEDS ile geleceğin uyduları için farklı enerji depolama sistemi üzerinde durmuştur (Aydın, 2010).

Nguyen ve arkadaşları 2011 yılında dizayn ettikleri eksenel akılı makine ile VEDS oluşturmuşlardır. Makinenin analizleri 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanan programla yapılmıştır. Vuruntu momentini gidermek için kaykay teknikleri kullanılmıştır. İki rotorlu sistem ile eksenel kuvvetleri dengelenebileceği vurgulanmıştır (Nguyen ve diğ, 2011).

Erdinç ve arkadaşları 2011 yılında hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde bulunan birbirinden farklı enerji depolama birimlerini incelemiştir. Volanların şebeke frekanslarının dengelenmesinde ve güç sistemlerinde kısa süreli depolamada kullanıldığı belirtilmiştir (Erdinç ve diğ, 2011).

Dong'un 2012 yılında arkadaşları ile tasarladıkları VEDS ile elektromanyetik uçak fırlatma mekanizması için 2 saniyelik bir zamanda 30KW güç elde etmişlerdir. Tasarımda alternatör modu için ikinci bir sargı kullanılarak nüvesiz bir EASM makine yapısı oluşturulmuştur (Dong ve diğ, 2012).

Junfeng 2012 yılındaki çalışmasında PCB üzerine basılı devre kartı olan, küçük uydularda kullanılacak, sabit mıknatıslı flywheel motoru geliştirmiştir. Geliştirilen bu motorun bütünleşik yapısının, radyal akılı makinelere göre daha fazla avantaj sağladığı sonucuna varılmıştır (Junfeng, 2012).

Kozak ve arkadaşları 2012 yılında enerji depolama metotları üzerinde durmuşlar ve bunları maliyet, verim, kapasite gibi özellikleri açısından incelemiştir. Volanlı depolama sistemlerinin kısa zamanda büyük güç gerektiren yük sistemlerinde kullanılabileceği söylenmiştir (Kozak ve Kozak, 2012).

Daoud ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada VEDS için 8 kutba sahip radyal aktif manyetik rulman oluşturmuşlardır. Yüksek hızlı enerji depolama sistemleri için manyetik yataklamanın önemi üzerinde durulmuştur. Çalışmanın sonucunda tasarlanan 8 kutuplu radyal aktif manyetik rulmanın VEDS'ler için uygun olduğu söylenmiştir (Daoud ve diğ, 2012).

Lee ve arkadaşları 2013 yılındaki çalışmalarında birden fazla bölümden oluşan sargı yapısına sahip yeni bir bobin silahlı önermişlerdir. Çalışma manyetik fırlatma sistemine sahiptir. Önerilen sistemde toplam uzunluk azaltılarak merminin kat ettiği yol kısaltılmıştır. Böylece sürtünmeden doğan zararların azaltılması hedeflenmiştir (Lee ve diğ, 2013).

Diaz-Gonzalez ve arkadaşları 2013 yılında rüzgar türbinlerinde kullanılan volanlı enerji depolama sistemine sahip bir enerji yönetim sistemi üzerinde çalışmışlardır. Volanlı sistem kullanılmasının sebebi rüzgar türbinlerinde oluşan gerilim dalgalanmalarını sabit tutarak hat üzerindeki DC gerilimi kontrol edebilmektir (Diaz-Gonzalez ve diğ, 2013).

Kocaman 2013 yılındaki çalışmasında enerji depolama sistemlerini incelemiş ve volanların da akıllı ve mikro şebekelerde kullanılabileceğinden söz etmiştir (Kocaman, 2013).

Kato ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada ağ sistemlerinde kullanılabilecek 10MW'lık 20 dakika enerji depolayabilen volanlı enerji depolama sistemi geliştirmişlerdir. Oluşturulan bu sistemin şarj-deşarj verimliliğinin %90 lara vardığı söylenmiştir. Çalışmada 6000d/dk referans olarak kullanılmıştır. Volanlı sistemlerin yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar enerjisi için mevsim değişikliklerinden oluşan güç dalgalanmalarında kullanılabileceği söylenmiştir (Kato ve diğ, 2014).

Zhou ve arkadaşları 2014 yılındaki çalışmalarında trenlerde frenleme esnasında oluşan enerjiyi tekrar kazanabilmek için bir VEDS önermişlerdir. Oluşturulan bu sistem trenin frenlenmesi esnasında ortaya çıkan ısı enerjisini kinetik enerjiye dönüştürmektedir. Tekrar hızlanma esnasında da bu enerjiden faydalanılmaktadır (Zhou ve diğ, 2014).

Elibüyük ve arkadaşları 2014 yılındaki çalışmalarında rüzgar enerjisinin depolama metotları ve rüzgar türbinlerini incelemişlerdir. Depolama birimi olarak volanların da kullanılabileceğini söylemişlerdir (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

Bendib ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada VEDS için eksenel akıllı sabit mıknatıslı makine kullanmışlar ve bu makinenin analizlerini 3 boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanan Maxwell programını kullanarak yapmışlardır. Asıl amaç tasarlanan EASM makinenin rulmanları üzerinde meydana gelen baskı ve kuvvetleri en aza indirmektedir. Bunun için de oluşan vuru momentini kaykı metodunu kullanarak gidermişlerdir (Bendib ve diğ, 2015).

Liu ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada fırçasız tipte dc motor için analitik yöntemle yapılan hesaplamalar 2d SEY ile karşılaştırmışlardır. Analitik hesaplamalar

sargılarda indüklenen gerilimlerin hesaplanmasında kompleks olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanan programlar da bu hesaplamalar için önemlidir (Liu ve diğ, 2016).

Bernsmüller ve Rolim yaptıkları çalışmada dış rotordan oluşan relüktans makineye sahip volanlı enerji depolama sistemi geliştirmişlerdir. Tasarladıkları bu makineyi iki farklı modda motor ve generator olarak kullanmışlardır. Motor modunda 50000 d/dk, generator modunda ise 10000 d/dk hıza ulaştırmayı başarmışlardır. Bu hıza ulaşırken geçen sürede de kinetik enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleştirilmiştir (Bernsmüller ve Rolim, 2016).

Huang ve Chen 2017 yılındaki çalışmalarında elektrikli araçlarda VEDS sistemiyle beraber yakıt hücresini kullanmayı denemişlerdir. Elektrikli araçlarda, değişen şartlarla birlikte enerji ihtiyaçları da değiştiği için yakıt hücresinden çekilen güç miktarında da dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bununla birlikte yakıt hücresinin ömrü ve güvenilirliği de düşmektedir. Bu sebeple VEDS'nin yakıt hücresiyle birlikte kullanılması gerektiğini söylemişlerdir (Huang ve Chen, 2017).

Anvari ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada milsiz ve nüvesiz sabit mıknatıslı VEDS tasarlamışlardır. Tasarlanan makinenin şarj ve deşarj incelemelerini 3d SEY yöntemiyle yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda oluşturulan tasarımın yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılabileceği vurgulanmıştır (Anvari ve diğ, 2017).

Mukoyama ve arkadaşları 2017 yılındaki çalışmalarında 2015 yılından itibaren yapılan dünyanın en büyük volanlı enerji depolama sistemini tasarlamışlardır. Oluşturulan tasarım süper iletkenli manyetik rulmana ve 300 KW güce sahiptir. Tasarlanan bu sistem güneş enerji sistemine bağlanarak test edilmiş ve 3000 saat sorun çıkarmadan çalıştığı görülmüştür. Aynı zamanda 2950 d/dk'da şarj ve deşarj olarak 300 KW'lık güce sahip enerji açığa çıkarmıştır (Mukoyama ve diğ, 2017).

Arani ve arkadaşları 2017 yılında güç sistemleri ve mikro şebeke uygulamalarında VEDS ile ilgili yapılan çalışmaların gözden geçirilmesi verilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde düşük ve yüksek hızlı olmak üzere iki tür VEDS sistemi olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte VEDS'nin çevresel olma özelliği, yüksek şarj ve deşarj olma sayıları açısından öne çıktığı belirtilmiştir. Bununla birlikte ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve düşük enerji kapasitesi de önemli bir dezavantajdır.

Bundan dolayı da özellikle silah sanayi ve uzay uygulamaları gibi alanlarda kendine önemli bir yer bulmuştur (Arani ve diğ, 2017).

Literatür incelendiğinde yapılan çalışmaları aşağıdaki maddeler halinde sıralayabiliriz.

- Yüksek hızlı VEDS tasarımı (10000 devir/dk ve yukarı hızlar)
- Düşük hızlı VEDS tasarımı (10000 devir/dk aşağısı hızlar)
- Yüksek hızlı VEDS’lerde aktif manyetik rulman tasarımı
- VEDS’lerin araba, tren gibi araçlarda rejeneratif güç eldesinde kullanımı
- Rüzgar türbinlerinde ve güneş santrallerinde kısa süreli enerji elde edilmesinde kullanımı
- Enerji nakil hatlarında güç dalgalanmalarını gidermek için
- Uydu sistemlerinde enerji sağlamak için
- Elektromanyetik uçak fırlatma sistemlerinde enerji sağlamak için
- Bobinli elektromanyetik fırlatıcı silah uygulamalarında motor-alternatör seti olarak

Görüldüğü gibi VEDS’lerin hızlı şarj-deşarj olması, çevrim ömürleri ve verimlerinin fazla olması, yüksekdeşarj akımları gibi avantajlarından dolayı birçok alanda volanlar enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada da kısa sürede yüksek akım verebilecek bir VEDS tasarlanacaktır. Tasarlanacak motor-alternatör seti sahip olduğu yüksek güç yoğunluğu ve moment karakteristiği nedeniyle aksenal akılı makineden tasarlanacaktır. En önemli ölçüt kısa sürede kinetik enerjinin depolanması ve yüksek akım vererek kısa sürededeşarj olmasıdır.

Bu amaçla öncelikle volan büyüklüğü ve depolayabileceği enerji miktarı hesaplanmıştır. Sonra buna bağlı olarak 3d katı model oluşturularak EASM motor-alternatör seti tasarlanmıştır.

VEDS’ler ilgili son iki yıldır yapılan çalışmalar incelendiğinde aşağıdaki sıralama verilebilir.

Manyetik rulmanları içeren prototip çalışmalar,

- 3d ve 2d SEY kullanan programlarla manyetik analizlerin gerçekleştirilmesi,
  - VEDS için aksenal ve sabit mıknatıslı makinaların kullanılması,
  - VEDS'lerin elektrikli araçlarda kullanımı,
  - Yenilenebilir enerji kaynaklarında kısa ve orta süreli şebeke ile birlikte kullanımı,
- olarak sıralanabilir.

Yapılan bu çalışmada ise VEDS'ler bobinli manyetik fırlatıcıları sürmek için kullanılacaktır. Yapılan çalışmalarda da kısa süreli ve şarj deşarj olma sayısının yüksek olması VEDS'lerin avantajıdır. Bununla birlikte yüksek maliyetler nedeniyle özel uygulamalarda kullanıldığı da belirtilmiştir (Arani ve diğ, 2017). Bu açılardan da bakıldığında VEDS'ler bobinli manyetik fırlatıcılar için önemli bir adaydır.

## 2. EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI MAKİNELER (EASM)

İlk defa 19.Yüzyılda Michael Faraday tarafından geliştirilmiştir. Fakat yüksek güç yoğunluklu neodyum mıknatısların 1980’li yıllarda bulunmasına kadar geçen süreçte eksenel akılı makineler gelişmemiştir. 1980’li yıllarda neodyum mıknatısları ile yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Zamanla neodyum mıknatısların gelişimine paralel olarak ta sabit mıknatıslı makineler üzerine yapılan çalışmalar artmıştır.

Son yıllarda mıknatıs teknolojisindeki gelişmeler elektrik makinelerinde eksenel akılı makinelerin kullanımını önemli bir konu haline getirmiştir. Bu tip makinelere hava aralığındaki manyetik akı çizgileri eksenel olduğu için eksenel akılı makineler denmektedir. Eksenel akılı makinelerin en önemli özelliği düşük hızlarda sağladıkları yüksek moment ve yüksek güç yoğunluklarıdır. Dolayısıyla rüzgar türbinlerinde alternatör olarak kullanılmasının yanında elektrikli araçlar, fanlar, robotlar, vana kontrolleri gibi bir çok uygulamada kendilerine yer bulmuşlardır.

### 2.1 Eksenel Akılı Makinelerin Yapısı ve Sınıflandırılması

Eksenel akılı makineler genel olarak sargılardan oluşan stator ve mıknatıslardan oluşan rotor disklerinden oluşur. Stator ve rotorların farklı dizilimlerine göre değişik yapılarda makineler üretilmektedir.

Eksenel akılı makineler stator- rotor dizilim ve sayılarına göre, mıknatısların yerleştiriliş şekline göre ve nüve yapılarına göre sınıflandırılırlar.

- ❖ Stator-Rotor sayısına göre
  - Tek taraflı makineler
  - Çift taraflı makineler
  - Çoklu rotor – Çoklu statorlu makineler
- ❖ Mıknatısların yerleştiriliş şekline göre

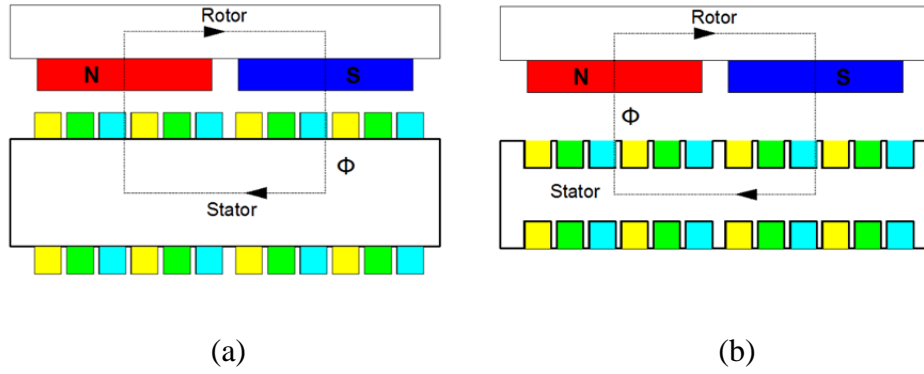


- Rotor yüzeyine yerleştirilen
- Rotor içine gömülü
  - Radyal yerleştirilen mıknatıs yapısı
  - Dairesel yerleştirilen gömülü mıknatıs yapısı (Ayçiçek,2012).
- ❖ Nüve yapılarına göre
  - Demir nüveli
  - Demir nüvesiz

### 2.1.1 Tek taraflı EASM

Eksenel akılı makinelerin en basit yapıya sahip olan şeklidir. Moment kapasiteleri düşük olup tek stator ve rotora sahip makinelerdir. Asansör sistemlerinde daha çok kullanılırlar. Bu motor tiplerinde mıknatısın oluşturduğu manyetik akı statora mıknatısın kuzey yönünden girerek, dairesel hareketlerle mıknatısın güney yönüne doğru ilerler ve rotor kısmına geçip devresini tamamlar (Ayçiçek,2012).

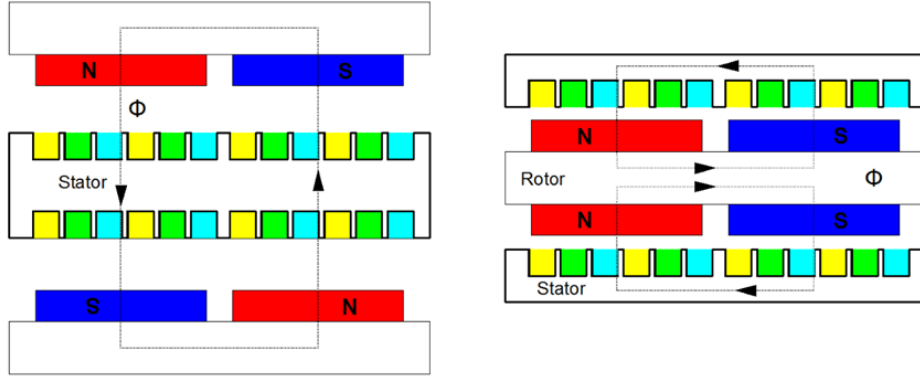
Nüveli ve nüvesiz olmak üzere iki çeşittirler. Nüveli çeşitlerinde değişik oluk tipleri oluşturulabilir. Oluşturdukları döndürme etkisi, güç yoğunluğu ve üretim maliyetleri açısından diğerlerine kıyasla daha düşüktür. Şekil 2.1’de oluklu ve oluksuz stator yapısında iki tane EASM görülmektedir. Manyetik alan çizgileri ikisinde de N kutbundan nüveye oradan da rotorun S kutbuna doğru devresini tamamlar. Oluklu olan çeşidinde oluşan vuru momentleri rulmanlar üzerinde oluşturacağı dengesiz kuvvetlerden dolayı makinenin kısa zamanda bozulmasına neden olur. Oluksuz çeşitlerinde ise sarım sayısı arttıkça hava aralığı da artar. Bu da oluşan manyetik akının ve dolayısıyla makinenin gücünün düşmesi anlamına gelir. Ayrıca oluk olmadığı için hava aralığı relüktansı değişmeyeceğinden vuru momentleri oluşmaz. Bunun yerine hava aralığı açıklığına bağlı olarak sürekli bir çekme momenti oluşur. Oluksuz tipteki eksenel akılı makineler için hava aralığı nüve yüzeyi ile mıknatıs arasındaki mesafeye bağlıdır. Sarım sayısının artması hava aralığı değerini de yükselteceği için aradaki çekim kuvveti azalır ve hava aralığı manyetik akısı da azalır. Bu da makinenin gücü açısından istenmeyen bir etmendir.



Şekil 2.1 : (a) Oluksuz tip stator (b) Oluklu tip stator.

### 2.1.2 Çift taraflı EASM

Çift taraflı EASM makinelerde kuvvetler çift tarafta meydana geldiğinden merkezdeki rulmanlar üzerinde oluşan kuvvetler daha dengelidir. Bu da makinenin ömrünün artması anlamına gelir. Aynı zamanda oluşan güç yoğunlukları tek taraflı makineye göre daha fazladır. Demir nüveli veya demir nüvesiz olmak üzere tasarlanabilirler. Nüvesiz tipteki EASM makineler üretim zorluğu ve düşük güç yoğunluğu nedeniyle pek tercih edilmezler. Bununla birlikte vuru momentinin oluşmaması da büyük bir avantajdır. Nüveli tipteki EASM makineler değişik oluk tiplerinde üretilebilirler. Oluk tipleri açık oluk, yarı açık oluk veya kapalı oluk yapısında olabilir. Bununla birlikte çift taraflı EASM makineler çift rotor tek stator veya tek rotor çift stator yapılarında üretilebilmektedir. Şekil 2.2.a'da çift rotor tek stator yapısı verilmiştir. Bu yapıya bağlı olarak mıknatıs diziliminde toroidal sargı yapısı kullanıldığında karşılıklı rotorlardaki kutuplar aynı olmalıdır. Çünkü sağ el kuralına göre sargı da oluşacak kuvvetlere bakıldığında aynı yönde döndürme kuvvetleri oluşması için iki rotordaki mıknatıs kutupları aynı olmalıdır. Bu tip EASM makinelere NN tip EASM makine denilmektedir. Şekil 2.2.a'da manyetik alan çizgileri rotorun N kutbundan çıkarak statorun demir nüvesinin boyunduruğundan tekrar aynı rotorun S kutbuna gelerek devresini tamamlar. Manyetik devrenin yönü diğer rotor içinde geçerlidir. Şekil 2.2.b'de ise tek rotor çift stator yapısı verilmiştir. Verilen yapıda ise N kutbundan çıkan manyetik alan çizgileri manyetik nüveden geçerek rotorun S kutbuna geçer ve devresini tamamlar. Çift rotor yapısında trapezoidal veya rhomboidal yapıda sargı kullanıldığında NS tipteki rotor yapısı da kullanılabilir. NS tipteki yapıda ise rotorun N kutbundan çıkan manyetik alan çizgileri stator demir nüvesine geçer. Statorun demir nüvesinden ise diğer rotorun S kutbuna geçerek devresini tamamlar.



**Şekil 2.2 :** (a) Oluklu tek stator iki rotorlu, (b) Oluklu tek rotor iki statorlu EASM makine.

### 2.1.2.1 Tek rotor-çift statorlu oluksuz yapı çift taraflı EASM

Bu makinelerde rotor, 2 stator arasında ortaya yerleştirilmiş olup rotor yüzeyinde mıknatıslar, stator da sargılar bulunur. Bu tip makinelerde her iki tarafta da kuvvet oluştuğundan tek taraflı makinelere göre daha dengelidir. Böylece makinenin uzun ömürlü olması sağlanır. Çift taraflı makinelerde statorların paralel bağlanması ile birinin arızalanması durumunda bile diğer stator çalışmaya devam edebilir (Gör,2014).

Bu tip motor yapısında dışta stator ve içte rotor şeklinde bir yapıya sahiptir. Yapı 2 stator ve 1 kalıcı mıknatıslı rotor diskinden oluşur. Statorlar toroid nüveden yapılmış oluksuz yapıdadır. 3 fazlı sarım şemasına göre birbirinden 120 derece faz farkıyla oluşturulan sargılar nüveye toroidal olarak sarılır. Tüm oluksuz makine yapılarında olduğu gibi, sağlamlığı artırmak ve daha iyi iletken ısı transferi sağlamak için, stator sargıları arasındaki boşlukları doldurmak amacıyla epoksi reçine içerikli manyetik olmayan bir malzeme kullanılmaktadır (Aydın,2004).

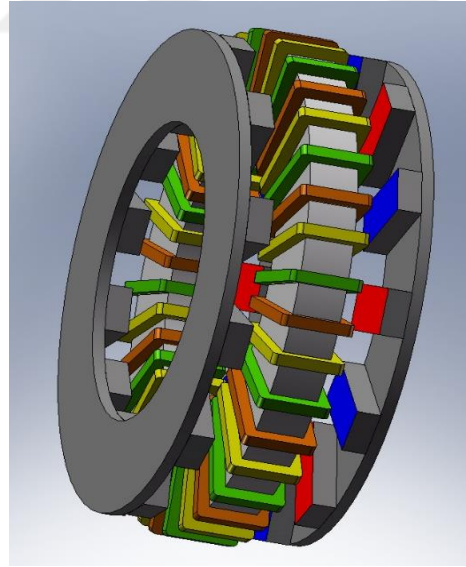
Rotor yapısı çift rotorlu yapılara göre farklıdır. Çift rotorlu sistemlerde manyetik akının izlediği yoldan dolayı manyetik kutupların sabitlendiği kısımlar manyetik geçirgenliğe sahip metal malzemelere yapıştırılarak veya gömülerek monte edilir. Tek rotorlu sistemlerde ise manyetik akı rotor kutuplarından çıkarak devresini stator demir nüvesini geçerek tamamlar. Dolayısıyla rotorda manyetik özelliği olan bir nüveye gerek yoktur. Fan tipinde mıknatıslar kullanıldığında kutupların arası epoxy reçine ile doldurulabilir. Fakat bu durumda rotorda oluşan kuvvetlere dayanıklı bir yapı elde edilemez. Bunun için rotorda mıknatıs kutuplarını taşıyan bir yapıya ihtiyaç vardır. Bu yapı alüminyumdan veya çelikten yapılabilir. Çelik veya alüminyum taşıyıcı sistem eddy akımlarının oluşmasına neden olduğu için demir kayıplarının artmasına sebep

olur. Bunun yanında rotor yapısını kuvvetlendirdiği ve oluşan aksel kuvvetleri taşıyabileceğinden dolayı demir kayıplarını göz ardı edebiliriz (Aydın,2004).

### 2.1.2.2 Nüveli ve statoru içte olan makineler

Oluksuz TORUS (TORUS-NS) makine disk tipinde motor yapısına sahip tipik bir aksel akılı sabit mıknatıslı makinedir. Aksel akılı makine yapısı Şekil 2.3'de verilmiştir. Aksel akılı makine sabit mıknatısların bulunduğu iki rotor arasında bir stator oluşmaktadır. Stator yapısı silisli ve bir tarafı yalıtılmış demir rulo saçın sarılarak oluşturulduğu toroidal demir nüveden oluşmaktadır. Rotor yapısı ise blok demirden oluşan diske yay şeklindeki mıknatısların yapıştırılarak monte edilmesiyle oluşturulur. Mıknatıslar NdFeBr malzemeden üretilmiştir. Rotor demirini bağlayan shaft ise manyetik olmayan çelik malzemeden üretilmektedir.

Statordaki sargılar ise toroidal olarak tek katlı sarım şeklindedir. Sargılar 3 fazlı birbirinden 120 derece faz farkına göre yerleştirilir. Toroidal sargının kutuplara bakan yüzeylerinde kuvvetler oluşur. Dolayısıyla iç çap ile dış çap arasındaki sargı uzunluğu ile mile olan uzaklığı oluşan momentin değerini doğrudan etkiler (Aydın,2004).



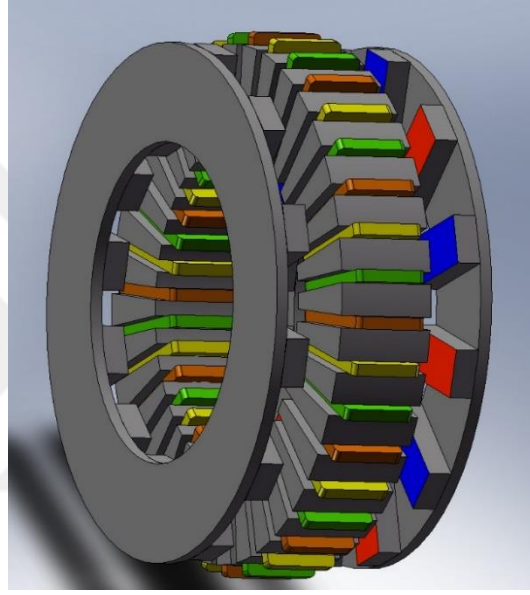
**Şekil 2.3** : Nüveli oluksuz aksel akılı sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator makine yapısı.

Bu tip makinelerde rotorların arasına yerleştirilen nüveli stator, oluklu veya oluksuz olarak ta tasarlanabilir. Stator sargıları tek ya da çok fazlı olarak sarılabilir. Oluksuz oluşturulan makine yapısında çok az gürültü duyulduğu ve vuru momentinin

azaldığı görülmüştür. Ayrıca yüksek frekanslarda ve titreşimlerdeki rotor kayıpları da en aza indirilebilir (Gör, 2014).

### 2.1.2.3 Oluklu ve statoru içte olan makineler

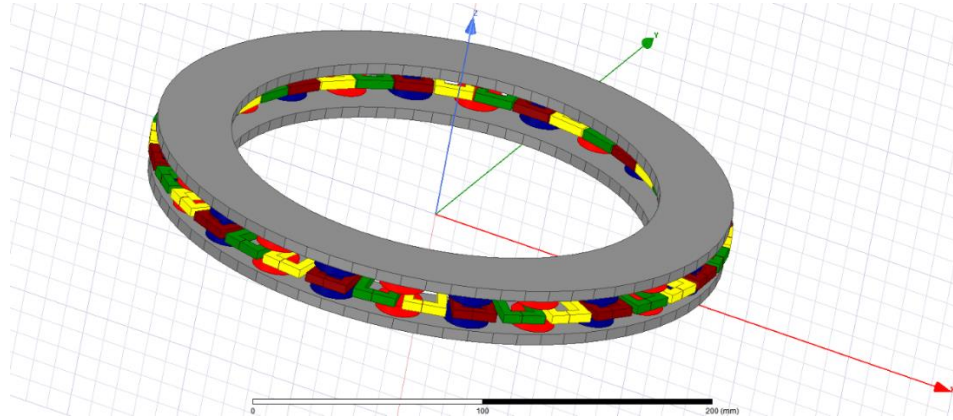
Bu tip makinelerde içte bulunan stator nüvesi, katmanlı yapıya sahip nüve malzemesinden yapılarak nüveye oluklu şekil verilir. Hava aralığının 1mm'den az olması manyetik akıyı da artırır (Gör,2014). Oluklu statoru içte olan EASM makine yapısı şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 : Oluklu aksenal akıli sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator makine yapısı.

### 2.1.2.4 Nüvesiz ve statoru içte olan makineler

Bu tip makinelerde stator, şekil 2.5'de verildiği gibi epoksi ya da reçine gibi malzemelerden yapılan manyetik ve iletken olmayan bir kalıbın içine yerleştirilir. Nüvesiz stator kullanıldığından nüve kayıpları oluşmaz. Fakat yüksek frekanslı çalışmalarda stator sargılarının üzerinde girdap kayıpları oluşabilir. Nüve kullanılmadığı için stator ve rotor arasında manyetik çekim kuvveti oluşmayacak ve bu da vuru momentini ortadan kaldırmış olacaktır. Ancak istenen manyetik akının oluşması için nüveli makinelere kıyasla daha çok sürekli mıknatıs kullanılmalıdır (Gör, 2014).



**Şekil 2.5 :** Nüvesiz aksenal akılı sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator makine yapısı.

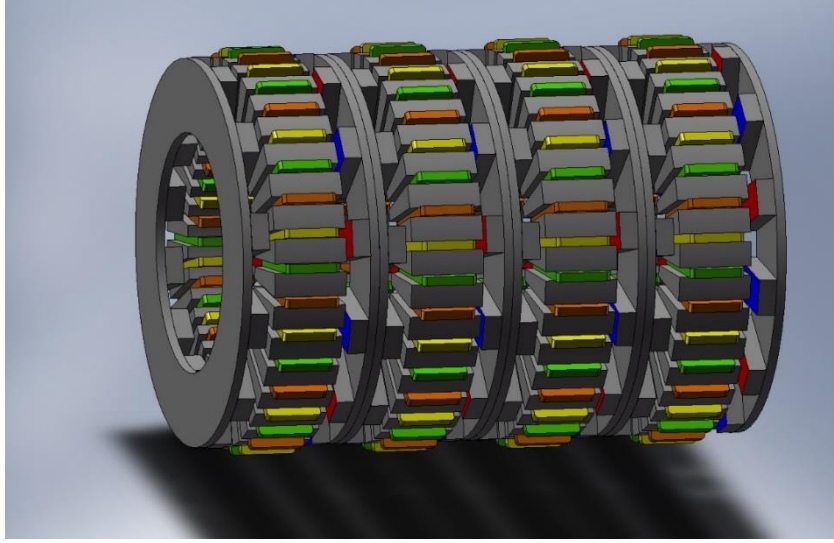
### 2.1.3 Çok rotor-çok statorlu EASM

EASM makinelerde stator ve rotor sayıları artırılarak daha yüksek moment ve güç değerleri elde edilebilir. Makine gücünü artırırken makine çapının büyütülmesi yerine stator ve rotor sayısının artırılması aksenal kuvvetlerinde azalmasını sağlamaktadır. Böylece mekanik olarak sistemin kurulması daha kolay hale gelmektedir. Bunun yanı sıra makine uzunluğu artarak makinenin kompakt yapısı bozulmaktadır (Gör, 2014)

Aksenal akılı makinelerde elektromanyetik moment dış çapın bir fonksiyonudur. Makine küçük dış çap için tasarlanacaksa, çok kademeli düzenlemeler kullanılarak istenen tork elde edilebilir (Aydın, 2004).

Çok kademeli makineler, kolay montaj ve daha iyi tork ve güç yoğunlukları nedeniyle gerçekten rekabetçidir. Bunun nedeni, aksenal akılı makinelerde hava boşluğu yüzeyinin aynı kalırken radyal akılı makinelerde iç rotorlara girerken daha küçük hale gelmesidir ki bu güç veya tork yoğunluğunu radyal akılı makinelere göre daha yüksek yapar ve makine montajını çok daha kolaylaştırır. Dikkat edilmesi gereken bir konu rotorların dengesizliğidir. Rotorlar çok kolay bir şekilde kararsızlığa girebilir. Ayrıca rotor sayısından dolayı mekanik hava boşlukları değişken olabilir. Bu nedenle tasarımın mekanik yönüne özel dikkat edilmesi gerekir (Aydın,2004).

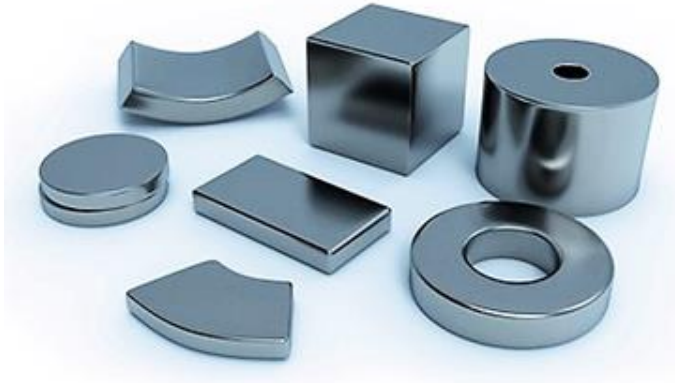
Şekil 2.6'da verilen çok kademeli makine yapısı  $n$  stator ve  $n+1$  rotor diski içerir, burada  $n$  disk sayısını içerir. Rotorlar aynı mekanik mili paylaşır.  $N$  adet statorun stator sargıları paralel veya seri olarak bağlanabilir. Rotor çekirdeği sadece dış rotor için kullanılır ve ana akı yolunu sağladığı için dikkatlice seçilmelidir (Aydın,2004).



**Şekil 2.6 :** Nüvesiz aksel akılı sürekli mıknatıslı çift rotor tek stator makine yapısı.

## 2.2 EASM Makinelerin Stator ve Rotor Yapıları

Eksenel akılı makinelerde stator sargıları nüvesiz ya da nüveli olarak oluşturulabilir. Nüveli olanlarda yüksek manyetik geçirgenliğe sahip halka şeklinde sarılı demir nüve bulunur. Rotorda kullanılan mıknatıslar ya disklerin üzerine yapıştırılır ya da vida yardımıyla sabitlenir. Bu mıknatıslar neodyum demir bor malzemedен meydana gelir. Mıknatis seçimi yapılırken oluşturulan makinenin özellikleri, çalışma sıcaklığı gibi etkenlere bakılmalıdır. Değişik yapılarda mıknatıslar kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Aynı zamanda EASM makinelerde oluşan vuru mu momentini azaltmak için de mıknatıslar üzerinde kayk teknikleri kullanılmaktadır. Şekil 2.7’de EASM makinelerde kullanılan farklı tiplerdeki neodyum mıknatıslar görülmektedir.



**Şekil 2.7 :** EASM makinelerde kullanılan neodyum mıknatıslar.

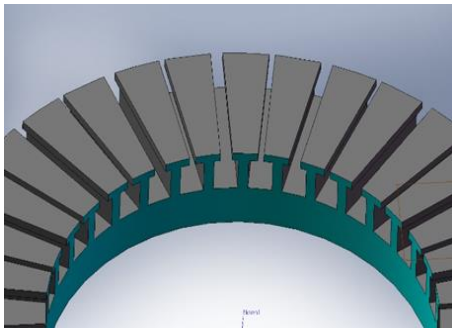
### 2.3 Easm Makinelerde Vuruntu Momenti

Vuruntu momenti EASM makinelerde giderilmesi gereken önemli unsurların başında gelir. Vuruntu momenti, kullanılan sürekli mıknatıslar ile stator olukları arasındaki etkileşimin sonucunda oluşur ve giderilmemesi durumunda motor miline ciddi hasarlar verebilir. Bu mıknatıs ve oluklar arasındaki etkileşimin sonucunda EASM makinelerde moment dalgalanmaları meydana gelir ve bu dalgalanmalar makinenin sargıları, mıknatısları ve rulmanları üzerinde hasara yol açarlar.

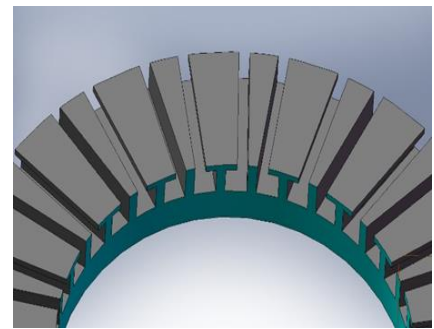
Vuruntu momentini gidermek ve azaltmak için uygulanan teknikler stator ve rotor tarafında olmak üzere 2 gruba ayrılır. Genellikle stator tarafında kullanılan teknikler üretimi zorlaştırdığı ve maliyeti artırdığı için çok fazla tercih edilmez. Rotor tarafında uygulanan teknikler düşük maliyeti sebebiyle daha fazla tercih edilmektedir. Bu teknikler mıknatıs adımının değiştirilmesi, klasik kaykık, diğer kaykık metotları, mıknatısın veya kutbun kaydırılması, rotorun dairesel olarak ötelenmesi olarak incelenebilir (Aydın, 2007).

#### 2.3.1 Statora uygulanan vuruntu momentini azaltıcı teknikler

EASM makinelerde vuruntu momentini azaltmak için stator tarafında uygulanan teknikler arasında stator dişlerine yardımcı oluklar açmak, stator oluklarının veya oluk aralıklarının kaydırılması, mıknatıs adımının mıknatıs kutuplarına oranı gösterilebilir. Fakat uygulanan bu teknikler hem maliyet hem de zaman açısından EASM makinelerde çok fazla tercih edilmemektedir. Şekil 2.8’de stator tarafında uygulanan teknikler verilmiştir. Bu teknikler sırasıyla kaydırılmış oluklar, yardımcı oluklar ve farklı oluk aralıkları olarak sıralanabilir.

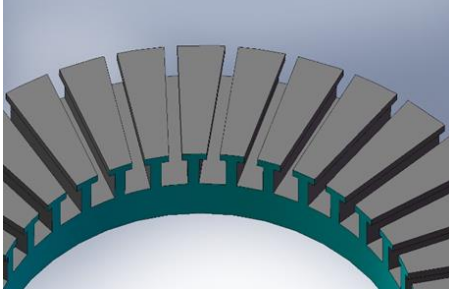


(a)

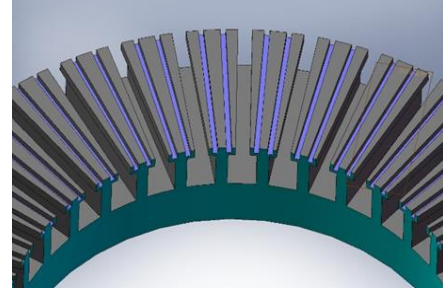


(b)





(c)



(d)

**Şekil 2.8 :** Stator tarafına uygulanan vurutu momentini giderici teknikler  
a) Değişken oluk açıklıkları b) Kaydırılmış oluklar c) Kaykı verilmiş oluklar d) Yardımcı oluklar tarafına uygulanan vurutu momentini giderici teknikler.

### 2.3.2 Rotora uygulanan vurutu momentini azaltıcı teknikler

EASM makinelerde rotor tarafında uygulanan teknikler daha ucuz ve pratik olduğu için stator tarafına uygulanan tekniklerden daha fazla tercih edilirler. Bu sebeple rotor tarafında uygulanan teknikler üzerinde daha fazla durulmuştur.

#### 2.3.2.1 Mıknatıs adımlarının mıknatıs kutuplarına oranı

EASM makinelerde vurutu momentini azaltmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Mıknatıs adımının kutup adımına oranının uygun bir değerde seçilmesi ile vurutu momentini en aza indirilebilir. Bilindiği üzere vurutu momentinin oluşum sebebi mıknatıs kutupları ile stator olukları arasındaki etkileşimdir. Dolayısıyla mıknatıs adımlarının azaltılması ile vurutu momentini de azaltılmış olur.

#### 2.3.2.2 Klasik kaykı metodu

Vurutu momentini azaltmak için kullanılan basit ve etkili yöntemlerden biridir. Sürekli mıknatıslı makinelerde stator oluklarına ya da rotor mıknatıslarına kaykı verme olarak iki şekilde uygulanır. Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı (RASM) motorlarda stator oluklarına kaykı verilirken, EASM motorlarda ise rotor mıknatıslarına kaykı vermek daha kolay ve ucuzdur. Bu nedenle EASM motorlarda rotordaki mıknatıslara kaykı verilerek vurutu momentini azaltılmaya çalışılır. Bu tekniğin dezavantajları ortalama momentte düşüşe sebep olması, kaçak endüktanstaki artış ve karmaşık mıknatıs yapısı olarak sıralanabilir.

### 2.3.2.3 Diğer kaykı teknikleri

EASM motorlarda kullanılan değişik kaykı teknikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Bu teknikler kaykısız mıknatıs, klasik kaykılı mıknatıs, üçgen kaykı, paralel kenarlı mıknatıs, yamuk şekilli mıknatıs, dairesel mıknatıs ve çift kaykılı mıknatıstır.

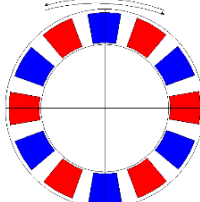
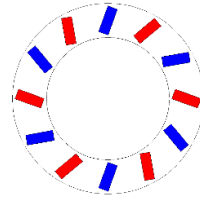
### 2.3.2.4 Kutup veya mıknatıs kaydırma

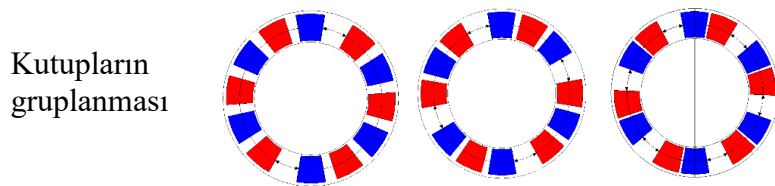
Vuruntu momentini azaltmak için kullanılan tekniklerden biri de Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi yan yana olan mıknatısları birbirine göre kaydırmaktır. Fakat mıknatısların simetrik konumu değiştirildiğinde mıknatısın bir yanındaki kaçak akı artarken diğer yanındaki kaçak akı azalır. Bu da bir dezavantajdır.

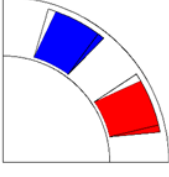
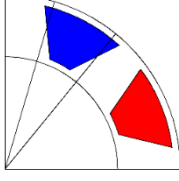
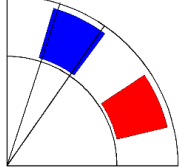
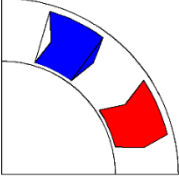
### 2.3.2.5 Rotoru dairesel olarak kaydırma

Çift rotorlu ve çift hava aralıklı EASM makinelerde vuruntu momenti hesaplanırken her bir hava aralığındaki vuruntu momentlerinin toplamı dikkate alınır. Bu sebeple birbirlerine göre uygun açıda ötelenen rotorlarla vuruntu momentinin azaltılması sağlanır.

Çizelge 2.1 : Rotor tarafına uygulanan teknikler.

Rotor tarafına uygulanan teknikler		
Rotorların birbirine göre kaydırılması		Mıknatıslara kendi ekseninde açı verilmesi 
	2’li Gruplama	4’lü Gruplama
		6’lı Gruplama



	Klasik tip	Üçgen tip	Paralel tip	Çift eğimli
Mıknatıs kaykırı				

## 2.4 Eksenel Akılı Makinelerin Avantaj ve Dezavantajları

Genel olarak eksenel akılı sabit mıknatıslı makinelerin, radyal akılı olanlara göre avantajları şu şekilde sıralanmaktadır.

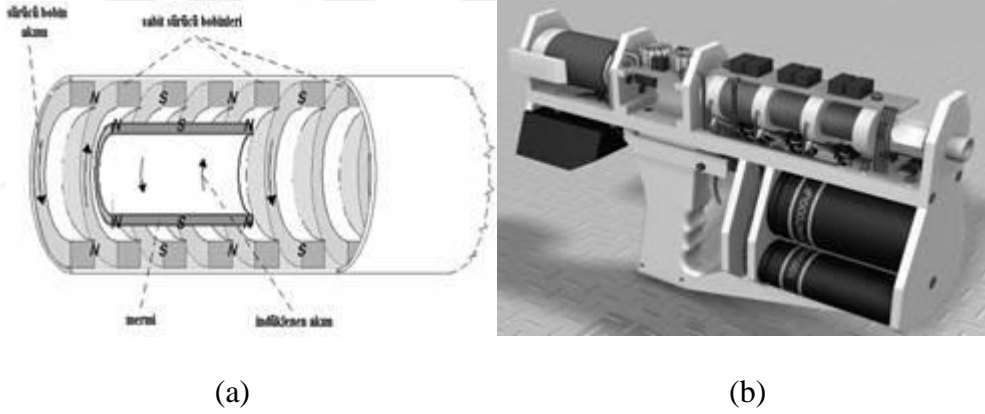
- Daha geniş yarıçap/uzunluk oranı
- Düzlemsel ve ayarlanabilir hava aralığı
- Çekirdek malzemede kayıpların azaltılmasıyla daha yüksek güç yoğunluğu
- Yapısal özellikleri ile aynı güç ve tork değerlerinde daha ideal tasarım yapılabilirlik.
- Daha çok kutup sayısına uygunluk nedeniyle yüksek frekans ya da düşük hızlara uygunluk (Gör, 2014).

### Dezavantajları

- En büyük dezavantajı akustik gürültü ve titreşime neden olan vuruş momenti
- Mıknatısların çalışma sıcaklıkları sargılara göre daha düşüktür. Dolayısıyla yüksek sıcaklıktaki yerlerde kullanımları zorlaşır. Bu koşullarda manyetik özelliklerini yitirebilirler.
- Neodyum mıknatısların maliyetleri düşmekle birlikte özel yapılarda maliyetler yükselmektedir.
- Yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı makineler merkezkaç kuvvetlerden çok fazla etkilenir.
- Kullanılan sensörler arıza olasılıklarını ve bakım maliyetlerini arttıran bir faktördür.

### 3. BOBİNLİ FIRLATICILAR

Bobinli fırlatıcıların çalışma prensibi arka arkaya oluşturulan sürücü bobinleri arasındaki cismin, oluşan elektriksel itme kuvvetiyle fırlatılmasıdır. Bu fırlatıcılar genellikle orta hızlarla büyük kütleli cisimlerin fırlatılmasında kullanılır. Şekil 3.1.a'da bobinli elektromanyetik fırlatma sisteminin genel yapısı, Şekil 3.1.b'de ise bobinli elektromanyetik fırlatıcı prensibine göre üretilen bir silah prototipi verilmiştir (Akyazı ve Akpınar, 2008).



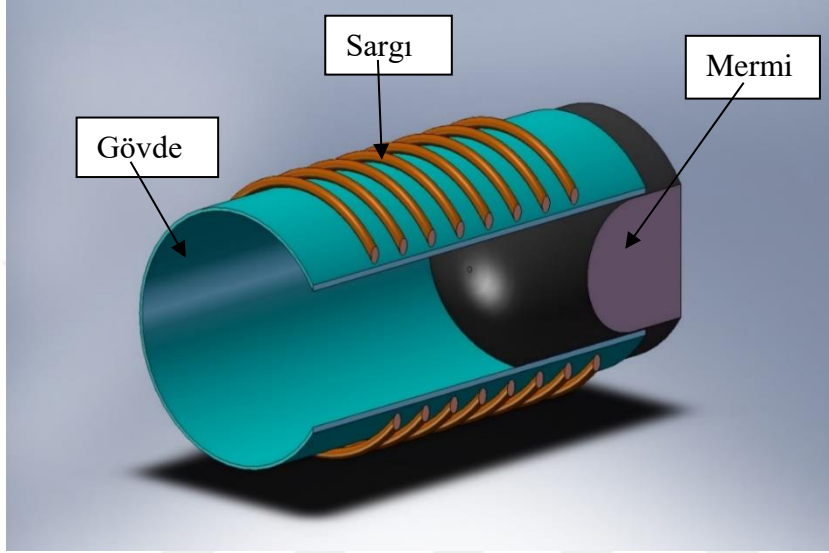
Şekil 3.1 : Bobinli elektromanyetik fırlatıcı a)Genel yapı, b)Örnek prototip.

Fırlatıcılarda bulunan mekanik zorlanmanın daha geniş yüzeyde görülmesi, merminin uzun ömürlü olması ve daha fazla verim alınması sebebiyle bobinli fırlatıcılar raylı fırlatıcılara göre daha avantajlıdır. Bobinli fırlatıcılar bir ya da birden fazla bölmeli bobin yapıları kullanılarak üretilirler (Bıçak, 2010).

Günümüzdeki teknolojik gelişmelere bağlı olarak elektromanyetik fırlatıcıların kullanım alanları özellikle askeri alanlarda giderek artmaktadır. Manyetik fırlatıcıların askeri alanlardaki uygulamaları; zırhlı araç ve yapılarda zırh tahribatı, denizaltı ve gemilerde torpidoların atılması, uzak menzile erişebilen güdümlü füzelerin ve uçak gemilerinde uçakların fırlatılması olarak sıralanabilir (Akyazı ve diğ, 2015).

### 3.1 Bobinli Fırlatıcılarda Elektromanyetik Fırlatma

Bobinli fırlatıcılarda mermi, şekil 3.2’de görüldüğü gibi bobiniden geçen akımın oluşturduğu manyetik alanın mermiyi çekmesi sonucu oluşan kuvvet ile hareket eder (İnger, 2013).



Şekil 3.2 : Bobinli elektromanyetik fırlatıcı.

Bobinli fırlatıcılarda genel olarak 1000g seviyelerinde düşük ama faydalı yük (mermi) için uygun ivme elde edilebilir. Bu da daha hafif kütlelerde mermi tasarımına olanak sağlar. Dolayısıyla maliyet açısından bobinli fırlatıcılar tercih edilir. Ay’dan uygulanan fırlatma sistemlerinde de bobinli fırlatıcıların kullanılması tercih edilmektedir (İnger, 2013).

İçinden akım geçirilen bobinin çevresinde manyetik alan oluşur. Bu manyetik akı sargının iç kısmında yoğunlaşır. Bobinin yanına yerleştirilen metalik bir cismin manyetik geçirgenliği daha yüksek olduğundan oluşan manyetik akı bu cisim üzerinden geçmeyi tercih eder ve manyetik indüksiyon oluşturarak cismi içine doğru çeker. Bobinli fırlatıcıları oluşturan sargıların etrafında oluşan manyetik alan mermi için manyetik levitasyon sağlar. Böylece mermi havada asılı bir şekilde kalır. Gövde üzerinde sarılı her bir sargı çekme ve itme kuvveti oluşturur (İnger, 2013).

Bobinli fırlatıcılar ard arda kullanılan sürücü bobinleri arasındaki cismin itme çekme prensibine dayalı olarak fırlatılmasıyla çalışır. Tek sargı kullanmak yerine, ard arda dizilen belli sayıda sargı kullanılarak aradaki cismin hızına bağlı olarak tetiklenme ve

fırlatma olayı gerçekleştirilir. Üzerinden akım geçirilen bu sargılar etrafında oluşan manyetik alan sayesinde aradaki cisim (mermi) hızlandırılır (İnger, 2013).

Bobinli fırlatıcılar büyük kütleli cisimlerin fırlatılmasında da kullanılırlar. Bobinli manyetik fırlatıcılarda değişken ya da hareketli güçlü bir manyetik alan oluşturularak hareket ettirilen ya da fırlatılan cismin bu manyetik alanı izlemesini sağlamak esastır (İnger, 2013).

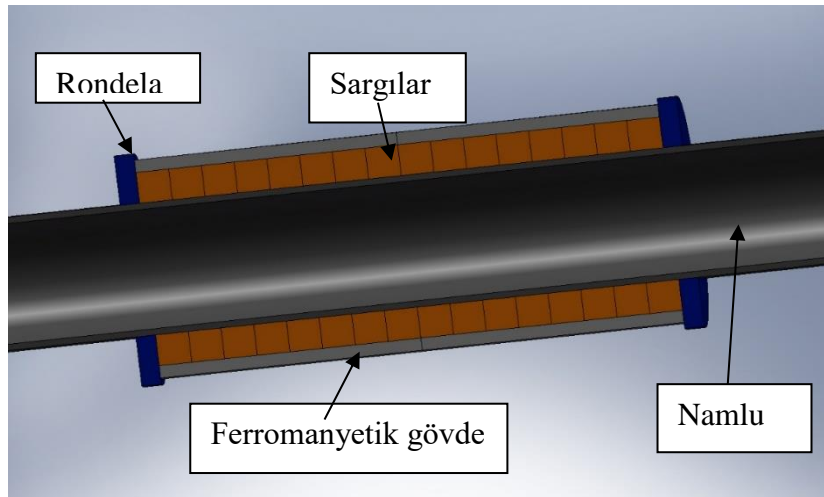
### 3.2 Bobinli Fırlatıcı Tasarımına Etki Eden Faktörler

Bobinli manyetik fırlatıcılar temel olarak arda arda sarılan bobinlerin enerjilendirilmesi ile kütleli fırlatılması prensibine dayanır.

#### 3.2.1 Ferromanyetik gövde

Bobinin üzerinden geçen manyetik akının artırılması için bobinin etrafına ferromanyetik özelliği olan demir eklemek gerekir. Eklenen bu ferromanyetik malzeme oluşan akının namluya yönlendirilmesini sağlar (Harmankaya ve elik, 2013).

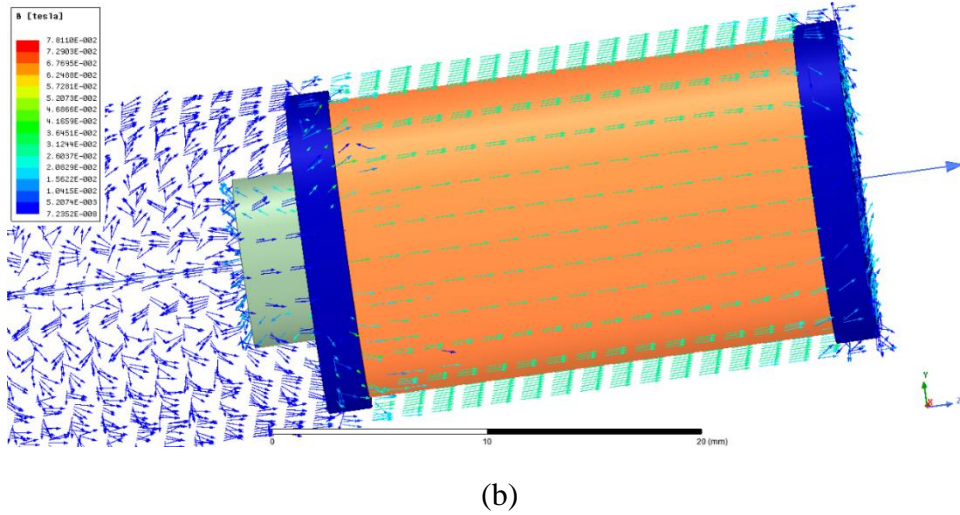
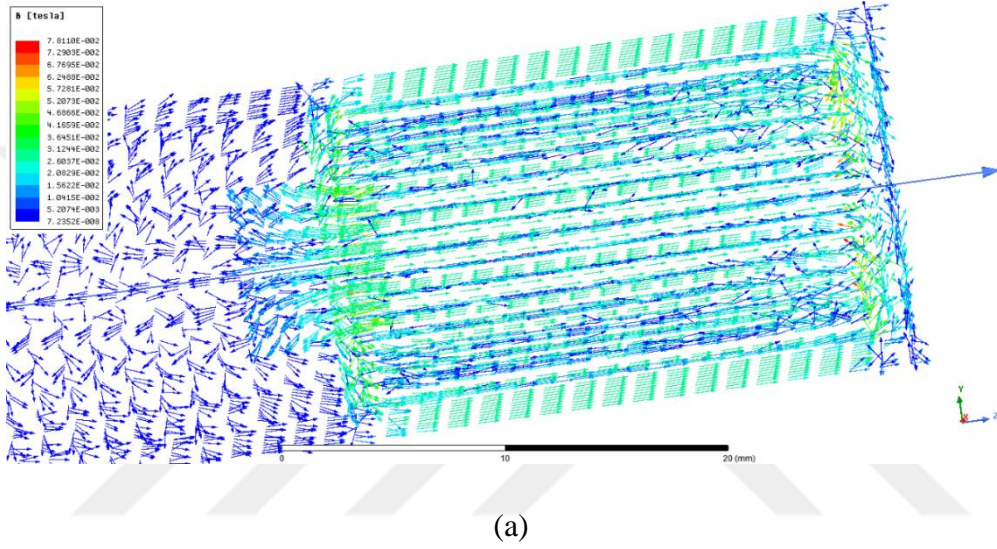
Burada sadece iki uca eklenen düz rondela ile manyetik alanın devresi de tamamlanması sağlanmaktadır. Şekil 3.3’de ferromanyetik rondela ve boru ile sarılmış bobinin kesiti verilmiştir.



Şekil 3.3 : Ferromanyetik Rondela ve Boru.

### 3.2.2 Manyetik alan çizgileri

Manyetik akının büyük kısmı rondela ve borular üzerinden taşınmaktadır. Şekil 3.4.a'da modelin içindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı verilmiştir. Şekil 3.4.b'de ise rondela , mermi ve sargının bulunduğu durumdaki manyetik akı dağılımı verilmiştir. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi sargının oluşturduğu manyetik akı devresini yaklaşan mermi üzerinden tamamlamaktadır. Oluşan çekim kuvveti ile mermi hız kazanmaktadır (Harmankaya ve Çelik, 2013).

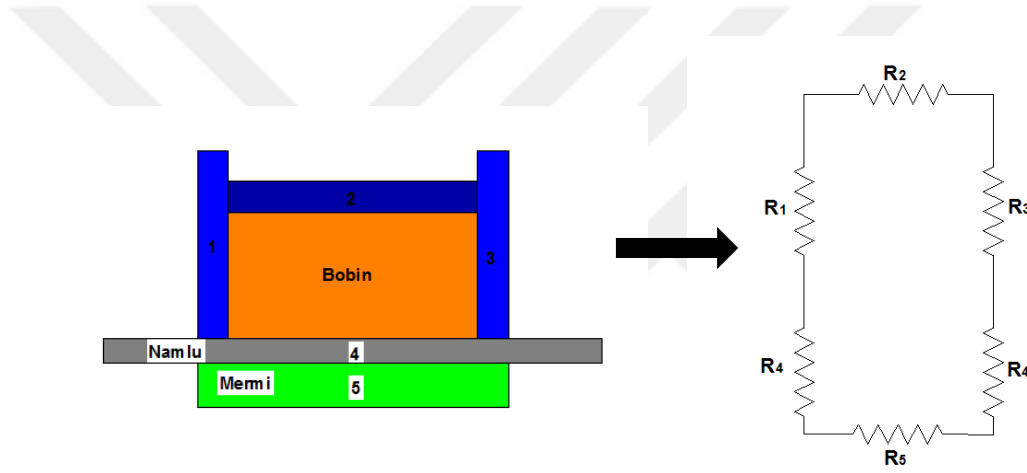


Şekil 3.4 : Manyetik akı dağılımı a) Tüm yüzeylerdeki “B” b) Tam model görünümü.

### 3.2.3 Rondelalar

Bobinin etrafındaki ferromanyetik malzemenin akı yolu oluşturacak biçimde, bobinin sağ ve sol tarafına yerleştirilen ferromanyetik malzemelere rondela denir. Rondelalar ile boru arasında boşluk olmaması gerekir. Eğer boşluk bırakılırsa manyetik direncin artmasına neden olur. Bu da manyetik alanı zayıflatır (Harmankaya ve Çelik, 2013).

Şekil 3.4'deki BMF'nin manyetik devresi şekil 3.5'de verilmiştir. Her bir numaralandırılmış kısım manyetik direnci ifade etmektedir. Şekil 3.5'de numaralandırılan 1,2,3,4 ve 5 sırasıyla rondela, dış gövde, rondela, namlu ve mermiyi ifade etmektedir. "R" ile ifade edilen ise relüktans değerleridir (Harmankaya ve Çelik, 2013).



Şekil 3.5 : Bobinli manyetik fırlatıcının manyetik devresi.

### 3.2.4 Bobinli manyetik fırlatıcıda sürücü devreye direnç eklenmesi

Bobinli fırlatıcının sürme devresine paralel bağlanan yüksek değerli koruyucu direnç tetiklemenin gerçekleşemediği durumlarda kapasitenin boşalmasını sağlar. Kapasitenin boşalması bizim kontrolümüzde olmalıdır ki bu sebeple yüksek değerli bir direnç kullanılmalıdır. Aksi takdirde kapasite küçük değerli direnç üzerinden boşalacaktır ki bu da istenmeyen bir durumdur (Harmankaya ve Çelik, 2013).

Sürme devresinde kullanılan tristör üzerinden geçecek anlık akım değerinin kapasiteden boşalan akımdan düşük olması için küçük değerli bir direnç seri bağlı kullanılmalıdır. Aksi takdirde kapasitenin yavaş boşalmasına neden olur. Tristörün akım taşıma kapasitesine uygun direnç değeri seçilmelidir. Bobin üzerinden geçen



akım oluşacak manyetik alanın değerini belirler ve bu manyetik alan ile oluşan F itme kuvveti fırlatılan cisme hız kazandırır (Harmankaya ve Çelik, 2013).

Bobinin üzerinden yüksek akım geçmesi direncin ısınmasına sebep olur. Direncin büyüklüğünün yanı sıra gücü de önemlidir. Devrede direncin küçülmesi demek yükün bobin üzerinden devresini tamamlaması anlamına gelir. Ayrıca direncin daha da küçülmesi devrenin osilasyona girmesine neden olur. Bununla birlikte oluşan osilasyon fırlayan merminin bobin enerjisini absorbe edeceği için osilasyona neden olacak enerji miktarı da ihmal edilebilecek düzeye düşmektedir (Harmankaya ve Çelik, 2013).

Mermi ve bobinin birlikte hareket edebilmesi bizim için önemlidir. Çünkü kısa süreli bobin akımında mermi akımdan önce hareket eder ve bobinden akım akmaz. Bobinde uzun süreli akım geçirildiği takdirde mermi bobin tarafından geri çekilecektir. Dolayısıyla yanlış tetikleme merminin hızlanmasını engelleyecek veya durduracaktır. Bu yüzden tetikleme zamanları önemlidir. Her tetiklenen bobinle merminin hızlanması sağlanmalıdır (Harmankaya ve Çelik, 2013).

Kullanılan kondansatörün şarjı esnasında dönüştürücü aşırı akım çekeceğinden ve bu akımı da dönüştürücü sağlayamayacağından araya direnç eklemek gerekir. Eklenen bu direnç akımı sınırlandırmamızı ve şarj süresini de kontrol altına almamızı sağlar. Bu sebeple kullandığımız direnç şarj olma süresini minimum değerde tutmamızı sağlamalı ve dönüştürücünün verebileceği akımı geçmemelidir (Harmankaya ve Çelik, 2013).

### **3.2.5 Kapasitör etkisi**

Kapasitörde gerilim ile kapasite arasındaki bağıntı:  $Q=C \times U$  'dir.

Q: Elektrik yükü (Coloumb)

C: Kapasite (Farad)

U: Voltaj (Volt)

Yüksek gerilim değerlerine uygun kapasite seçimi yapılmalıdır. Çünkü çok yüksek gerilim değerlerinde manyetik doyuma gidilir. Bir de LC devrelerinde rezonans frekansına dikkat etmek gerekir (Harmankaya ve Çelik, 2013).

### 3.2.6 İndüktans etkisi

Denklem 3.1 LC devreleri için kullanılır. Buna göre enerjinin aktarım hızını hesaplayabiliriz. Rezonans frekansını küçültmek için L veya C den birini ya da her ikisini de artırmamız gerekir (Harmankaya ve Çelik, 2013).

$$Rf = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Bobin silahında L değeri sabittir fakat merminin yönü manyetik alanın da yönünü etkilediği için indüktans da değişir (Harmankaya ve Çelik, 2013).

Ayrıca L endüktans değerini etkileyen diğer faktörler de bobinin sarım sayısı, bobin sarımında kullanılan telin kesiti, sarımların sık ya da seyrek olmasıdır. Tüm bunların fazla olması L endüktans değerini artırır (Harmankaya ve Çelik, 2013).

Sarımda kullanılan nüvenin manyetik özellikte olması durumunda manyetik alan azalır (Harmankaya ve Çelik, 2013).



#### **4. VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ**

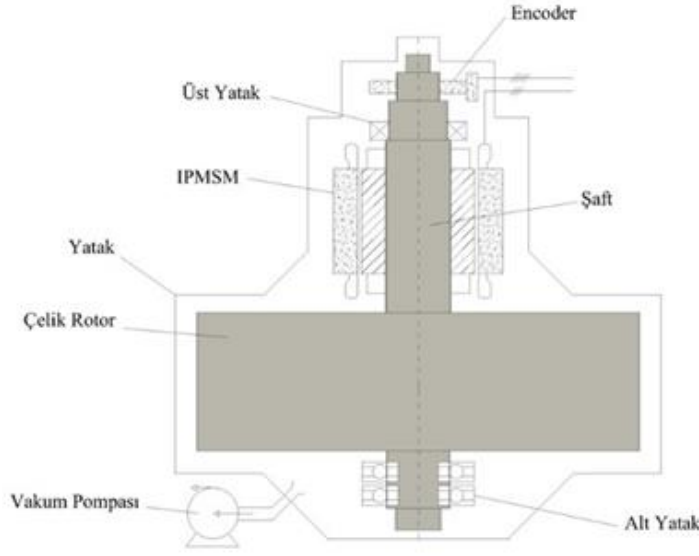
Günümüzde artan nüfus, ekonomik yönden hızlı ilerleme, kentleşme ve endüstriyel olarak ilerlemelerin sonucunda enerjiye olan ihtiyaçlar sürekli olarak artış göstermektedir. Buna bağlı olarak enerji tüketimi de artmaktadır.

Dünyada enerjiye olan ihtiyaçların %80'i fosil yakıtlardan (petrol,kömür,v.b) karşılanmaktadır. Fosil yakıtların yakılması sonucunda çevreye birçok zararlı gazlar salınmaktadır. Bu durum atmosferdeki karbondioksit oranının artmasına ve sera etkisinin oluşmasına yol açmaktadır. Bunun sonucunda da atmosferdeki ortam sıcaklığı artarak küresel ısınma ve iklim değişiklikleri meydana gelmektedir. Fosil yakıtlardan kaynaklanan bu tip çevresel sorunlar ve bu yakıtlardaki azalan dünya rezervleri sonucunda yeni ve temiz enerji kaynaklarının arayışına gidilmiştir (Sarı,2006).

Enerjinin elde edilmesi kadar depolanması da önemli bir konu haline gelmiştir. Bu sebeple birçok enerji depolama sistemi geliştirilmiştir. Volanlı enerji depolama sistemleri de bu yöntemlerden birisidir. Düşük maliyetleri, yüksek güçlü ve uzun ömürlü olmaları sebebiyle tercih edilmektedirler (Sarı,2006).

##### **4.1 Volan**

Volanlar, bir eksen etrafında dönerek mekanik olarak enerji depolayabilen sistemlerdir. NASA'nın 1961 yılında yayınladığı rapor sonrasında uzay uygulamalarında ve daha birçok farklı uygulamalarda volanlar kullanılmaya başlamıştır. Volanı harekete geçirmek ve döndürebilmek için bir enerjiye ihtiyaç duyulur. Volan dönmeye başladığında dönüş hızı ve ataletine bağlı olarak kinetik enerji depolamaya başlar. Volanın dönüş hızı ne kadar fazlaysa o kadar çok miktarda enerji depolayabilir. Depolanan kinetik enerji volanın istenildiği zaman yavaşlatılmasıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Erdinç ve diğ, 2011).



**Şekil 4.1 :** Volanlı enerji depolama sistemi genel yapısı (Zhou ve Qi, 2009).

Şekil 4.1’de genel yapısı görülen volanlı enerji depolama sistemleri düşük (6000 rpm’den küçük) veya yüksek (50000 rpm’e kadar) hızlarda üretilebilirler. Düşük hızlı VEDS’lerde 5 Wh/kg civarında enerji yoğunluğuna ulaşılırken yüksek hızlı VEDS’lerde 100 Wh/kg’lık yoğunluğa ulaşılabilir. VEDS’ler dakikalar içinde hızlanabilirler ve bu özellikleri sayesinde kimyasal bataryaların saatler süren şarj sürelerine karşın daha avantajlı hale gelirler. Diğer avantajları ise 105’den 107’ye kadar olan uzun çevrim ömürleri ve yüksek şarj-deşarj hızına sahip olmalarıdır. Mekanik olarak ise volanların ömrü 20 yıl olarak kabul edilmektedir. Ayrıca yukarıda da belirtildiği üzere yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları da bir diğer avantajdır. Volanların nominal güçteki verimleri %90 lara ulaşmaktadır. Ayrıca hızlı cevap verme özellikleri sayesinde şebeke gerilimlerin dalgalanmasını gidermek amacıyla da kullanılırlar. VEDS’lerin en büyük dezavantajı ise yüksek maliyetleri ve boştaki kayıplarının fazla olmasıdır. Volanların bu kayıpları saatte %20’lere kadar çıkabilir. Bu durumda volanın enerji verimliliği büyük oranda düşer. Bu sebeple uzun süreli enerji depolanmasında kullanılmazlar. Daha çok kısa süreli enerji depolanması gereken güç sistemlerinde tercih edilirler (Erdinç ve diğ, 2011).

VEDS’de volanda kullanılan malzeme maksimum hızda belirleyici bir etken oluşturur. Yüksek hızlarda volanda büyük merkezkaç kuvvetleri oluşur. Bu nedenle bu kuvvetlere dayanacak malzemenin sertlik derecesi de yüksek olmalıdır. Bu yüzden özellikle yüksek hızlı volanlarda karbon elyaf içerikli kompozit malzemeler kullanılır.

Birim hacim ve birim ağırlık için maksimum enerji miktarı formül 4.1 ve formül 4.2’de verilmiştir.

$$e_v = K\sigma_{\theta,u} \quad (4.1)$$

$$e_m = K \frac{\sigma_{\theta,u}}{\rho} \quad (4.2)$$

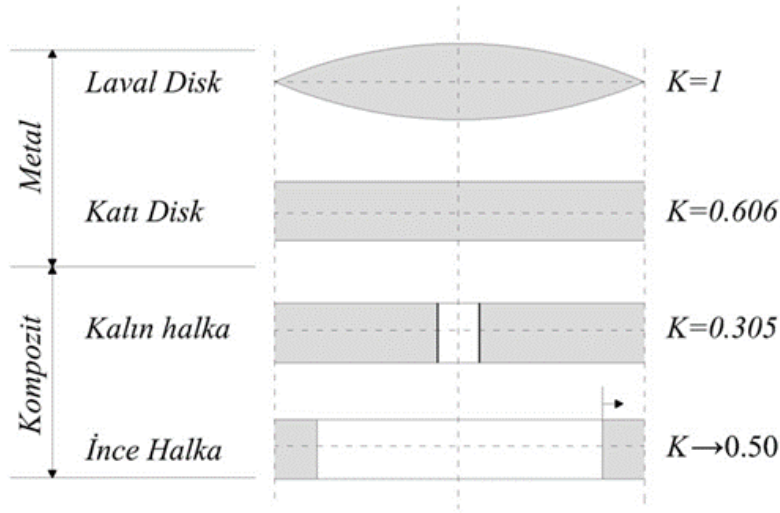
Formül 4.1 ve formül 4.2’de verilen  $\sigma_{\theta,u}$ ,  $\rho$  ve K sırasıyla gerilme direnci, özgül ağırlık ve şekil faktörü olarak sıralayabiliriz. Farklı malzemeler için bu sabitler çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1** : Farklı malzemeler için katsayılar (Pena Alzola,2011).

Malzeme	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{\theta,u}$ [MPa]	$e_v$ [MJ/m <sup>3</sup> ]	$e_m$ [kJ/kg]
Alüminyum	2700	500	251	93
Çelik	7800	800	399	51
Cam Elyaf/Epoxy	2000	1000	500	250
Grafit HM/Epoksi	1580	750	374	237
Grafit HS/Epoxy	1600	1500	752	470

Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi özgül ağırlığı en yüksek çeliğin olmasına karşın kg başına ürettiği enerji miktarı en düşük çelik malzemenindir. Hacim başına üretilen enerji miktarlarına bakıldığında ise en düşük alüminyum malzeme olmakla birlikte en yüksek grafit HS/epoksi içerikli malzemenin olduğu görülmektedir. Burada gerilme direncinin hacim başına üretilen enerji miktarında önemli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte özgül ağırlığı düşük malzeme kullanmak ta hem düşük hızlı VEDS için hem de yüksek hızlı VEDS’ler için önemlidir. Özellikle manyetik rulmanlar kullanılacaksa mutlaka özgül ağırlığın en düşük olduğu malzeme seçilmelidir.

Formül 4.1 ve formül 4.2’deki “K” katsayısı şekil katsayısı olarak tanımlanmıştır. Farklı şekillerde K katsayısının değişimi şekil 4.2’de verilmiştir. “K” katsayısı ne kadar büyük olursa depolanan enerji o miktarda artmaktadır. En düşük K katsayısı kalın halkanıdır (K=0,305). Ondan sonra sırasıyla ince halka, katı disk ve laval disk gelmektedir. Bunların katsayıları ise sırasıyla 0,50 – 0,606 ve 1’dir.



**Şekil 4.2 :** Farklı volan şekilleri (Pena Alzola,2011).

Volanlı sistemleri diğer enerji depolama sistemleri ile karşılaştıracak olursak aşağıdaki çizelge 4.2'yi elde ederiz.

**Çizelge 4.2 :** Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması (Yılmaz,2011).

	Bakım İhtiyacı	Çevreyi Kirletir mi?	Tehlikeli mi?	Verim	Ömür	Maliyet
Akü	Dönemsel	Evet	Evet	Yüksek	Kısa	Yüksek
Yakıt Pili	Az	Hayır	Evet	Düşük	Uzun	Yüksek
Volan	Yok	Hayır	Hayır	Yüksek	Uzun	Yüksek
Ultra Kapasitör	Az	Hayır	Hayır	Yüksek	Uzun	Yüksek

Volanlı enerji depolama sistemlerinin en önemli uygulamalarından biri de uzay uygulamalarıdır. Uzay boşluğunda uydu sistemlerinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için uzun çevrim ömrüne sahip enerji depolama sistemlerine ihtiyaç vardır. Bunun için Amerika Birleşik Devletlerinin Uzay araştırma birimi NASA'nın da bu alanda yaptığı önemli çalışmalar vardır. Bu çalışmalardan birinde volanların  $N_2H_4$  bataryalara göre deşarj derinliği, enerji yoğunluğu ve görev ömrü açısından üstünlükleri ortaya konmuştur. Aşağıda çizelge 4.3'de  $N_2H_4$  batarya ile volanlı enerji depolama sisteminin karşılaştırılması verilmiştir (Aydın, 2010).

**Çizelge 4.3 :** NiH<sub>2</sub> batarya ile volanlı enerji depolama sisteminin karşılaştırılması.

	NiH <sub>2</sub> Elektrokimyasal Batarya	NASA'nın Volanlı Enerji Depolama Sistemi
Deşarj Derinliği (%)	35	89
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	10	27
Maksimum Güç (kW)	~ 5,5	5,5
Enerji Kapasitesi (kWh)	4,6	5,5
Döngü Verimi (%)	65	83
Görev Ömrü (yıl)	5	15

#### 4.2 Volanın Enerji Denklemine Çıkartılması

Tasarımda 1000d/dk ile 3000d/dk aralığında deşarj olması durumu gözetilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle volanın depolayabileceği maksimum enerji değeri formül 4.3'den hesaplanır. Formül 4.3'de Em, J ve w sırasıyla maksimum enerji, eylemsizlik momenti ve açısal hızdır. Formül 4.3 bize volanın üzerinde depolayabildiği maksimum enerjiyi verir.

$$Em = \frac{1}{2}Jw^2 \quad (4.3)$$

Em: Volanda depolanan maksimum enerji (joule)

J : Eylemsizlik momenti (kg.m<sup>2</sup>)

w : Volanın açısal hızı (rad/sn)

Formül 4.3 bize maksimum enerjiyi verdiği gibi bunun tamamını enerjiye çeviremeyiz. Belirli bir aralıkta çalışması gerekir. Bu aralık değeri deşarj derinliği olarak ifade edilir. Bunun için de formül 4.4 kullanılır.

$$Enet = \frac{1}{2}J(w_{mak}^2 - w_{min}^2) \quad (4.4)$$

Enet : Elde edilebilecek net enerji miktarı (joule)

wmin : Volanın minimum hızı (rad/sn)

wmak : Volanın maksimum hızı (rad/sn)



Dolayısıyla formül 4.4'e göre minimum ve maksimum hız arasındaki enerji geri dönüşebilir. Depolanan etkin enerjinin net enerjiye oranı bize sistemin verimini verir.

$$E_{etkin} = \eta \frac{1}{2} J (w_{mak}^2 - w_{min}^2) = \eta E_{net} \quad (4.5)$$

Formül 4.5 bize depolanması gereken enerji ile elde ettiğimiz etkin enerji arasındaki verimi verir. Eğer motor alternatör modu için verimi biliyorsak Eetkin kolaylıkla hesaplanabilir. Fakat değişken yük altında enerji eşitliklerinden gitmek gerekir. Bunun için en temel formül elektromekanik moment ifadesidir. Motor çalışma durumu için moment ifadesi formül 4.6'da verilmiştir (Aydın, 2010).

$$T_{em} = J \frac{dw}{dt} + Bw + T_L \quad (4.6)$$

Tem : Elektromanyetik moment (Nm)

J: Eylemsizlik momenti (kgm<sup>2</sup>)

B: Sürtünme katsayısı (Nms)

w : Açısal hız (rad/sn)

T<sub>L</sub> : Mekanik yük (Nm)

Motor çalışma durumunda Tem motora uygulanan gerilim sonucu üretilen moment değeridir. Alternatör çalışma durumunda ise girişe uygulanan moment ifadesi olduğu için hem elektriksel yükü hem de elektriksel kayıpları karşılar. Bu durumda elektromekanik moment ifadesi ise formül 4.7'de verilmiştir (Aydın, 2010).

$$J \frac{dw}{dt} = T_{em} + Bw + T_L \quad (4.7)$$

Her bir moment bileşeni için açısal hız ile çarpımı bize gücü verir. Elde edilen gücün integrali alınırsa bu da bize enerjiyi verir. Bu durumda toplam enerjiyi formül 4.8'den elde edebiliriz.

$$E_{toplam} = \frac{1}{2} J w^2 \quad (4.8)$$

Elektromanyetik moment ilişkisini kullanarak elde edilen enerji bileşeni ( $E_e$ ) elektriksel kayıplar ve elektriksel yük için harcanan enerjiyi ifade etmektedir. Formül 4.9'da verilmiştir.

$$E_e = \int T_{em} \omega dt \quad (4.9)$$

Mekanik yükü karşılayan moment ifadesinin güce dönüştürülmesiyle elde edilen ifadenin integrali bize mekanik yükü karşılayan enerjiyi verir. Formül 4.10'da verilmiştir.

$$E_m = \int T_L \omega dt \quad (4.10)$$

Son olarak ta sürtünmeyi karşılayan enerji de formül 4.11'de verilmiştir.

$$E_{srt} = \int (B\omega) \omega dt = \int B\omega^2 dt \quad (4.11)$$

Sonuç olarak formülleri düzenlersek formül 4.12'yi elde ederiz.

$$\eta = \frac{E_e}{E_{net}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T_{em} \omega dt}{\frac{1}{2} J (\omega_{maks}^2 - \omega_{min}^2)} \quad (4.12)$$

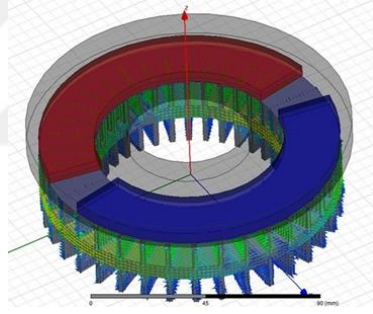


## 5. TASARIMIN MANYETİK ANALİZİ

Tasarımın manyetik analizleri ANSYS firmasının Maxwell 3d programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 5.1 2P=2 Kutuplu EASM Motorun Manyetik Analizi

Manyetik analizler için öncelikle 2P=2 kutuplu olan EASM motor modeli alınarak başlanmıştır. Ele alınan 3d EASM makine katı modeli Maxwell programında tekrar oluşturulmuştur. Şekil 5.1’de 3d katı modelinin Maxwell programında oluşturulmuş hali verilmiştir.



Şekil 5.1 : VEDS Maxwell’de modellenmesi.

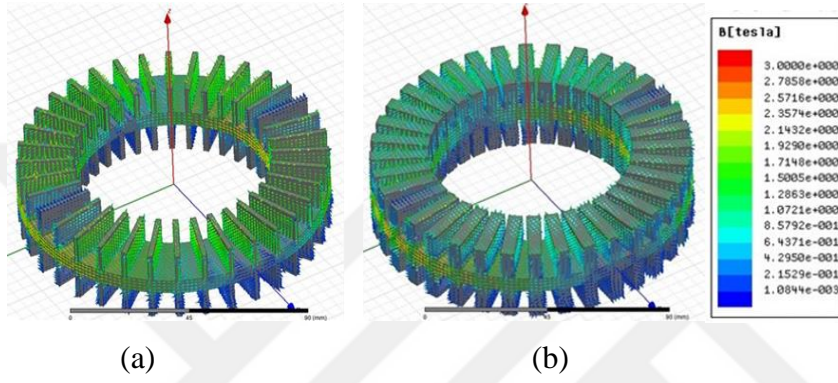
Şekil 5.1’de verilen tasarımda ayak genişliği gibi birçok parametre değişken olarak tanımlanmıştır. Bundaki amaç tüm bu parametreler için manyetik analiz sonuçlarını elde ederek nihai modele ulaşmaktır. Dolayısıyla değişken parametreler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Maxwell programında değişken parametreler.

Ag (mm)	Ayak genişlik
Ah (mm)	Ayak yükseklik
Sg (mm)	Sargı genişliği
Bh (mm)	Boyunduruk yükseklik
Md (derece)	Mıknatıs açısı
Airg (mm)	Hava aralığı
Mh (mm)	Mıknatıs yükseklik
Mgh (mm)	Mıknatıs gömülü olmayan kısım yüksekliği

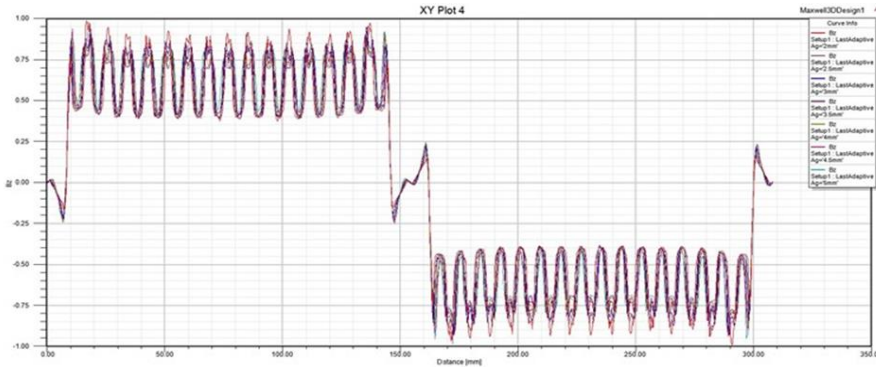
### 5.1.1 Ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi

İlk tasarım parametresi ayak genişliği “Ag” 2mm ile 5mm arasında 0,5mm aralıklarla değerler alınmıştır. Hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu hesaplatılmıştır. Ayak genişliğinin artması ayak kenarlarındaki manyetik akı yoğunluğunu azaltmak ile beraber fiziksel olarak sipir sayısını sınırladığı için optimum değeri seçmek gerekir.



Şekil 5.2 : VEDS a) Ag=2mm b)Ag=5mm durumu için.

Şekil 5.3’de ise hava aralığında bir kontur boyunca manyetik akının değişimi verilmiştir. Elektrik makinelerinde en önemli parametrelerden biri de hava aralığı manyetik akısıdır. Düzgün bir hava aralığı manyetik akısı vuruntu momentini azaltır. O yüzden ayak genişliği arttıkça eğrinin orta noktasındaki inişler ile maksimum noktalar arasındaki fark azalmaktadır. Bununla birlikte ayak genişliğinin artması hava aralığı relüktansının değişimini azaltacağı için de vuruntu momentinin azalması beklenmektedir.



Şekil 5.3 : VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi.

Aşağıdaki Çizelge 5.2’de 2mm ile 5mm arasındaki manyetik akı yoğunluğu farkının 2mm ayak genişliğine göre değişimi %6,88 oranında artı yöndedir. 2mm ile 3mm arasındaki değişim oranı ise 2mm’ye göre %2,49 oranında pozitif yöndedir.

**Çizelge 5.2 :** Oluk ayak genişliğinin ortalama manyetik akıya etkisi.

Ag (mm)	B (Tesla)
2	<b>0,493343435418607</b>
2,5	<b>0,500707120413448</b>
3	<b>0,505644830205482</b>
3,5	0,511096616750761
4	0,516142819608892
4,5	0,521457437379205
5	0,527288831673664

Tasarımda yay uzunlukları açısından inceleme yaptığımızda en kısa kenar olan iç çapa göre hesaplama yapmalıyız. İç çemberin yarı çapı 38mm ve buna bağlı olan uzunluk formül 5.1’e göre 238,64mm’dir. Toplam 36 ayak olduğuna göre her bir ayak uzunluğu ile ayak sayısının çarpımı bize iç çemberin toplam ayak uzunluğunu verir. Bu sayıyı iç çember uzunluğuna oranlarsak toroid nüvenin en kısa kenarındaki ayak uzunluğunun çember uzunluğuna oranını buluruz. Bu da bize iki konu hakkında fikir verir. Birincisi oluklara sığdırabileceğiniz sarım sayısı, ikincisi ise ayak genişliğinin artmasıyla reaktans değerinin artmasıdır. Manyetik analiz sonucu ayak genişliğine bağlı olarak bulduğumuz manyetik akı yoğunluğunun yanı sıra toplam ayak genişliğinin iç çevre uzunluğuna oranı Çizelge 5.3’de verilmiştir.

$$Y_u = 2 * \pi * r = 2 * 3,14 * 38 = 238,64 \text{ mm} \quad (5.1)$$

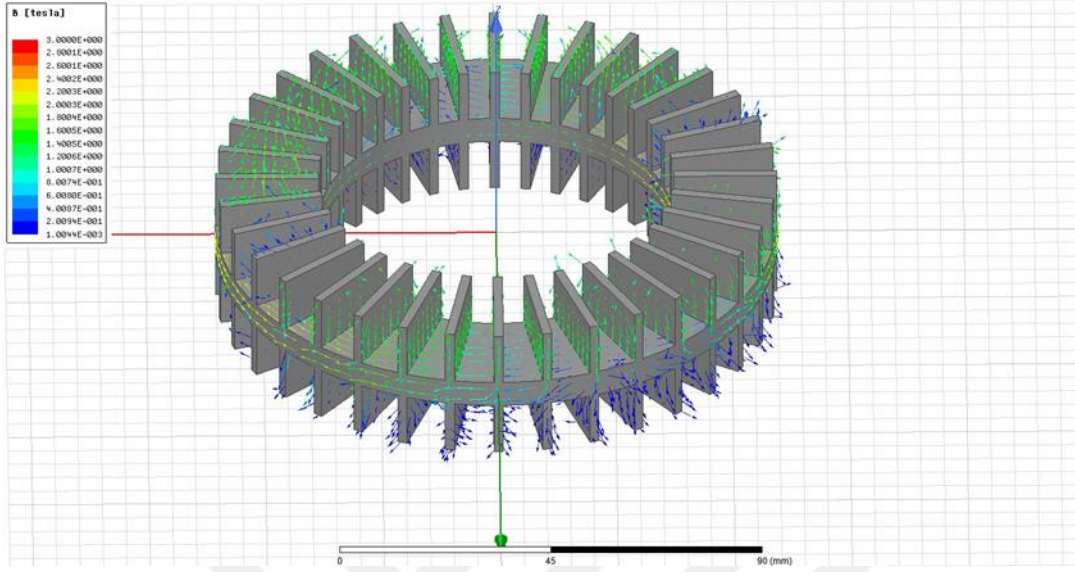
**Çizelge 5.3 :** Ayak genişliği ile çevre uzunluğu oranı.

Ag (mm)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
TAg (mm)	36	54	<b>72</b>	<b>90</b>	<b>108</b>	126	144	162	180
TAg/Çu	0,151	0,226	<b>0,302</b>	<b>0,377</b>	<b>0,453</b>	0,528	0,604	0,679	0,754

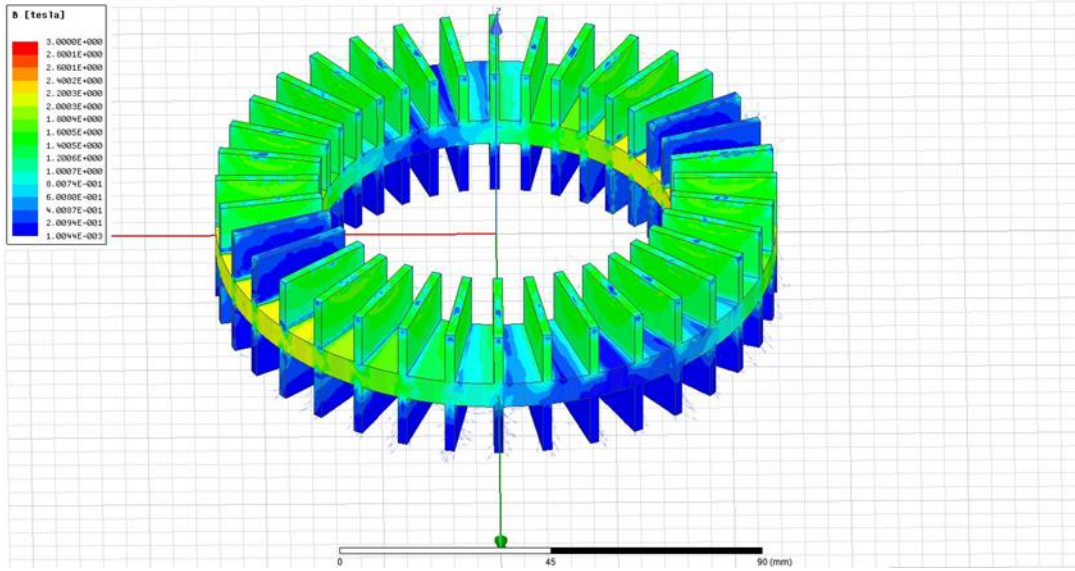
### 5.1.2 Ayak genişliğinin etkisi

Çizelge 5.3’de verilen değerler incelendiğinde ayak genişliğinin toplam çevre uzunluğuna oranı 0,35 değeri için en yakın ayak genişliği değerleri sırasıyla 2, 2.5 ve 3mm değerleridir. Bu değerler için manyetik akı yoğunluklarını incelemek faydalıdır.

Şekil 5.4.a ve b’de ayak genişliği ( $A_g$ ) 2 mm için sırayla stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı vektörel ve yoğunluk olarak verilmiştir.



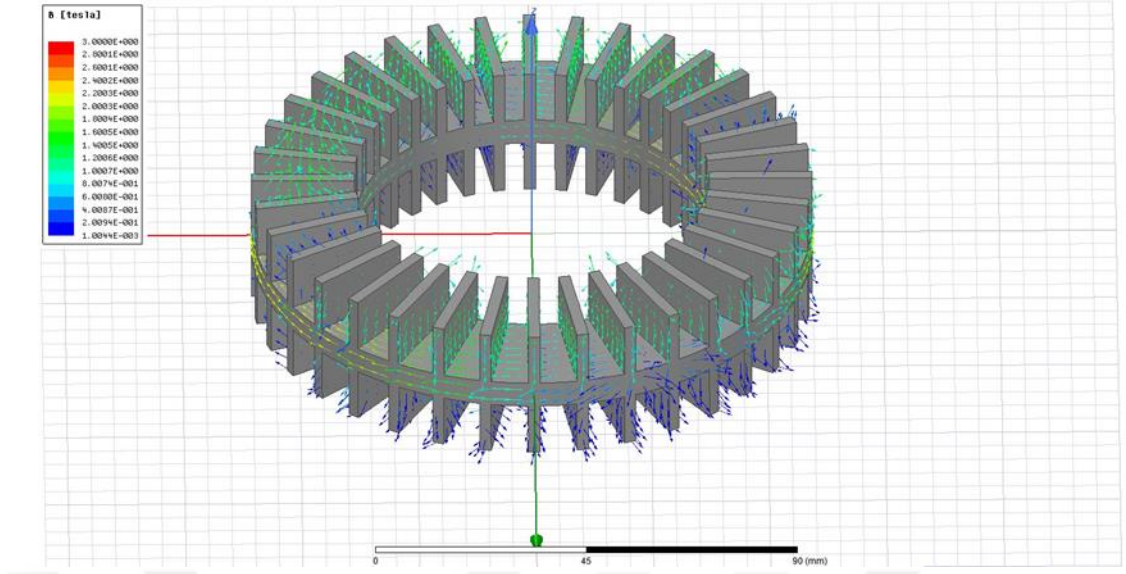
(a)



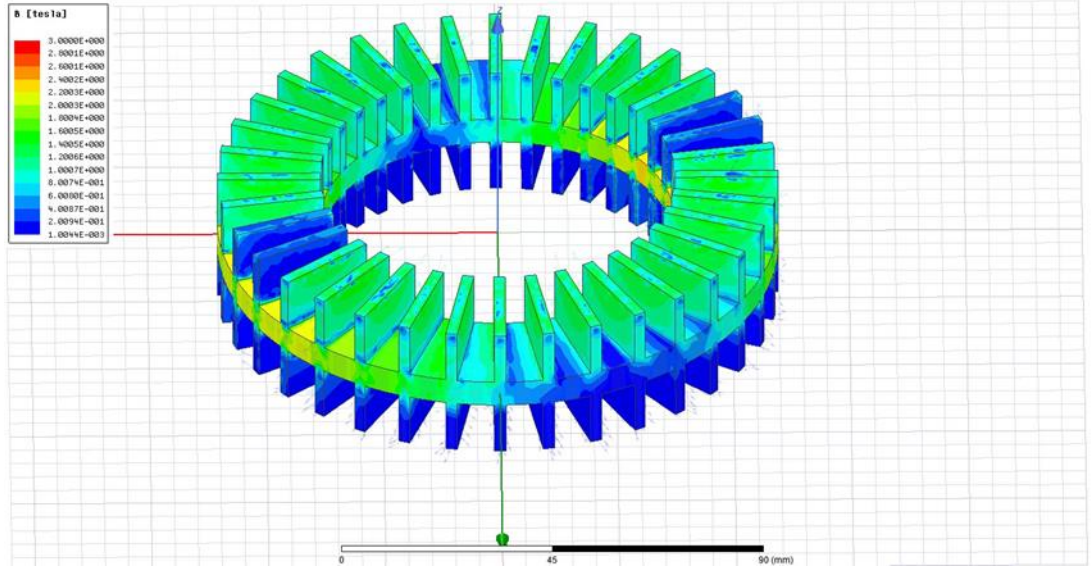
(b)

**Şekil 5.4 :** Stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu ( $A_{g2}$ ) için  
a) Vektörel b) Yoğunluk.

Şekil 5.5.a ve b’de ayak genişliği ( $A_g$ ) 2.5 mm için sırayla stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı vektörel ve yoğunluk olarak verilmiştir.



(a)

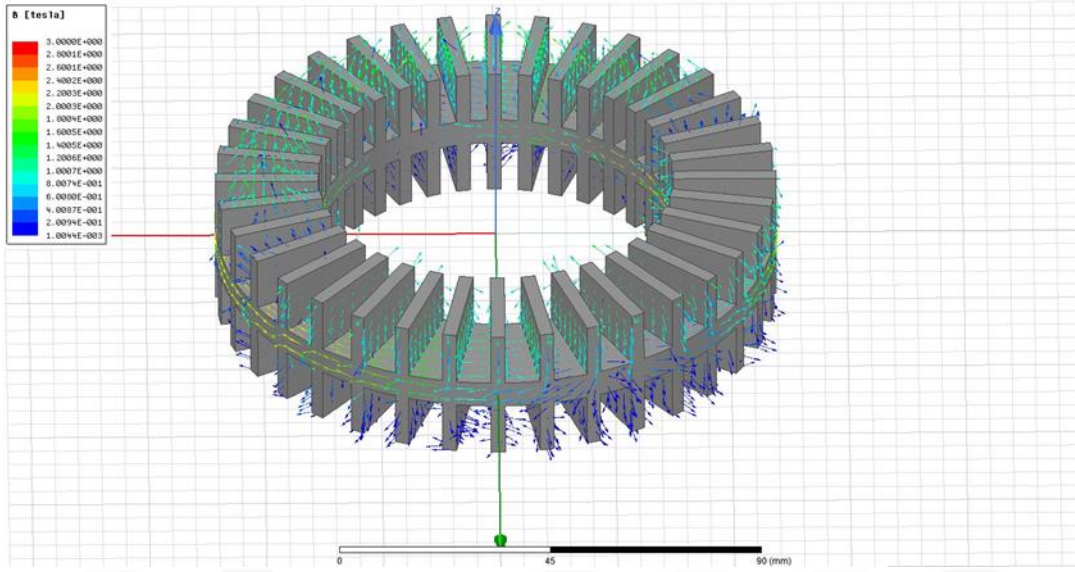


(b)

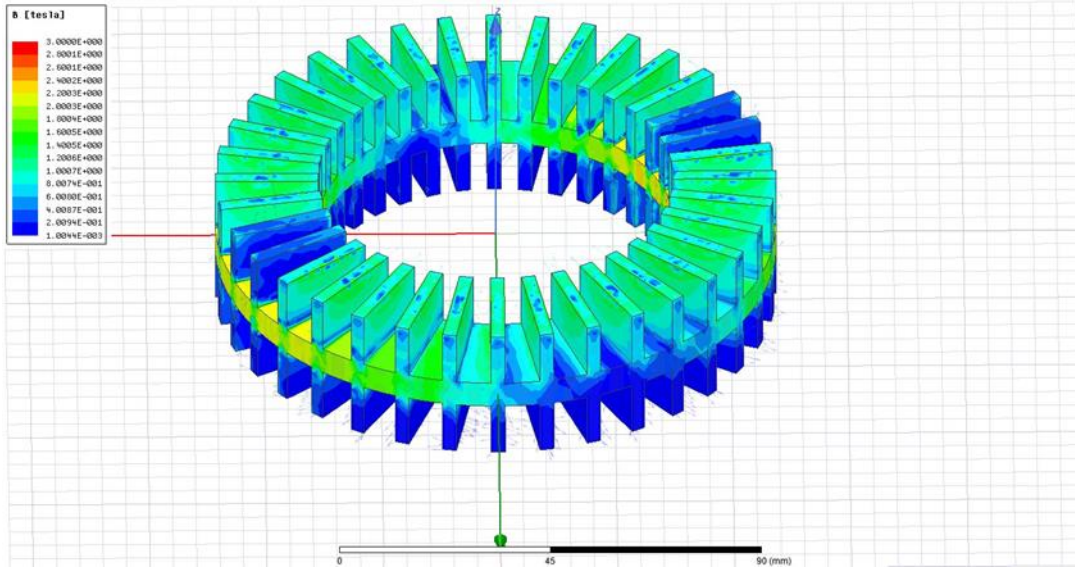
**Şekil 5.5 :** Stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu ( $A_{\text{irg}}=2.5$  mm için)  
a) Vektörel b) Yoğunluk.

Şekil 5.6.a ve b'de ayak genişliği ( $A_g$ ) 3 mm için sırayla stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımını vektörel ve yoğunluk olarak verilmiştir.





(a)



(b)

**Şekil 5.6 :** Stator yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu (Airg=3 mm için)  
a) Vektörel b) Yoğunluk.

Şekil 5.4-5.6'da verilen şekillerdeki değişken parametreler Ah, Sg, Bh, Md, Airg, Mh, Mgh ve ro sırasıyla 12 mm, 4 mm, 3 mm, 10 derece, 1.5 mm, 5 mm, 2 mm, 25 derece olarak verilmiştir.

Şekil 5.4-5.6'da Ag'nin 2, 2.5 ve 3mm değerleri için manyetik akı yoğunluğu değerleri verilmiştir. Hava aralığındaki yüzey boyunca manyetik akı yoğunluğu değerleri program aracılığı ile hesaplatılırsa çizelge 5.4'deki değerleri elde ederiz. Çizelge 5.4'de verilen değerler incelendiğinde ayak genişliğinin artması manyetik akı değerini %2,37 oranı kadar arttırmaktadır. Bununla birlikte çizelge 5.3'de verildiği gibi toplam

ayak genişliğinin toplam çevre uzunluğuna oranının 0,35 civarında olması idealdir. Bu değer 1'e doğru yaklaşması oluk genişliğini küçültmekte ve oluğun alabileceği sarım sayısını küçültmektedir. Dolayısıyla bobinin amper-sarım sayısı düştüğü için yeteri kadar manyetik alan şiddeti oluşturulamamaktadır.

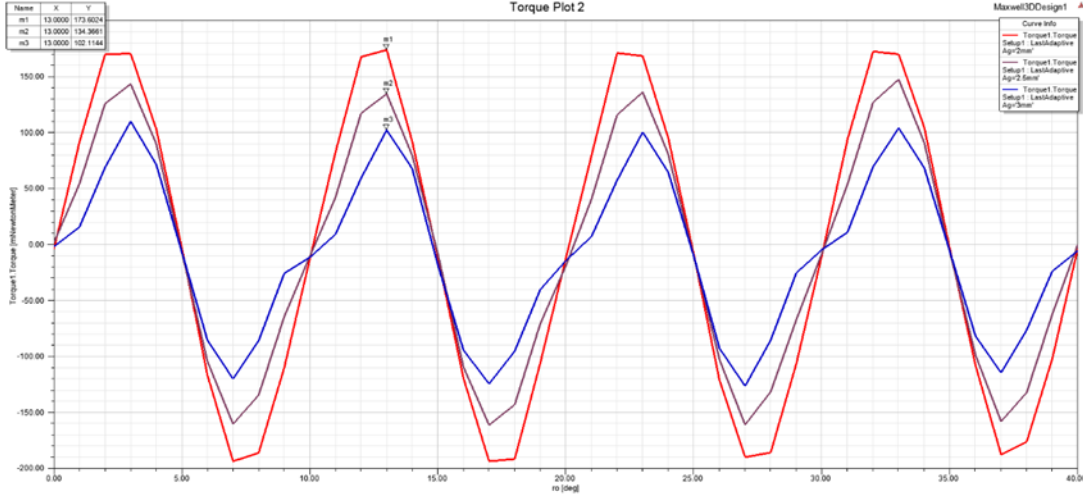
Şekil 5.6.b'de görüldüğü gibi  $A_g=3\text{mm}$  değeri için stator yüzeyinde 0,8 Tesla değerinde akı yoğunluğu değeri vardır. Dolayısıyla oluk kenarlarında doyumun olmadığını ve hava aralığı akısının değerinin de çizelge 5.4'den 0,47 Tesla değerinde olmasının tasarım için yeterli olduğunu söyleyebiliriz.

**Çizelge 5.4 :** Ayak genişliğinin hava aralığındaki yüzey boyunca ortalama manyetik akı yoğunluğu değerleri.

Ag	Hava aralığı Bort
2	0,459359191551696
2,5	0,465311716367403
3	0,470262840627246

### 5.1.3 Ayak genişliğinin vurutu momenti üzerine etkisi

Ayak genişliğinin artması nüve üzerindeki manyetik relüktansı değiştireceği için vurutu momenti değerini de etkileyecektir. Bunun için ayak genişliğinin farklı değerleri için vurutu momenti değerleri ANSYS 3d Maxwell ile elde edilmiştir. Bunun için  $A_g$ 'nin 2, 2.5, 3 mm değerleri için Şekil 5.7'de verilen analiz sonuçları elde edilmiştir. ANSYS 3d Maxwell'de "optimetrics" analiz ile her değişken için 1'er derece rotorun döndürülmesi ile değerler elde edilmiştir. Analizin yapıldığı bilgisayarın işlem kapasitesi düşünülerek her ayak genişliği için analizler ayrı ayrı yapılmıştır. İkinci aşamada elde edilen değerler Şekil 5.7'de gösterildiği gibi birlikte verilmiştir.



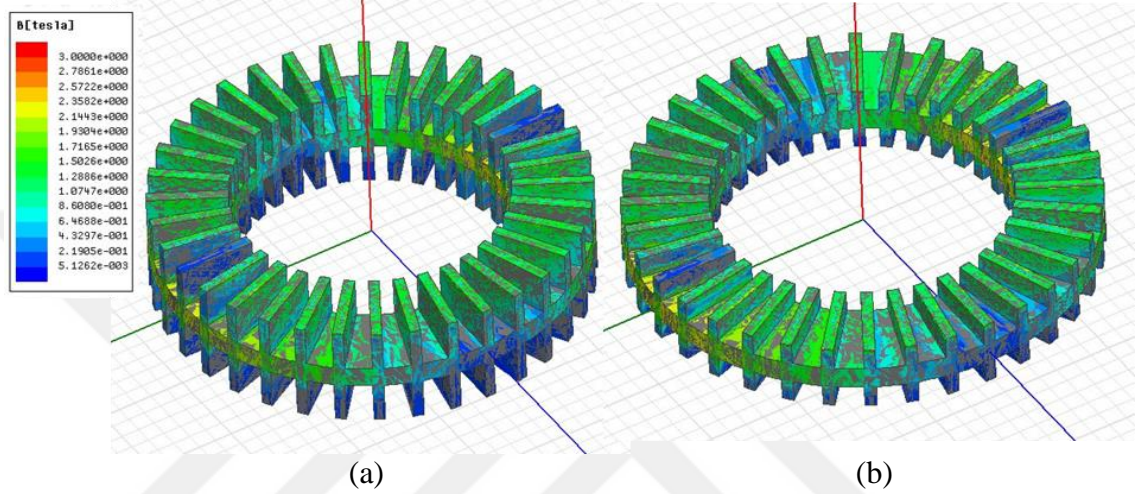
Şekil 5.7 : Ayak genişliğinin vurutu momenti üzerine etkisi.

Şekil 5.7’de alınan değerler incelendiğinde Ag’nin değişimine bağlı olarak elde edilen vurutu momenti Ag 2, 2.5 ve 3 mm için sırasıyla 173.6024, 134.3661 ve 102.1144 mNm olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Ag’nin artması hava aralığı relüktansı değişimini azaltacağı için mıknatıs ve oluk kenarlarının arasındaki etkileşim de azalacaktır. Bu da vurutu momentini azaltacaktır. Ag’ye bağlı olarak vurutu momentinin yüzdesel değişimine bakıldığında ise Ag=2.5mm ve 3mm yapıldığında vurutu momenti sırasıyla %22.6 ve %41.1 oranında azalmaktadır.

Şekil 5.7’de alınan değerleri elde etmek için her bir ayak genişliği (Ag) değerinden ANSYS Maxwell ile 41 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Özellikle işlem kapasitesi düşük bilgisayarlar ile bu işlemlerin gerçekleştirilmesi çok uzun zaman almaktadır. Örneğin analizlerin gerçekleştirildiği bilgisayarın ram kapasitesi 32 GB, işlemcisi i7-4790 CPU Ekran kartı 4Gb GeForce GTX 700’dur. Bir açı için hesaplama başlangıç zamanı 19:52:15, bitiş zamanı ise 8:17:43’tür. Dolayısıyla yaklaşık 25 dakikalık bir sürede tek bir analiz gerçekleştirilmektedir. Bir Ag değeri için 41 analiz gerektiğine göre yaklaşık gereken süre 41x25 yaklaşık 17 saattir. 3 Ag değeri için bu süre hesaplamaların yapıldığı bilgisayarda 51 saate denk gelmektedir. Ayrıca hesaplamalar yapılırken bir çok kerede bilgisayar işlemci kapasitesinden dolayı bilgisayarın kilitlenip tekrar başlaması da bu hesaba katılmamıştır. Bu açıdan ANSYS 3d Maxwell programını çok değişkenli işlemlerde mutlaka iş istasyonları üzerinde çalıştırmak veya taguchi, genetik gibi farklı optimizasyon yöntemlerini kullanmak faydalı olacaktır.

#### 5.1.4 Ayak yüksekliği “Ah” ve ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi

Ayak yüksekliğinin değişimi şekil 5.8’de verilmiştir. Ayak yüksekliğinin değişimi hava aralığının ortalama manyetik akısının değişimini etkilemekle beraber sarımın sipir sayısını ve vuru mu momentini de etkiler. Bundan dolayı en uygun değeri belirlerken sadece ortalama manyetik akı değerine bakmak yetersiz kalır. Bununla birlikte ayak genişliği için de aynı şeyler söylenebilir.



Şekil 5.8 : Ayak yüksekliği “Ah” ve Ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi  
a) Ah=12mm, Ag=2,5mm b) Ah=6mm Ag=3mm.

Ayak genişliği ve ayak yüksekliği için ortalama manyetik akının değişimine olan etkileri Çizelge 5.5’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere ayak genişliği ve ayak yüksekliğine paralel olarak hava aralığı akısındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu artmaktadır. Bununla birlikte Ah’ın çok yüksek değerde seçilmesi vuru mu momentini de kötü yönde etkileyecektir. Ayrıca ayak genişliği değerinin de çok büyük seçilmesi sipir sayısını etkilemekle beraber kaçak reaktans değerini artırarak yüksek gerilim düşümlerine neden olacaktır.

Çizelge 5.5 : Ah ve Ag değişiminin ortalama manyetik akıya etkisi.

Ah/Ag	2	2,5	3
6	0.476805911630823	0.482996981577993	0.486870694742408
7	0.479536325072441	0.486076442244088	0.490664981644421
8	0.483086291339301	0.488956461037918	0.493662473067378
9	0.486008078701076	0.492647763051445	0.496768360249974
10	0.488270793360693	0.495217457637029	<b>0.50072463986045</b>
11	0.491136167678831	0.498078551552848	<b>0.503028080197664</b>
12	0.493343435418607	<b>0.500707120413448</b>	<b>0.505644830205482</b>



Çizelge 5.6 : Ag=2,5mm bağı olarak Md ve Mh değişimi.

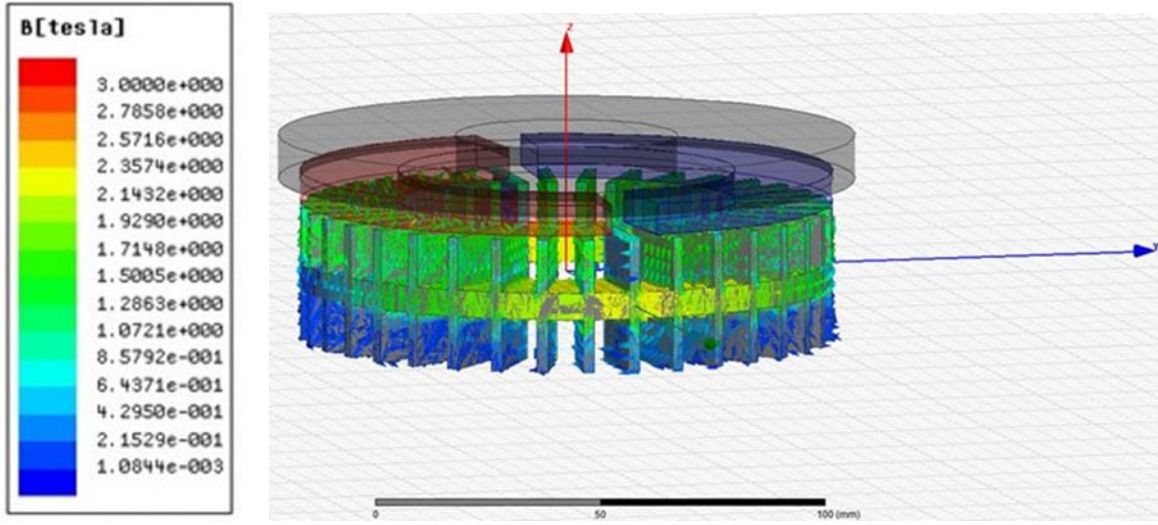
Md(Derece) Mh(mm)	0	5	10	15
5	<b><u>0.55516069788</u></b>	0.52720670658	0.50070712041	0.47959604486
6	<b><u>0.58441295558</u></b>	<b><u>0.55472270509</u></b>	0.52713702277	0.50420682962
7	<b><u>0.60245333315</u></b>	<b><u>0.57370281002</u></b>	0.54611388019	0.52186496216
8	<b><u>0.60689002039</u></b>	<b><u>0.57807147841</u></b>	<b><u>0.55048743481</u></b>	0.52611268868
9	0.59326175179	0.56589992212	0.53822242934	0.51401387534
10	0.56520645940	0.53967837550	0.51435810021	0.49169886061

Çizelge 5.7 : Ag=3mm bağı olarak Md ve Mh değişimi.

Md(Derece) Mh(mm)	0	5	10	15
5	<b><u>0.56212435398</u></b>	0.53189872584	0.50564483020	0.48411782315
6	<b><u>0.59069326241</u></b>	<b><u>0.56037290162</u></b>	0.53212614321	0.50829326580
7	<b><u>0.60702834227</u></b>	<b><u>0.57773869852</u></b>	0.54996560817	0.52660497396
8	<b><u>0.61106982073</u></b>	<b><u>0.58270454355</u></b>	<b><u>0.55443006297</u></b>	0.52958080469
9	0.59813166606	0.56935763273	0.54249731287	0.51709662298
10	0.56829801037	0.54330915346	0.51870722216	0.49383924530

### 5.1.6 Mıknatısların yüzeyde kalan yüksekliklerinin analizi

Tasarımda değerlendirilen diğer bir parametre mıknatısların ne kadar gömülü olacağıdır. Bunun için programda her bir mm için yüzeye çıkarılan mıknatısların manyetik analizleri yapıp hava aralığındaki manyetik akıya etkileri araştırılmıştır.



**Şekil 5.10 :**  $M_{gh}$  parametresinin manyetik akı yoğunluğuna etkisi.

Şekil 5.10’da 5mm için mıknatısların demir nüveden çıkıntı miktarına göre elde edilen analiz sonucu verilmiştir. Hava aralığı ortalama manyetik akısı 0,56 tesla düzeyindedir. Mıknatıslar demir nüvenin içine girdikçe ortalama manyetik akının artışı görülmektedir. Alınan değerler Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8 ’e göre en yüksek değer tam gömülü durumdur. Bununla birlikte volanlı enerji depolama sistemlerinde kayıpları azaltmak için vakumlu bir ortamda hava sürtünmesi düşürülerek çalıştırılırlar. Dolayısıyla yüzey yerleştirmeli mıknatıs pek tercih edilmez. Bunun yerine gömülü mıknatıs tasarımı gerçekleştirilir. Bu çalışmada da Çizelge 5.8 ’de göz önünde tutularak  $M_{gh}$  parametresinin 0 alınması uygun olarak değerlendirilmiştir.

**Çizelge 5.8 :**  $A_g=2,5mm$ ,  $A_h=12mm$ ,  $M_d=5^0$ ,  $M_h=7mm$  iken mıknatıs yüzey çıkıntısının analizi.

$M_{gh}$ (mm)	
0	<b>0.608276173924873</b>
1	0.583890052404968
2	0.573702810029516
3	0.567576659733095
4	0.563695558079229
5	0.561598176867648

### 5.1.7 2P=2 kutuplu EASM motorun değerlendirilmesi

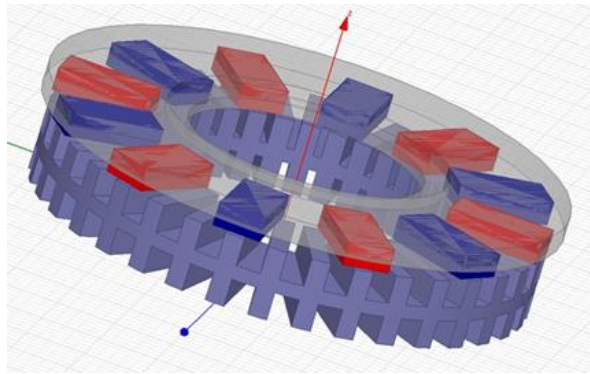
Tasarımın ilk aşamasında 3d katı model gerçekleştirilmiştir. 3d katı modelden manyetik analizler gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu aşamada 2P=2 kutuplu motor

modelinin manyetik analizleri ANSYS firmasının Maxwell programı ile elde edilmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde ayak yüksekliği Ah, ayak genişliği Ag, mıknatıs açısı Md, mıknatıs yüksekliği Mh ve mıknatısın yüzeyden olan çıkıntısı Mgh parametreleri sırasıyla 12mm, 2,5mm, 5°, 7mm ve 0mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu parametrelerden bazılarının tablolarında altı çizili olarak gösterildiği gibi bir iki basamak yukarı aşağı yönlü oynama opsiyonları vardır. Üretim aşamasında meydana gelebilecek zorluklar ya da mıknatıs temini konusunda yaşanabilecek problemlerde bu opsiyonlar değerlendirilecektir.

Ayrıca yukarıdaki her bir değer için oluk ve ayak kenarları da incelenmiştir. Manyetik alan dağılımlarına bakıldığında nüvenin doyumuna gitmediği görülmektedir. Dolayısıyla 2,5mm ayak genişliği de uygun bir değerdir. Ag'nin 2,5mm değeri için toplam ayak genişliğinin çevre uzunluğuna oranı 0,377 değerindedir. Ag'nin artmasıyla bu değer artmaktadır. Dolayısıyla Ag'nin artışı hem sipir sayısını sınırlamakta hem de kaçak reaktansı arttırarak gerilim düşümlerine neden olmaktadır. Bu yüzden bu değer olabildiğince diğer manyetik analiz sonuçları da gözetilerek minimum seçilmiştir.

## 5.2 2P=12 Kutuplu EASM Motor-Alternatör Manyetik Analizi

VEDS'de volanın üzerinde biriktirdiği kinetik enerjiye bağlı olarak alternatör sargılarını taşıyan 12 kutuplu modelin Maxwell çizimi şekil 5.11'de verilmiştir. Kutup sayısı 12'dir. Kutup sayısı 50 Hz durumu için nominal hızı belirler. Tasarlanan stator boyutuna göre en uygun kutup sayısı da 12 olarak belirlenmiştir. Statoru 36 olukludur. Manyetik analizlerde hava aralığı akısı ve doyum noktaları incelenecektir. Böylelikle motor modunda üretilen güç ve alternatör modunda elde edilecek güç bulunabilecektir.



Şekil 5.11 : 2P=12 Kutuplu EASM motor-alternatör setinin maxwell'de modellenmesi.



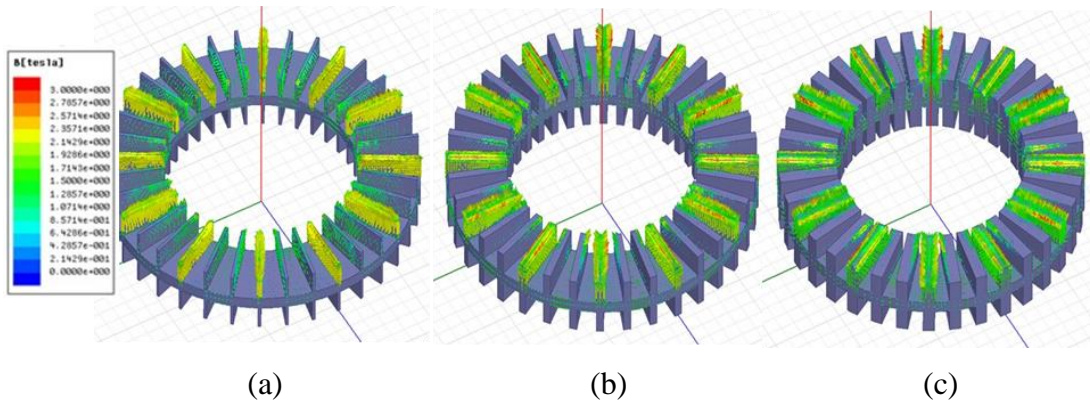
Şekil 5.11’de verilen tasarımda alınan değişken parametreleri Çizelge 5.9’da verilmiştir. Ayak genişliği, Boyunduruk yüksekliği, Ayak yüksekliği, Mıknatıs açısı, hava aralığı, rotor açısai dönüş derecesi değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 5.9** : 2P=12 kutup için maxwell değişken parametreler.

$A_g$ (mm)	Ayak genişlik
$A_h$ (mm)	Ayak yükseklik
$B_h$ (mm)	Boyunduruk yükseklik
$M_d$ (derece)	Mıknatıs açısı
$A_{irg}$ (mm)	Hava aralığı
AlfaR (derece)	Rotor açısai dönüş derecesi

### 5.2.1 Ayak genişliği “ $A_g$ ” değişiminin etkisi

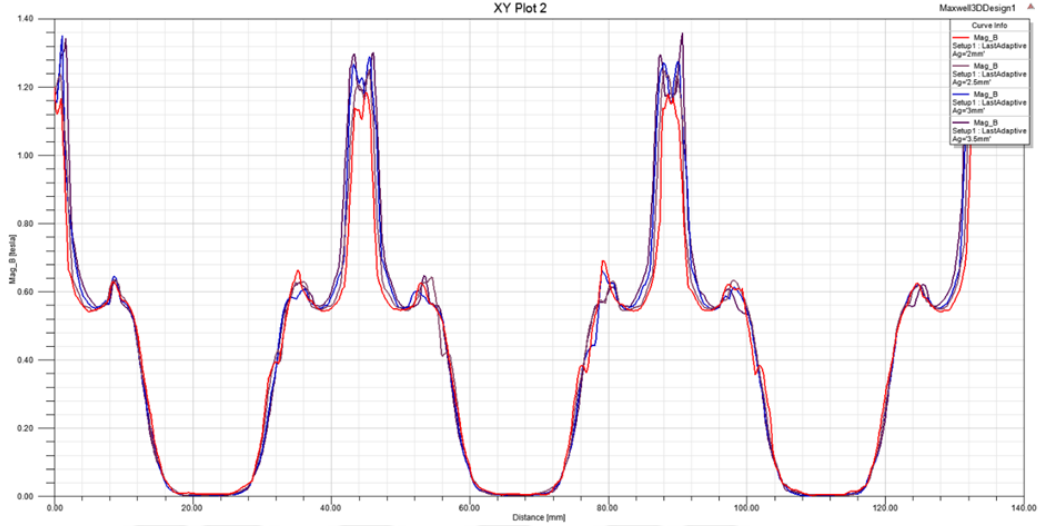
İlk tasarım parametresi ayak genişliği “ $A_g$ ” 2mm ile 8mm arasında 0,5mm aralıklarla değerler alınmıştır. Hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu hesaplatılmıştır. Şekil 5.12’de VEDS için tasarlanan statordaki manyetik akı yoğunluğu incelendiğinde 2mm’den 8mm’ye doğru oluklarda sarı renkten yeşile doğru bir geçiş vardır. Bu da stator ayaklarında 2,35 tesladan 1,5 teslaya doğru değişimi bize gösterir. Kullanılan saç malzemelerin BH eğrilerinde 1,8 tesla değerini görmek mümkündür. Yapılan tasarımda nüve ayaklarında manyetik akı yoğunluğunu 1,7 tesla civarında almak gerekir.



**Şekil 5.12** : VEDS a)  $A_g=2$ mm b)  $A_g=5$ mm c)  $A_g=8$ mm durumu.

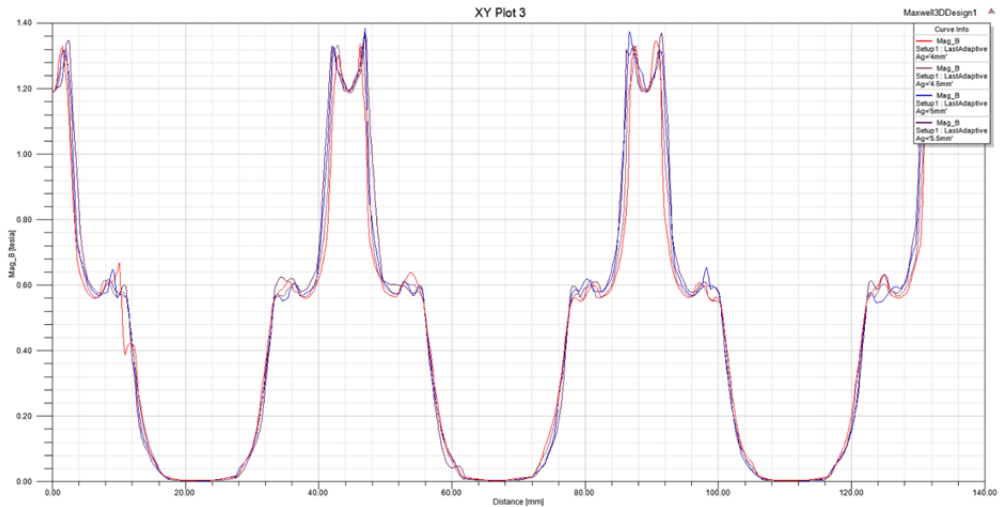
Şekil 5.13’de VEDS için tasarlanan statorun bir kontur boyunca hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğundaki değişim eğrileri  $A_g=2$ mm’den  $A_g=3,5$ mm’ye kadar olan aralık için verilmiştir. Bu eğri de bize vurutu momenti için bir fikir verir. Stator ayaklarının genişliği ve oluk genişliğine bağlı olarak vurutu momenti değişir. Ayak

genişliği azaldıkça eğri dikleşir ve vuruntu momenti değerleri artar. Şekil 5.13'den de  $A_g=3\text{mm}$  için eğrinin st kısımlarında manyetik akı yoğunluğunun dağıldığı veya genişlediği görülmektedir. Dolayısıyla alınacak vuruntu momenti değerleri de daha yumuşak olacaktır.



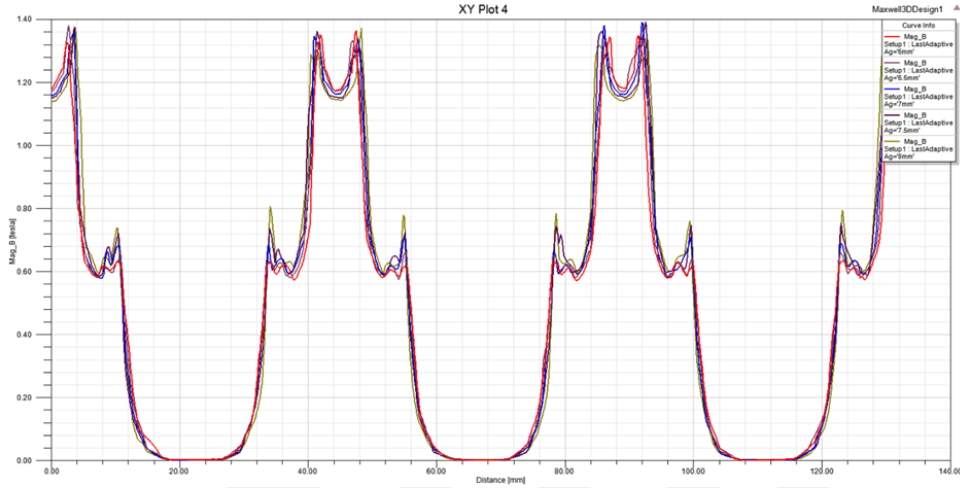
**Şekil 5.13** : VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi ( $A_g=2-3,5$  mm arası).

Şekil 5.14'de  $A_g=4\text{mm}$ 'den  $5,5\text{mm}$ 'ye kadar olan değişimi  $0,5\text{mm}$  aralıklarla verilmiştir. Ayak genişliği ile birlikte eğri yanlara doğru genişlemektedir. Bununla birlikte stator ayaklarının kenarlarında manyetik akı yoğunluğunun ortasına göre daha yüksek değer aldığı görülmektedir. Bu da bize ayak kenarlarının doyuma gideceğini gösterir.



**Şekil 5.14** : VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi ( $A_g=4-5,5$  mm arası).

Şekil 5.15’de  $A_g=6\text{mm}$ ’den  $8\text{mm}$ ’ye kadar olan değişim verilmiştir. Ayak kenarları ile ortasındaki değişimin az olması önemlidir. En az değişim  $A_g=6\text{mm}$  için gerçekleşmektedir. Bununla birlikte şekil 5.14 ve 5.15’deki değerlerde de değişim miktarları daha azdır. Fakat stator ayağı incelidikçe de ortalama manyetik akı yoğunluğu azalmaktadır.



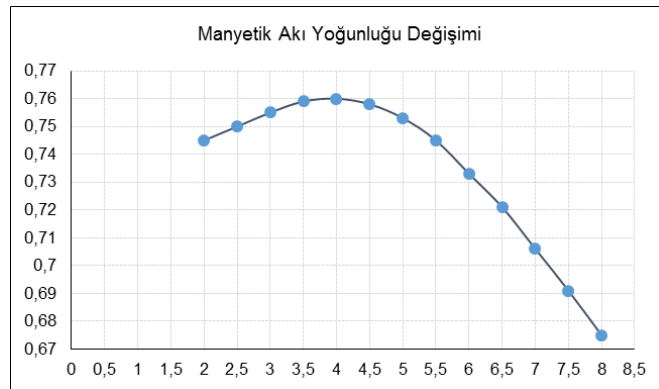
**Şekil 5.15 :** VEDS hava aralığındaki bir kontur boyunca manyetik akının değişimi ( $A_g=6-8$  mm arası).

Çizelge 5.10’da statordaki ortalama manyetik akı yoğunluğu değerleri verilmiştir.  $A_g=2\text{mm}$ ’den  $8\text{mm}$ ’ye kadar olan değişimi görmekteyiz. Ortalama manyetik akı yoğunluğu değeri  $0,74$  tesladan  $0,67$  teslaya doğru değişim göstermektedir. Ayak genişliğinin artmasıyla  $B$ ’nin azalmasının sebebi stator hacmindeki artıştır. Bununla birlikte statordaki ayak yüzeyinin artması gücün de artmasını etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda hava aralığındaki  $B$ ’nin ortalama  $0,5$  tesla ve üzeri olması yeter değer olarak verilmektedir.

**Çizelge 5.10** : Oluk ayak genişliğinin ortalama manyetik akıya etkisi.

<b>A<sub>g</sub> (mm)</b>	<b>B (Tesla)</b>
2	0.74555990206
2,5	0.75051748345
3	0.75597160162
3,5	0.75955858462
4	0.76061428598
4,5	0.75889630802
5	0.75335510244
5,5	0.74535153035
6	0.73329911373
6,5	0.72174456942
7	0.70694146824
7,5	0.69198486486
8	0.67574087967

Çizelge 5.10'daki değerleri şekil 5.16'da verilen grafikte incelediğimizde ayak genişliğine göre B'nin önce arttığı sonrada azaldığı görülmektedir. Eğriden 0,74 tesla civarı değerlerde seçim yapılabilir. Burada 0,74 tesla civarında hem  $A_g=2\text{mm}$  civarı değerler hem de  $A_g=5,5\text{ mm}$  civarı değerler görülmektedir.  $A_g$ 'nin sipir sayısı da düşünülerek maksimum seçilmesi hem vuru mu momenti hem de hava aralığında üretilen moment değeri için önemlidir. Bu nedenle  $A_g=5,5$  civarı değerler tasarım parametresi olarak tercih edilmiştir.



**Şekil 5.16** :  $A_g$ 'nin değişimine bağlı olarak statordaki B'nin değişimi.

Ag'nin stator çevre uzunluğuna oranı da önemlidir. Bu değer sıfıra yaklaşırsa oluklara çok sipir sığdırabiliriz. Fakat bununla birlikte vuru momentini değeri artar ve makineden alabileceğimiz güç değeri azalır. Toplam Ag'nin çevre uzunluğuna (Çu) oranının değerini (TAg/Çu) 1'e yaklaştırırsak bu durumda oluklar çok küçülür ve oluklardaki sarımlarımızın sipir sayıları azalacağı için makineden alabileceğimiz güç değeri de düşer. Bu nedenle TAg/Çu değeri 0,4 ve 0,5 arasında seçilmesi gereklidir. Eksenel akılı makinelerde iç stator çapından dış stator çapına gittikçe ya ayak genişler ya da oluk genişler. Bundan dolayı referans iç çap seçilmelidir. Formül 5.2'den iç yarıçapa göre yay toplam çevre(yay) uzunluğu hesaplatılmıştır. Çizelge 5.11'de ise Ag, Toplam Ag (TAg) ve TAg/Çu oranları verilmiştir. Çizelge 5.11'de verilen TAg/Çu oranının 0,4 – 0,5 arası değerleri altı çizili olarak gösterilmiştir. Bu tasarım parametreleri diğer manyetik hesaplamalarda seçilecek olan Ag'nin optimize edilmiş değerleridir.

$$Y_u = 2 * 3.14 * r = 2 * 3.14 * 65 = 408,2 \text{ mm} \quad (5.2)$$

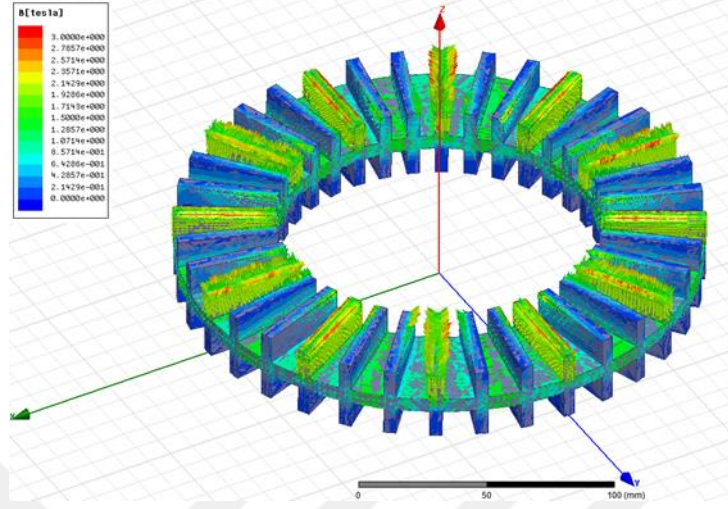
**Çizelge 5.11** : Ayak genişliği ile çevre uzunluğu oranı.

<b>Ag (mm)</b>	<b>TAg (mm)</b>	<b>TAg/Çu (mm)</b>
2	72	0,176384
2,5	90	0,22048
3	108	0,264576
3,5	126	0,308672
4	144	0,352768
4,5	162	0,396864
5	180	<u><b>0,44096</b></u>
5,5	198	<u><b>0,485056</b></u>
6	216	<u><b>0,529152</b></u>
6,5	234	0,573248
7	252	0,617344
7,5	270	0,66144
8	288	0,705537

### 5.2.2 Ayak yüksekliği “Ah” ve ayak genişliği “Ag” değişiminin etkisi

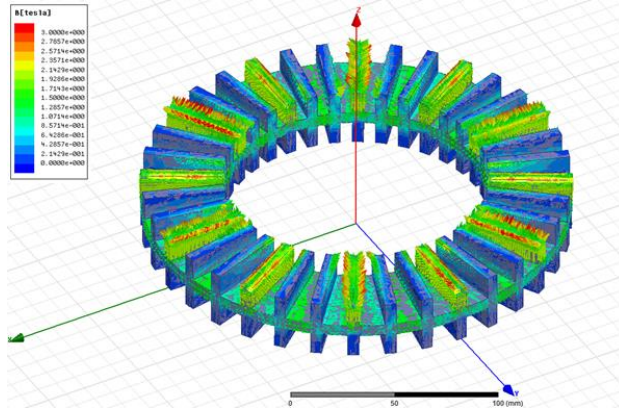
VEDS için tasarlanan motor alternatör setinin 2P=12 motor-alternatör kısmı için çizelge 5.11'de karar verilen 5mm-5,5mm-6mm ayak genişlikleri durumlarında statorda oluşan ortalama manyetik akı yoğunluğunun değişimi şekil 5.17'de

verilmiştir. Stator ayak iç kısımlarında yan ayaklarda etkileşim görülmektedir. Bununla birlikte 1,71-2,12 tesla arası değişimler incelenmiştir.



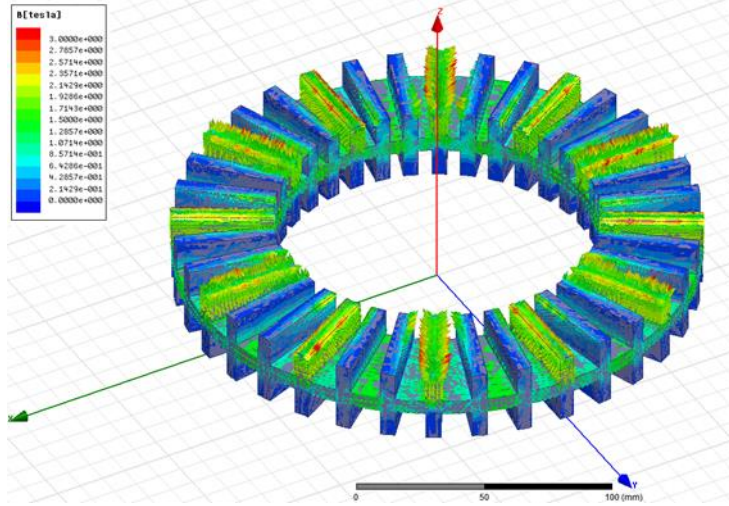
**Şekil 5.17 :** Ayak yüksekliği “Ah=12mm” ve ayak genişliği “Ag=5mm” değişiminin etkisi.

Şekil 5.18’de ayak genişliği 5,5mm ve ayak yüksekliği 12mm durumu için analiz sonucu görülmektedir. Manyetik akı yoğunluğunun stator ayaklarında arttığı ve ayak kenarlarında 2 tesla üzeri değerler aldığı elde edilmiştir.



**Şekil 5.18 :** Ayak yüksekliği “Ah=12mm” ve ayak genişliği “Ag=5,5mm” değişiminin etkisi.

Şekil 5.19’da Ah=12mm ve Ag=6mm değerleri için analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.17 ve 5.18 ile karşılaştırıldığında büyük bir fark görülmemektedir. Stator ayak kenarlarında bir miktar doyma oluşmaktadır.



**Şekil 5.19 :** Ayak yüksekliği “Ah=12mm” ve ayak genişliği “Ag=6mm” değişiminin etkisi.

Şekil 5.17, 5.18 ve 5.19 incelendiğinde aynı Ah değerleri için Ag=5mm civarındaki ufak değişimlerin değerlerini daha iyi görebilmek için çizelge 5.12 oluşturulmuştur. Çizelge 5.12’de farklı Ag ve Ah değerleri için statordaki ortalama manyetik akı yoğunluğuna bakılmıştır. Ah’ın azalan değerleri ortalama manyetik akı değerini arttırmıştır. Bununla birlikte program hesaplamalarda nüve hacmini kullandığı için hava aralığındaki ortalama manyetik akı değerinin değişimini de incelemek gerekir.

**Çizelge 5.12 :** Ah ve Ag değişiminin ortalama manyetik akıya etkisi.

Ah-Ag	5	5,5	6
12	0.753355102442986	0.745351530357368	0.73329911373226
11	0.769002700524327	0.759839879359241	0.750940652658825
10	0.786730454531548	0.77876455264941	0.769620820825254
9	0.807926187112189	0.800861362400232	0.792114471129986
8	0.830442183402331	0.824950809352169	0.817168611454513
7	0.857470667695163	0.852732438089704	0.844759393509773
6	0.890141754063952	0.886427375582997	0.878028758158082

Çizelge 5.13’de Ah ve Ag değişimine bağlı olarak hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu incelenmiştir. Hava aralığı ortalama manyetik akı değerinin mümkün olduğu kadar yüksek olması gerekmektedir. Çünkü gücü etkileyen en önemli tasarım parametresidir. Bununla birlikte tasarlanan makine hem motor hem de alternatör modunda farklı iki sargı ile çalıştırılacaktır. Bu nedenle ayak yüksekliğinin maksimum seçilmesi de önemlidir. Ag=5,5mm için 12 ve 8 mm değerleri arasındaki farkın 12 mm değerindeki duruma göre yüzdelik değişimi %0,66 ‘dır. Dolayısıyla

çizelge 5.13'e göre  $A_g = 5, 5,5, 6$  mm değerleri için  $A_h$  değeri 12 mm değeri uygun bir değerdir.

**Çizelge 5.13 :**  $A_h$  ve  $A_g$  değişiminin hava aralığında ortalama manyetik akıya etkisi.

<b>A<sub>h</sub>-A<sub>g</sub></b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>	<b>6</b>
12	<b><u>0.431536275048993</u></b>	<b><u>0.437083665737125</u></b>	<b><u>0.442096926979878</u></b>
11	0.431697160964675	0.43731610188606	0.442985407201615
10	0.432813949266034	0.438287549685288	0.443497283884629
9	0.433787988260042	0.439146918815996	0.444240443848346
8	0.434231501793624	<b><u>0.440010091014247</u></b>	0.445277111351711
7	0.435649002519509	0.440866715775539	0.446108344922546
6	0.437280467120662	0.442862083911974	0.446810345249898

### 5.2.3 Mıknatıs açısı $M_d$ 'nin değişimi

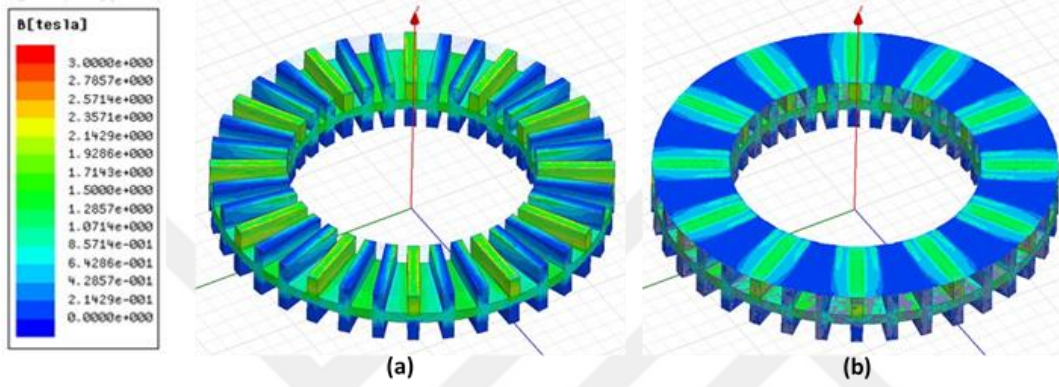
Tasarımda alternatör sargılarının bulunduğu  $2P=12$  kutuplu toroidal statorlu EASM makinenin kutup açılarının değişimi incelenmiştir. Tasarlanan 12 kutuplu motor-alternatör setinde dikdörtgen tip mıknatıs kullanılmıştır. Statorun açık oluk yapısından dolayı da vuruğu momenti yüksektir. Vuruğu momenti makinede istenmeyen moment salınımlarına neden olmaktadır. Bu durum hem mekanik aksama zarar vermekte hem de hazır bekleme durumunda devir sayısının düşmesine dolayısıyla toplam kinetik enerjinin azalmasına neden olmaktadır.

Vuruğu momenti mıknatıslar ile oluk kenarlarının etkileşimi sonucu oluşan moment dalgalanmalarıdır. Gidermek için rotor tarafında ve stator tarafında yapısal değişiklikler yapılabilir. Stator tarafında oluk şekillerinde yapılan değişiklikler maliyetleri yükselttiği için pek tercih edilmez. Rotor tarafında mıknatıslara kaykık verme, değişik şekilli mıknatıs kullanma, mıknatıs gruplama tekniği ve mıknatısları kaydırma gibi teknikler uygulanabilir. Mıknatıs kaykık teknikleri de maliyetleri arttıran bir etkidir. Çalışmanın bu kısmında dikdörtgen tip mıknatıs kullanarak kendi ekseninde değişik açılar için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde vuruğu momentini gidermek için etkili bir tercihtir.

Mıknatısların kendi eksenini etrafında döndürülmesi için  $M_d$  değişkeni atanmıştır.  $M_d$  değişkeni 5'er derecelik farklar ile değiştirilerek manyetik analizler elde edilmiştir.

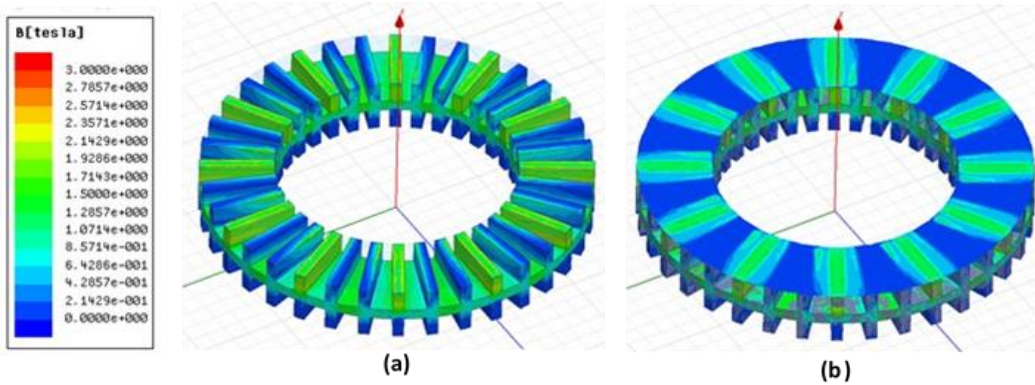


Şekil 5.20’da  $Md=0^0$  durumu görülmektedir. Stator yüzeyi ve hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı sırasıyla Şekil 5.20.a,b’de verilmiştir. Rotor yüzeyindeki mıknatısların oluşturduğu manyetik akının tek bir stator ayağı üzerinde etki ettiği görülmektedir. Eksenel akılı makinelerde oluk veya ayak genişliği sabittir. Dolayısıyla iç çaptan dış çapa doğru lineer olmayan bir ayak veya oluk değişimi söz konusudur. Bundan dolayı Şekil 5.20.b’de iç çap kısımlarında mıknatıslar stator ayak kenarları ile etkileşime girmektedir.



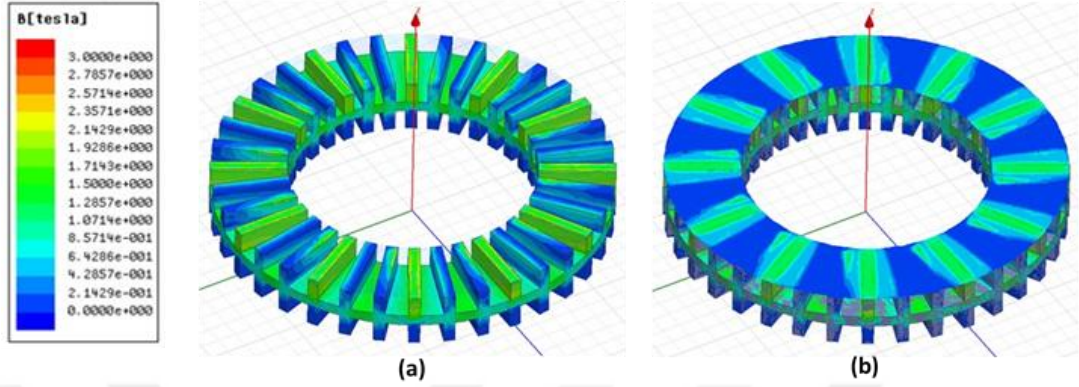
**Şekil 5.20 :** Mıknatıs açısı  $Md=0^0$  durumunda  
a) Stator yüzeyinde b) Hava aralığındaki  $B$ 'nin değişimi.

Şekil 5.21’de  $Md=5^0$  durumu için stator yüzeyi ve hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun değişimi verilmiştir. Şekil 5.21.b’de hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun bir ayak üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Dolayısıyla bu durum vurutu momenti değerini arttıran bir durumdur.



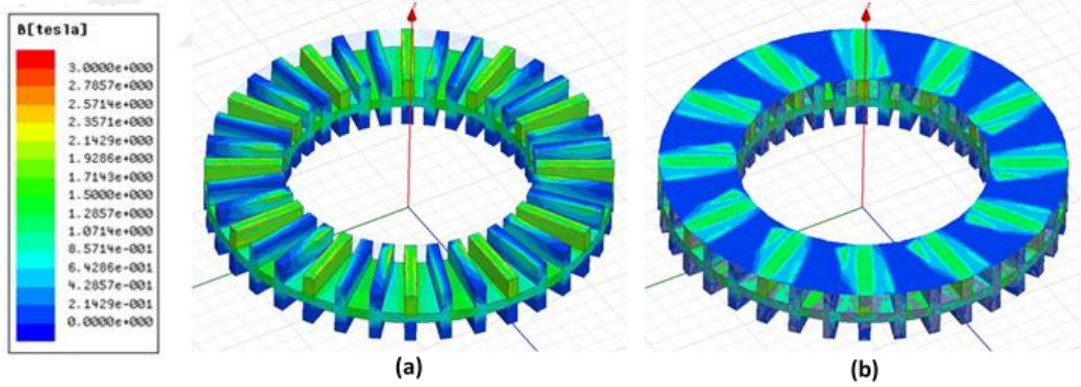
**Şekil 5.21 :** Mıknatıs açısı  $Md=5^0$  durumunda a) Stator yüzeyinde  
b) Hava aralığındaki  $B$ 'nin değişimi.

Şekil 5.22’de  $M_d=10^0$  durumu verilmiştir. Bu durumda Şekil 5.22.b incelendiğinde hava aralığı akısının ikinci bir ayak ile etkileşime girdiği görülür. Bu durum Şekil 5.21.b durumuna göre vuruğu momentini bir miktar azaltır.



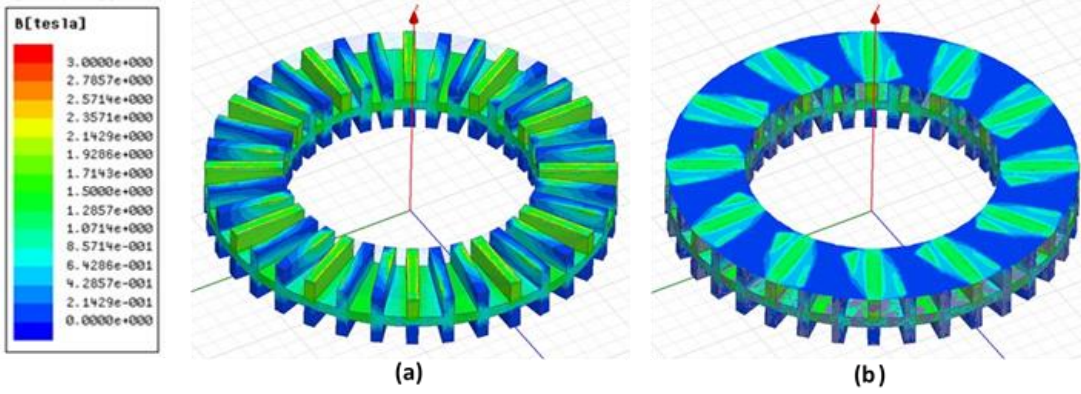
Şekil 5.22 : Mıknatıs açısı  $M_d=10^0$  durumunda a) Stator yüzeyinde b) Hava aralığındaki  $B$ 'nin değışimi.

Şekil 5.23’de  $M_d=15^0$  durumu verilmiştir. Şekil 5.23.b incelendiğinde hava aralığı akısının 3. Ayak kenarı ile de etkileşime girdiği görülmektedir. Bu durumda vuruğu momenti Şekil 5.22.b’ye göre azalmaktadır.



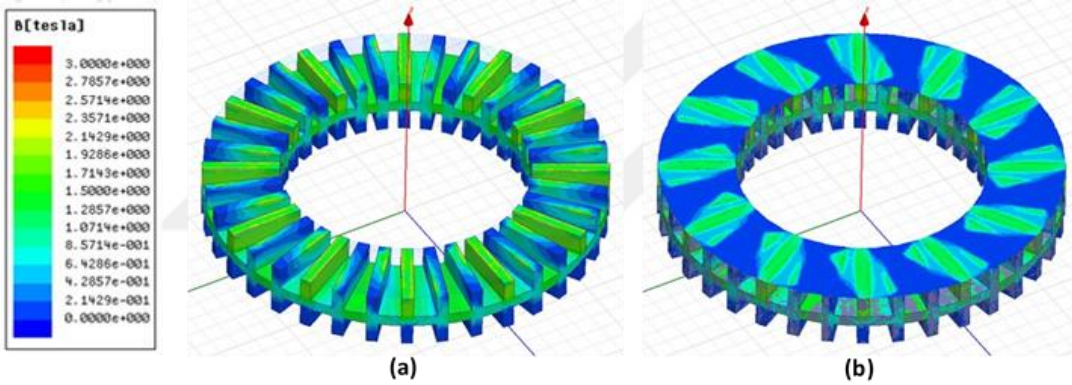
Şekil 5.23 : Mıknatıs açısı  $M_d=15^0$  durumunda a) Stator yüzeyinde b) Hava aralığındaki  $B$ 'nin değışimi.

Şekil 5.24’de  $M_d=20^0$  durumu verilmiştir. Şekil 5.24.b incelendiğinde hava aralığı akısının 3. Ayak kenarı ile etkileşimi artmaktadır. Bu durumda vuruğu momenti şekil 5.23.b’ye göre azalmaktadır.



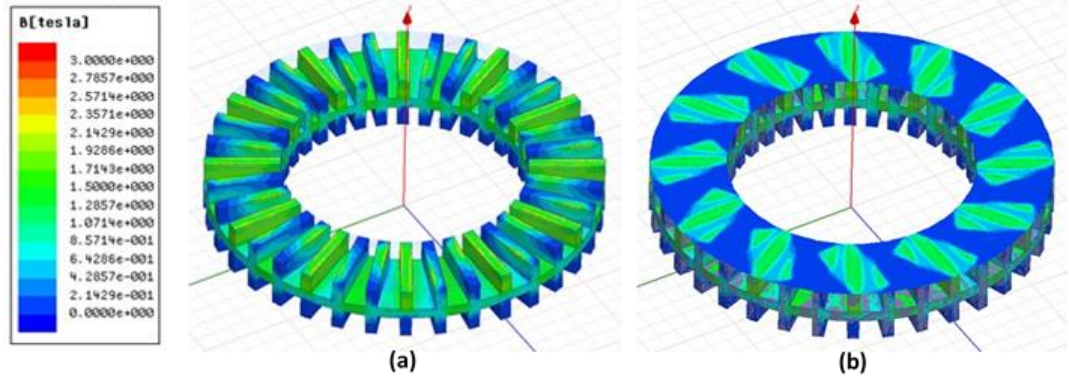
**Şekil 5.24 :** Mıknatıs açısı  $Md=20^0$  durumunda a) Stator yüzeyinde b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.

Şekil 5.25'de  $Md=25^0$  durumu verilmiştir. Şekil 5.25.b incelendiğinde hava aralığı akısının 3. ayak kenarı ile etkileşimi artmaktadır. Bu durumda vuruğu momenti Şekil 5.24.b'ye göre azalmaktadır.



**Şekil 5.25 :** Mıknatıs açısı  $Md=25^0$  durumunda a) Stator yüzeyinde b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.

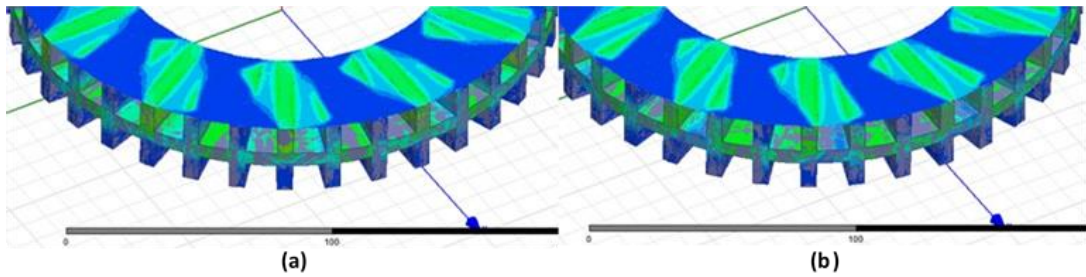
Şekil 5.26'da  $Md=30^0$  durumu verilmiştir. Şekil 5.26.b incelendiğinde hava aralığı akısının 3. Ayak kenarı ile etkileşimi Şekil 5.20-5.21-5.22-5.23-5.24-5.25'e göre en fazladır. Bu durumda vuruğu momenti Şekil 5.20-5.21-5.22-5.23-5.24-5.25.b'ye göre minimum seviyeye inmiştir.

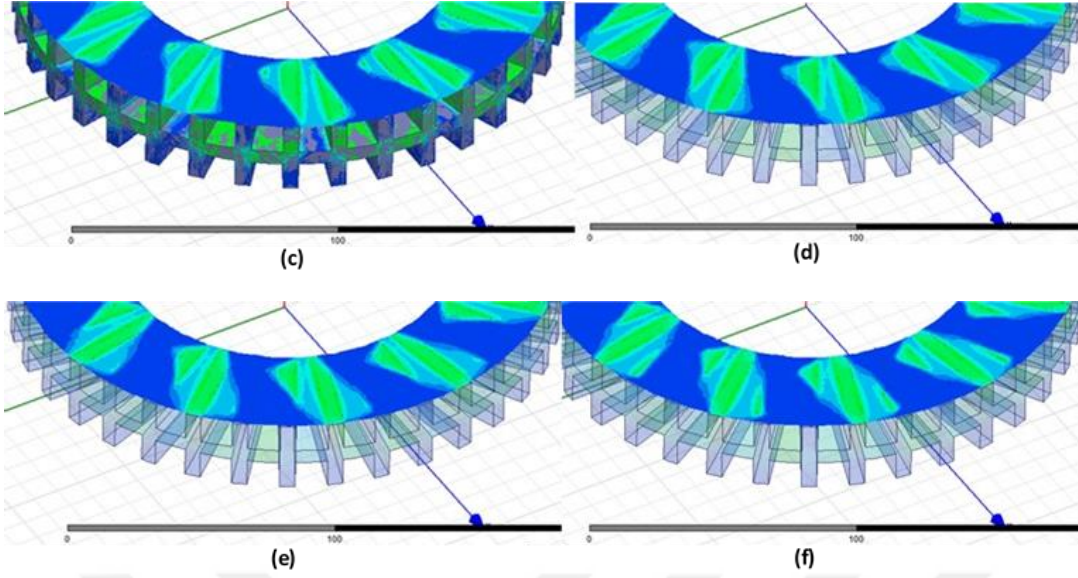


**Şekil 5.26 :** Mıknatıs açısı  $Md=30^0$  durumunda a) Stator yüzeyinde  
b) Hava aralığındaki B'nin değişimi.

Şekil 5.21-5.22-5.23-5.24-5.25-5.26'da  $Md$ 'nin değişimine bağlı olarak stator yüzeyinde ve hava aralığındaki manyetik akı dağılımının değişimi incelenmiştir. Manyetik akı dağılımının nüve ayakları ile en çok temas ettiği  $Md$  açıları  $25^0$  ile  $30^0$ 'dir. Şekil 5.27 ile 5.28'de her iki açı değeri için rotorun açısal hareketine bağlı olarak hava aralığındaki manyetik akı dağılımı incelenmiştir.

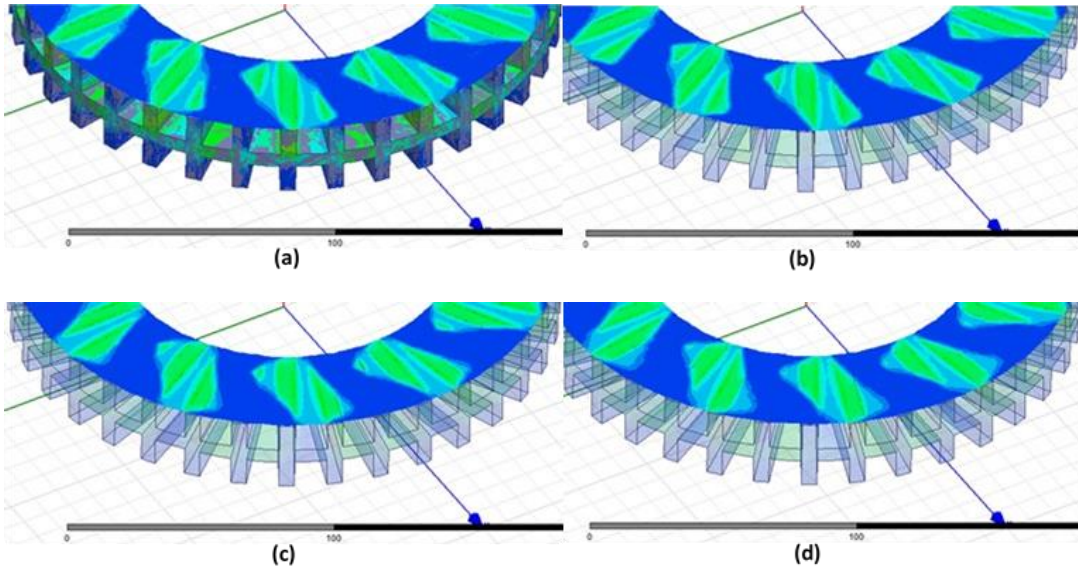
Şekil 5.27'de  $Md=25^0$  durumu için rotor hareketi  $0^0$ ,  $2^0$ ,  $4^0$ ,  $6^0$ ,  $8^0$  ve  $10^0$  durumlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan VEDS'nin rotorundaki bir kutbun bir nüve ayağından diğer ayağa olan açısal değişimi  $10^0$  olduğu için analizler 2 şer derecelik farklar ile gerçekleştirilerek değişimler incelenmiştir. Şekil 5.27.a,b,c,d,e ve f incelendiğinde kutup yüzeyi ile ayak kenarları arasındaki etkileşimin en çok olduğu durumlar a,b,c ve f durumlarıdır. 6 farklı hareket sonucunda 4 konumda etkileşim daha fazladır. Bu durum vuruntu momenti değerinin azaltmaktadır.

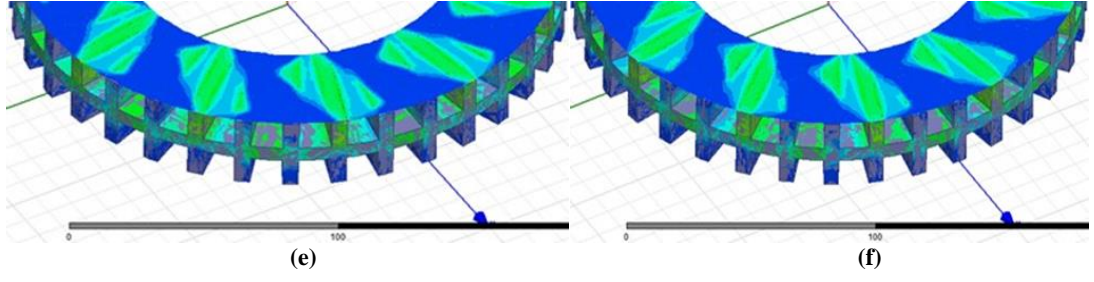




**Şekil 5.27 :** Mıknatıs açısı  $Md=25^0$  durumunda a)  $\text{AlfaR}=0^0$  b)  $\text{AlfaR}=2^0$  c)  $\text{AlfaR}=4^0$  d)  $\text{AlfaR}=6^0$  e)  $\text{AlfaR}=8^0$  f)  $\text{AlfaR}=10^0$  durumunda hava aralığındaki B'nin değişimi.

Şekil 5.28'de  $Md=30^0$  durumu için rotor hareketi  $0^0$ ,  $2^0$ ,  $4^0$ ,  $6^0$ ,  $8^0$  ve  $10^0$  durumlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.28.a,b,c,d,e ve f incelendiğinde kutup yüzeyi ile ayak kenarları arasındaki etkileşimin en çok olduğu durumlar a,b,c,e ve f durumlarıdır. 6 farklı hareket sonucunda 5 konumda etkileşim daha fazladır. Bu durum Şekil 5.27'de verilen 6 duruma göre daha fazla temas noktasının yakalanması sağlanmıştır. Dolayısıyla bu durum vurutu momenti değerini daha da azaltmaktadır.

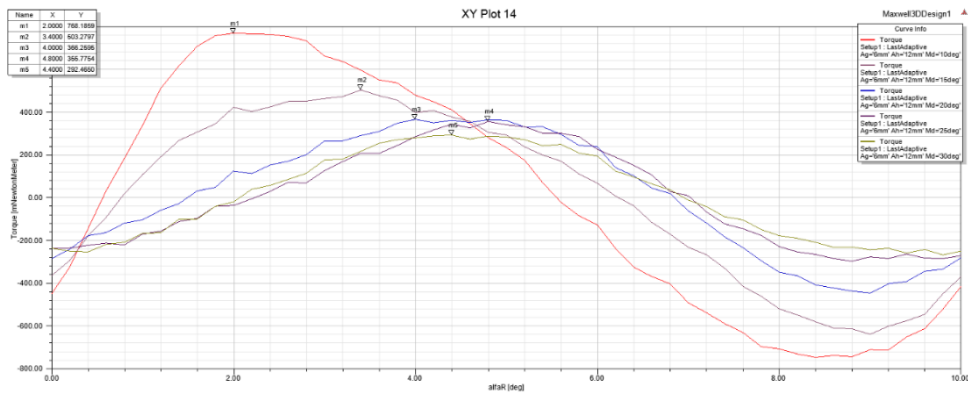




**Şekil 5.28 :** Mıknatıs açısı  $Md=30^0$  durumunda a)  $AlfaR=0^0$  b)  $AlfaR=2^0$  c)  $AlfaR=4^0$  d)  $AlfaR=6^0$  e)  $AlfaR=8^0$  f)  $AlfaR=10^0$  durumunda hava aralığındaki B'nin değişimi.

#### 5.2.4 Rotor açısız dönüş derecesi (AlfaR) vuruğu momenti üzerine etkisi

VEDS için tasarlanan EASM motor-alternatör setinin rotoru açısız olarak konum değiştirdiği durumda ki vuruğu momentine etkisi şekil 5.29'da verilmiştir.  $Ag=6mm$  ve  $Ah=12mm$  durumlarında mıknatıs açısı  $Md$ 'nin 10-15-20-25-30 derece durumları için program koşturulmuştur. Özellikle mıknatısın bir ayaktan diğer ayağa geçişlerine bakılmıştır. Bunun için 0,20'lik adımlarla toplam 255 hesaplama gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.29 incelendiğinde her bir vuruğu momentinin tepe değeri görülmektedir. 10 derece durumunda vuruğu momentinin tepe değeri ile 30 derece durumunda ki vuruğu momentinin tepe değeri arasındaki farka göre yüzdelerik değişim oranı %61,92'dir. 15 derece durumunda vuruğu momentinin tepe değeri ile 30 derece durumunda ki vuruğu momentinin tepe değeri arasındaki farka göre yüzdelerik değişim oranı %41,88'dir. 20 derece durumunda vuruğu momentinin tepe değeri ile 30 derece durumunda ki vuruğu momentinin tepe değeri arasındaki farka göre yüzdelerik değişim oranı %20,14'dür. 25 derece durumunda vuruğu momentinin tepe değeri ile 30 derece durumunda ki vuruğu momentinin tepe değeri arasındaki farka göre yüzdelerik değişim oranı %17,79'dur.



**Şekil 5.29 :** Mıknatıs açısına bağı olarak vuruğu momentinin elde edilmesi.

### 5.2.5 2P=12 kutuplu EASM motorun değerlendirilmesi

Tasarımda düşük hız kademesini sağlamak için tasarlanan çok kutuplu yapı ile yapılan analizlerde ayak genişliği  $A_g$ 'nin stator yüzeyindeki doyum etkisi ve hava aralığındaki kontur boyunca meydana gelen manyetik akı değişimleri incelenmiştir. Stator ayak yüksekliği değişiminin stator yüzeyindeki manyetik akı değişimi ile birlikte ortalama manyetik akı değerleri ve hava aralığındaki ortalama manyetik akı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca mıknatıs açısı ve değişken mıknatıs açıları için manyetik akı yoğunluğunun değişimi ve vuruuntu momenti üzerine olan etkileri gösterilmiştir. Alınan sonuçlardan  $A_g - A_h -$  ve  $M_d$  sırasıyla 5,5mm – 12mm ve  $30^0$  değerleri elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar nüvenin doyum noktaları ve özellikle vuruuntu momenti için önemlidir. Çünkü açık oluk yapısında büyük vuruuntu momenti değerleri oluşur. Bu da VEDS'nin hem durgun durumda enerji kaybetmesine hem de mekanik aksamlarda bozulmalara neden olur. Alınan sonuçlar da incelendiğinde vuruuntu momentinin %60 değerinin üzerinde azaldığı görülmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada bobinli manyetik fırlatıcılara güç sağlamak için önerilen volanlı enerji depolama sisteminde kullanılan motor-alternatör setinin manyetik analizleri ANSYS firmasının Maxwell 3d programı ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen makine yapısı iki farklı kutup sayısına sahip olan makineden oluşmaktadır. Birincisi 2 kutuplu yapıya sahip olan aksenal akılı sürekli mıknatıslı toroidal sargılı yapıdır. İkincisi ise 12 kutuplu trapezoidal sargılı EASM makine yapısıdır.

BMF'ler kısa sürede yüksek enerjiye gereksinim duyarlar. Dolayısıyla volanda kinetik enerjinin depolanması için kısa sürede referans hıza ulaştırılmalı ve referans hızda kalabilmek için enerji kayıpları da karşılanmalıdır. Bunun için 12 kutuplu EASM makine yapısı ile düşük devir kademesindeki referans hıza ulaşması sağlanacaktır. 2 kutuplu EASM makine yapısı ile de hem yüksek hız kademesine ulaşması sağlanacak hem de belirlenen referans hızda kalması mümkün olacaktır. Bununla birlikte 12 kutuplu makine yapısı ile de BMF'ye yüksek frekans ve akıma sahip olan enerji sağlanacaktır.

Bu çalışmada da iki aşamalı olarak 2 ve 12 kutuplu EASM makinelerinin manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizler ile doyum noktaları belirlenmiştir. Dolayısıyla yapılan analizler altında manyetik nüve ve mıknatıs ölçüleri ile ilgili olarak klasik optimizasyon yapılmıştır.

2 kutuplu EASM makine için ayak genişliği  $A_g$ , ayak yüksekliği  $A_h$ , sargı genişliği  $S_g$ , boyunduruk yüksekliği  $B_h$ , mıknatıs açısı  $M_d$ , hava aralığı  $A_{irg}$ , mıknatıs yüksekliği  $M_h$  ve mıknatısın gömülü olmayan kısım yüksekliği  $M_{gh}$  değerleri programda değişken olarak alınmıştır. 2 kutuplu EASM makinesi için alınan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ayak genişliği  $A_g$ (mm) parametresi için analizler 2-5mm aralığında 0,5 mm aralıklar ile gerçekleştirilmiştir. Hava aralığı manyetik akısı için



bakıldığında 2-5mm için toplamdaki değişim yüzdesi %6,88'dir. 2-3mm arasındaki değişim oranı ise %2,49'dur.

- Ag ile çevre uzunluğu oranı belirlenmiştir. Bu oranın 0,5'i geçmesi durumunda EASM makine yapısının özellikle iç çap kısmında meydana gelen daralma nedeniyle istenilen sayıda siper yerleştirilmemektedir. Bununla birlikte ayak genişliğinin artması ile hava aralığındaki manyetik akının değişimi (minimum ve maksimum noktalar arasındaki farkın artması) azalmaktadır. Dolayısıyla Tag/Çu (toplam ayak genişliği/çevre uzunluğu) oranının 0,5'in altı için Ag=2, 2.5 ve 3mm değerleri uygun bulunmuştur.
- Ag değerinin 2-3mm aralığındaki değerleri için nüvede oluk kenarları incelendiğinde doyumun olmadığı görülmüştür. Ag=3mm için stator ayaklarında 0,8 tesla değerinde manyetik akı yoğunluğu değeri vardır. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu ise 0,47 tesladır. EASM makinelerde hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerleri 0,5 tesla ve üzeri alınmaktadır. Elde edilen değer kabul edilen değerden %6 kadar azdır.
- Ag değerinin vuru mu momenti üzerine etkisi incelenmiştir. Ag'nin artması hava aralığı relüktansını azaltacağı için vuru mu momentinde iyileşme görülecektir. Alınan değerler incelendiğinde Ag=2mm değerine göre 2,5mm ve 3mm için sırasıyla %22,6 ve %41.1 oranında iyileşme söz konusudur.
- Ag'nin 2-3mm arasındaki değerleri için Ah değeri optimize edilmiştir. Bunun için Ah değeri 6-12mm arasında 1'er arttırılarak değiştirilmiştir. Alınan sonuçlardan da ortalama manyetik akı yoğunluğu değeri 0,5 tesla ve yukarısı baz alınmıştır. Bu durumda Ah değerleri Ag'nin 2,5mm değeri için Ah=12mm, Ag'nin 3mm değeri için ise Ah=10, 11 ve 12mm değerleri uygundur.
- Mıknatıs yay açısı Md'nin 0 ve 15<sup>0</sup> için değerleri incelenmiştir. Manyetik akı yoğunluğunun nüve ayaklarında 1,288 tesla olduğu görülmüştür. Doyum ise verilen aralık için alınan sonuçlarda tespit edilmemiştir.

Ortalama manyetik akı yoğunluğunun en yüksek değeri için  $Md=5^0$  olarak alınmıştır.

- Mh değeri 5-10 mm arasında Ag'nin 2,5 ve 3mm değerleri için değiştirilmiştir. Alınan değerler incelendiğinde  $Md=5^0$ ,  $Ag=2,5mm$  için  $Mh=7, 8mm$ 'de manyetik akı yoğunluğu değeri en yüksek sırasıyla 0,573 ve 0,578 tesladır. Bununla birlikte  $Md=5^0$ ,  $Ag=3mm$  için  $Mh=7, 8mm$ 'de manyetik akı yoğunluğu değeri en yüksek sırasıyla 0,577 ve 0,582 tesladır. Ag'nin 2,5 ve 3mm değerleri için Mh'nin 7 ve 8mm değerlerinde ki değişim her ikisinde de %0,8 düzeyindedir. Dolayısıyla Mh değeri üretim şartları ve maliyet te gözeterek 7, 8mm değerleri olarak seçilebilir. Yapılan çalışmada Mh değeri 7mm olarak alınmıştır.
- Son parametre mıknatısların yüzeyde kalan yüksekliklerinin Mgh analizidir.  $Ag=2,5mm$ ,  $Ah=12mm$ ,  $Md=5^0$  ve  $Mh=7mm$  iken manyetik akı yoğunluğunun en yüksek değeri  $Mgh=0mm$  iken 0,608 tesla düzeyindedir. Dolayısıyla gömülü tip mıknatısların kullanılması en uygun değer olarak belirlenmiştir.
- 2 kutuplu EASM makine yapısı için yapılan analiz sonuçlarında Ag, Ah, Md, Mh ve Mgh için sırasıyla elde edilen değerler 2,5-3mm, 10-12mm,  $5^0$ , 7-8mm ve 0mm olarak bulunmuştur.

12 kutuplu EASM makine yapısı için yapılan manyetik analizlerde Maxwell 3d programında ayak genişliği Ag, ayak yüksekliği Ah, boyunduruk yüksekliği Bh, mıknatıs açısı Md, hava aralığı Airg ve rotor açısal dönüş derecesi AlfaR değerleri değişken olarak alınmıştır. Optimizasyon için 2 kutuplu EASM makine yapısında olduğu gibi klasik olarak manyetik analiz programında iterasyon yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada belirtildiği üzere Maxwell 3d'de iterasyon ile yapılan optimizasyon için işlem kapasitesi yüksek çalışma istasyonlarına gerek vardır. Değişken sayısı ve iterasyon sayısı arttıkça 100'lerce analizin birarada yapılması optimizasyonu sınırlandırmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada da her parametre ayrı olarak analiz edilerek en uygun parametreler seçilmiştir. 12 kutuplu EASM makine yapısında sonlu elemanlar yöntemine göre analiz yapan Maxwell 3d programından alınan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- İlk tasarım parametresi olarak ayak genişliği  $A_g=2-8\text{mm}$  arasında  $0,5\text{mm}$  aralıklar ile alınmıştır. Ayak genişliğinin düşük parametreleri için hava aralığı boyunca belirlenen konturda manyetik akı yoğunluğunun değişimi yüksektir. Bu da vuru mu momenti değ erinin yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Manyetik akı yoğunluğu değ erinin en yüksek olduğu ayak genişliği değ eri  $4\text{mm}$ 'dir. Bununla birlikte toplam ayak genişliğinin çevre uzunluğ una oranı  $T_{Ag}/\text{Çu}$   $0,5$ 'i geçmemesi gerekmektedir. Çünkü 2 kutuplu makine yapısında da belirtildiği üzere EASM makinelerde iç çaptaki oluk genişliği  $T_{Ag}/\text{Çu}$ 'nun artmasıyla azalmaktadır.  $A_g$ 'nin  $5-6\text{mm}$  değ erleri için  $T_{Ag}/\text{Çu}$  oranı  $0,44-0,529$  arasında değişmektedir. Dolayısıyla  $A_g$  değ eri  $5-6\text{mm}$  arasındaki değ erler için uygun olacaktır.
- Diğer parametre ayak yüksekliği  $A_h$  değişkenidir.  $A_h$  değişkeni  $A_g$ 'nin  $5, 5,5$  ve  $6\text{mm}$  değ erleri için elde edilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu için  $A_g=5,5\text{mm}$  için  $12$  ve  $8\text{mm}$  değ erleri arasındaki yüzdelik değişim  $\%0,66$ 'dır.  $12$  kutuplu EASM makine yapısında ikinci bir alternatör sargısı da olduğu düşünülerek  $A_h=12\text{mm}$  değ eri alınmıştır.  $A_h=12\text{mm}$  değ eri için hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu değ erinin  $0,43$  tesla civarında olduğu görülmektedir.
- Mıknatıs açısı  $M_d$ 'nin değişimi bize bu çalışmada kullanılan dikdörtgen tipi mıknatısların kendi eksenlerindeki dönüş açısını vermektedir.  $M_d$ 'nin değişimi vuru mu momentini değiştireceği için önemli bir parametredir.  $M_d$ 'nin  $0$  ile  $30$  derece arasındaki değişimleri incelenmiştir. Yapılan analizlerde mıknatıs kenarları ile oluk kenarlarının temas yüzeyleri rotorun hareketine bağlı olarak incelenmiştir.  $M_d=30^0$  durumunda en yüksek temas yüzeyi belirlenmiştir. Dolayısıyla bu bize en düşük vuru mu momenti değ erinin  $30$  derece için sağlanacağını göstermektedir.
- $M_d$ 'nin rotor dönüş açısı ile elde edilmiş vuru mu momenti değ erleri incelediğinde ise  $M_d=10$  derecelik değ ere göre  $M_d=30$  derece karşılaştırıldığında vuru mu momentinde  $\%61$ 'lik iyileşme sağlanmıştır.

- Sonuç olarak 12 kutuplu EASM makine yapısı için sonuçlar incelendiğinde Ag, Ah ve Md sırasıyla 5-6mm, 12mm ve 30 derece en uygun değerler olarak tespit edilmiştir.

İleriki çalışmalarda yapılması gerekenleri aşağıdaki maddeler halinde sıralayabiliriz.

- Farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak daha kısa sürede analizlerin gerçekleştirilmesi sağlanabilir.
- Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile değişken parametrelerine ve seviyelerine bağlı olarak analiz sayısı düşürülerek yapılan optimizasyon ile burda alınan sonuçlar karşılaştırılabilir.
- EASM makinanın transient analizleri üzerinde çalışılabilir.
- Farklı EASM makine yapıları analiz edilebilir.

## **6.1 Çalışmanın Uygulama Alanı**

Yapılan bu çalışma bobinli manyetik fırlatıcılara enerji vermek için kullanılan volanlı enerji depolama sistemi için EASM makine tasarımını içermektedir. Dolayısıyla askeri alanlar ile birlikte kinetik enerji depolamaya dayanan VEDS'lerin kullanıldığı yerlerde uygulanabilir.



## KAYNAKLAR

- Anvari, B., Li, X., Toliyat, A. H., Palazzolo, A., Wang, Z., Han, X.** (2017). “A Coreless Permanent Magnet Machine for a Magnetically Levitated Shaft-less Flywheel”, Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, USA.
- Arani, A. A. K., Karami, H., Gharehpetian, G. B., Hejazi, M. S. A.** (2017). “Review of Flywheel Energy Storage Systems Structures and Applications in Power Systems and Microgrids”, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Ayçiçek, E.** (2012). “Vuruntu Momenti Azaltılmış Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı” , Doktora Tezi, İstanbul.
- Aydın, K.** (2010). “Uydu Entegre Güç Ve Yönelim Kontrol Sistemlerinde Kullanılabilecek Bir Volanlı Enerji Depolama Biriminin Tasarımı ve Gerçeklenmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara.
- Bendib, M., Belhouchat, K., Hachemi, M.** (2015). “3D Finite Element Analyses and Design Optimization of AFPM for Flywheel Energy Storage System”, Control Engineering & Information Technology (CEIT), Tiemcen, Algeria.
- Bernsmüller, E., Rolim, L. G. B.** (2016). “External Rotor Switched Reluctance Machine for a Kinetic Energy Storage System”, IEEE Industrial Electronics Society IECON, Florence, Italy, December.
- Chu, H. Y., Fan, Y., Zhang, C. S.** (2005). “A Novel Design for the Flywheel Energy Storage System”, Electrical Machines and Systems ICEMS Proceedings of the Eighth International Conference on”, vol.2, September, 1583-1587.
- Daoud, I. M., Abdel-Khalik, A. S., Massoud, A., Ahmed, S., Abbasy, H. N.** (2012). “A Design Example of An 8-Pole Radial AMB for Flywheel Energy Storage” International Conference on Electrical Machines (ICEM), Marseille, France, November.
- Diaz-Gonzalez, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Bianchi, F. D.** (2013). “Energy Management of Flywheel Based Energy Storage Device for Wind Power Smoothing”, Applied Energy, Vol.110, 207-219.
- Dong, J., Huang, Y., Shen, P., Jin, L., Ge, B.** (2012). “An Axial Flux Flywheel Motor/Generator for Pulsed Power Application”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), Raleigh, NC, September, 678-683.
- Erdinç, O., Uzunoğlu, M., Vural, B.** (2011). “Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri”, Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik Sempozyumu.

- Fu, X.** (2010). “A Novel Design for Flywheel Battery of Electric Vehicles”, IEEE International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application”, 107-111.
- Gör, H.** (2014). “Eksenel Akıllı Jeneratörlerin Tasarımı Ve Uygulaması” , Doktora Tezi, Ankara.
- Harmankaya, A., Çelik, S.** ( 2013).“Elektromanyetik Bobin Silahı” , Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Huang, C. N., Chen, Y. S.** (2017). “Design of Magnetic Flywheel Control for Performance Improvement of Fuel Cells Used in Vehicles”, Energy Elsevier, 840-852.
- İnger, E.** (2013).“Elektromanyetik Fırlatıcı Sistemlerinin İrdelenmesi ve Simülasyonu” , Doktora Tezi, Ankara.
- Junfeng, W.** (2012). “Design of a Miniature Axial Flux Flywheel Motor with PCB Winding for Nanosatellites”, Optoelectronics and Microelectronics ICOM International Conference, 544-548.
- Kato, K., Ishigma, S., Nakajima, Y., Arai, H., Ueda, T., Iwata, T., Ito, Y., Sugao, K.** (2014). “10MW, 3.3MWh Energy Storage System consisting of 4000 Flywheels controlled by ICT network for Short Cycle Power Fluctuation Compensation”, The 2014 International Power Electronics Conference IEEE, 403-408.
- Kocaman, B.** (2013). “Akıllı Şebekelerde ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri”, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol.2(1), 119-127.
- Kozak, M., Kozak, Ş.** (2012). “Enerji Depolama Yöntemleri”, International Technologic Science, vol.4, 17-29.
- Lee, S. J., Kim, J. H., Song, B. S., Kim, J. H.** (2013). “Coil Gun Electromagnetic Launcher (EML) System with Multi-Stage Electromagnetic Coils”, Journal of Magnetism, Vol.(18), No.4, 481-486.
- Liu, X., Hu, H., Zhao, J., Belahcen, A., Tang, L., Yang, L.** (2016). “Analytical Solution of the Magnetic Field and EMF Calculation in Ironless BLDC Motor”, IEEE Transactions on Magnetism, Vol.52, No.2, February.
- Mukoyama, S., Nakao, K., Sakamoto, H., Matsuoka, T., Nagashima, K., Ogata, M., Yamashita, T., Miyazaki, Y., Miyazaki, K., Maeda, T., Shimizu, H.** (2017). “Development of Superconducting Magnetic Bearing for 300 kw Flywheel Energy Storage System”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.27, No.4, June.
- Nguyen, T. D., Tseng, K. J., Zhang, S., Nguyen, H. T.** (2011). “A Novel Axial Flux Permanent Magnet Machine for Flywheel Energy Storage System: Design and Analysis”, IEEE Transaction on Industrial Electroninc”, vol.58, no.9, september, 3784-3794.

- Pena Alzola, R., Sebastian, R., Quesada, J., Colmenar, A.** (2011). “Review of Flywheel based Energy Storage Systems”, Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May, Spain.
- Qian, X.** (2010). “Application Research of Flywheel Battery in the Wind and Solar Complementary Power Generation”, Computer Application and System Modeling International Conference on, Vol.13, 546-550.
- Sarı, A.** (2006). “ Düşük Kayıplı Manyetik Yataklamalı Volan Enerji Depolama Sistemlerinin H-Infinity Kontrolü ”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Yılmaz, P. ve Balıkçı, A.** (2011). “Güneş Pilleri ve Volanlar ile Bir Hibrit Enerji Sistemi Tanzimi ve Benzetimi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Yi, J., Lee, K.W., Kim, B., Ko, J., Jeong, S., Noh, M.D., Lee, S.S.** (2007). “Micro Flywheel Energy Storage System with Axial Flux Machine”, Advanced Intelligent Mechatronics IEEE/ASME International Conference on, 1-6, September, Zurich.
- Zhang, C. ve Tseng, K.J.** (2004). Design and FEM Analysis of a Flywheel Energy Storage System Assisted by Integrated Magnetic Bearings. IECON Industrial Electronics Society 30th Annual Conference IEEE, vol.2, 1634-1639, November, Busan, Korea.
- Zhang, C. ve Tseng, K.J.** (2007). “A Novel Flywheel Energy Storage System With Partially-Self-Bearing Flywheel Rotor”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.22, No.2, 477-487.
- Zhou, L. ve Qi, Z.** (2009). “Modeling and Simulation of Flywheel Energy Storage Ssystem with IPMSM for Voltage Sags in Distributed Power Network”, International Conference on Mechatronics and Automation, August, China, 5046-5051.
- Zhou, L., Tang, X., Qi, Z.** (2014). “Control Method for Flywheel Array Energy Storage System in Energy Harvesting From Electric Railway”, Transportation Electrification Asia-Pacific(ITEC Asia-Pacific) IEEE Conference and Expo, September, 1-5.





## ÖZGEÇMİŞ

**VESİK  
ALIK  
FOTO**

**Ad Soyad** : Mürşide SEVER

**Doğum Yeri ve Tarihi** : 1980-AYDIN

**E-Posta** : medremi@yahoo.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2003, SDÜ,TEF,Bilgisayar Sistemleri Öğretmenliği
- **Yükseklisans** : Mezuniyet yılı, Üniversite, Anabilim Dalı, Program

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

**Hüner, E., Sever, M.** (2017). “Flywheel Energy Storage System Design and 3d Magnetic Analysis for Electromagnetic Coil Launcher”, 8th International Advanced Technologies Symposium IATS’17, October.

### DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER: