

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HALBACH DİZİLİMLERİNİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNA  
UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ferit GÜLER**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2013**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HALBACH DİZİLİMLERİNİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNA  
UYGULANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ferit Güler  
(504101018)**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Lale Tükenmez ERGENE**

**HAZİRAN 2013**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101018 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ferit GÜLER**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**HALBACH DİZİLİMLERİNİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNA UYGULANMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Lale Tükenmez ERGENE**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**        **Yrd.Doç.Dr. Özgür ÜSTÜN**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç.Dr. Kamuran Nur Bekiroğlu**  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**        **3 Mayıs 2013**  
**Savunma Tarihi :**     **7 Haziran 2013**



## ÖNSÖZ

Fırçasız doğru akım motorları, günlük hayatta kullanılan birçok elektrikli cihazın içerisinde yer almaktadır. Dünyada artan enerji sıkıntısı, böylesine yaygın kullanılan bu elektrik motorlarının performans ve verimliliğini önemli hale getirmiştir.

Bu amaçla yapılan çalışma, farklı mıknatıs dizilimlerinin motor performansına etkisini göstererek, verimli motor tasarımı için öneriler sunmuştur.

Tez çalışması sürecinde, tecrübelerini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Lale Tükenmez ERGENE'ye, destek ve yardımlarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli arkadaşlarım Abdullah POLAT, Aydın DİKKULAK ve Efe TURHAN'a verdikleri desteklerden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2013

Ferit Güler  
Elektrik Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı .....	1
1.2 Literatür Araştırması .....	2
<b>2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI.....</b>	<b>7</b>
2.1 Giriş.....	7
2.2 Konstrüksiyon .....	8
2.3 Çalışma Prensibi ve Temel Denklemler .....	9
2.4 FDAM Sürücü Sistemleri.....	12
<b>3. HALBACH DİZİLİMLERİ VE UYGULAMALARI .....</b>	<b>15</b>
3.1 Tarihçe ve Kullanım Alanları.....	15
3.2 Halbach Dizilimi Yapısı.....	15
3.3 Halbach FDAM Uygulamaları .....	17
<b>4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ .....</b>	<b>19</b>
4.1 Tarihçe ve Uygulama Alanları .....	19
4.2 Sonlu Elemanlar Teorisi .....	23
4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Manyetik Analiz .....	21
<b>5. HALBACH FDAM FEM MODELLEMESİ VE ANALİZLERİ .....</b>	<b>23</b>
5.1 Referans Motorun Modellenmesi ve Analizi .....	23
5.2 Halbach Dizilimlerinin Motora Uygulanması ve Analizi .....	30
5.3 Halbach Dizilimlerinde Mıknatıs Yüksekliğinin Performansa Etkisi.....	38
5.3.1 Mıknatıs yüksekliği etkisinin analitik analizi .....	39
5.3.2 Mıknatıs yüksekliği etkisinin FEM analizi .....	42
5.4 Halbach Diziliminin Kalkanlama Etkisi Analizi.....	46
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>51</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>53</b>



## **KISALTMALAR**

<b>FDAM</b>	: Fırçasız Doğru Akım Motoru
<b>EMK</b>	: Elektromotor Kuvveti
<b>FEM</b>	: Sonlu Elemanlar Yöntemi



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 5.1 : Referans motorun özellikleri .....	23
Çizelge 5.2 : Analizlerin, gerçek test değerleri ile karşılaştırılması .....	29
Çizelge 5.3 : Dizilimlerin mıknatıs polarizasyon açıları .....	32
Çizelge 5.4 : Motor varyasyonlarının güç ve verim karşılaştırması .....	36
Çizelge 5.5 : Halbach hava aralığı analitik analizinde kullanılacak geometrik parametreler .....	39



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1 :</b> Farklı mıknatıs dizilimlerine sahip FDAM'ların manyetik alan dağılımı karşılaştırması .....	2
<b>Şekil 1.2 :</b> Rotor boyunduruğu malzemesinin Halbach ve radyal dizilimli motorlarda hava aralığı akı dağılımına etkisi .....	3
<b>Şekil 1.3 :</b> Değişik dizilimler için hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı .....	4
<b>Şekil 1.4 :</b> Radyal mıknatıs dizilimi ile Halbach diziliminin vuru momentini karşılaştırması .....	5
<b>Şekil 2.1 :</b> İç rotorlu fırçasız doğru akım motoru .....	8
<b>Şekil 2.2 :</b> FDAM yapısı .....	8
<b>Şekil 2.3 :</b> Rotor mıknatıslarının değişik dizilimleri. ....	9
<b>Şekil 2.4 :</b> FDAM elektriksel ve manyetik eş değer devreleri. ....	10
<b>Şekil 2.5 :</b> Basitleştirilmiş motor sürücü devresi şeması. ....	12
<b>Şekil 2.6 :</b> Hız kontrolü diyagramı. ....	13
<b>Şekil 3.1 :</b> Halbach diziliminin elde edilmesi. ....	16
<b>Şekil 3.2 :</b> İç rotorlu ve dış rotorlu motorlar için çift kutuplu tek segmentli Halbach rotor yapısı. ....	17
<b>Şekil 3.3 :</b> Üçgen kesitli mıknatısla Halbach dizilimi. ....	18
<b>Şekil 4.1 :</b> İki boyutlu bir geometrinin sonlu elemanlara ayrılması. ....	20
<b>Şekil 4.2 :</b> İki boyutlu sonlu eleman. ....	20
<b>Şekil 5.1 :</b> Referans motorun laminasyon kesiti. ....	24
<b>Şekil 5.2 :</b> Referans motorun FEM modeli. ....	25
<b>Şekil 5.3 :</b> Referans motor sürücü modeli. ....	26
<b>Şekil 5.4 :</b> 60°'lik trapezoid anahtarlama sinyalleri. ....	26
<b>Şekil 5.5 :</b> Referans motorun akı dağılımı ve akı yoğunlukları. ....	27
<b>Şekil 5.6 :</b> Motor hızlanma eğrisi. ....	28
<b>Şekil 5.7 :</b> Motor kalkış durumu faz akımları. ....	28
<b>Şekil 5.8 :</b> Motor hava aralığı manyetik akı dağılımı. ....	29
<b>Şekil 5.9 :</b> Farklı geometri ve segment sayılarında uygulanan Halbach dizilimleri. ....	31
<b>Şekil 5.10 :</b> Farklı Halbach dizilimlerinin FEM modelleri. ....	33
<b>Şekil 5.11 :</b> Farklı Halbach dizilimlerinin akı dağılımı ve akı yoğunlukları. ....	34
<b>Şekil 5.12 :</b> Halbach dizilimlerinin moment karşılaştırması .....	35
<b>Şekil 5.13 :</b> Halbach dizilimlerinin hava aralığı akı dağılımı karşılaştırması. ....	36
<b>Şekil 5.14 :</b> Halbach dizilimlerinin hava aralığı akısı spektrum karşılaştırması. ....	37
<b>Şekil 5.15 :</b> Halbach diziliminin analitik manyetik alan modelinde kullanılacak geometrik parametreler. ....	39
<b>Şekil 5.16 :</b> Farklı mıknatıs yüksekliklerindeki Halbach dizilimlerinin hava aralığı akı dağılımları. ....	41
<b>Şekil 5.17 :</b> Halbach dizilimin artan mıknatıs yüksekliğinin hava aralığı akı dağılımına etkisi. ....	41
<b>Şekil 5.18 :</b> Analiz için modellenecek mıknatıs yüksekliği kademeleri. ....	42

<b>Şekil 5.19 :</b> Farklı mıknatıs yüksekliği kademelerinde radyal ve Halbach dizilimli motorlarda hava aralığı akı dağılımları. ....	43
<b>Şekil 5.20 :</b> Farklı mıknatıs yüksekliği kademelerinde radyal ve Halbach dizilimli motorlarda hava aralığı akı spektrum analizleri. ....	44
<b>Şekil 5.21 :</b> Halbach diziliminin kritik mıknatıs yüksekliği. ....	45
<b>Şekil 5.22 :</b> Farklı mıknatıs yüksekliği kademelerinde radyal ve Halbach dizilimli motorlarda verimlilik karşılaştırması .....	46
<b>Şekil 5.23 :</b> Radyal ve Halbach dizilimli motorların rotor manyetik akı yoğunluğu karşılaştırması.....	47



## HALBACH DİZİLİMLERİNİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNA UYGULANMASI

### ÖZET

Fırçasız doğru akım motorları, beyaz eşya sektöründen, otomotiv, uçak-uzay ve savunma sanayine kadar uzanan geniş bir uygulama yelpazesinde yaygınlıkla kullanılmaktadır. Günümüz ekonomisinin rekabet koşullarında, birçok sektörde yaygınlıkla kullanılan fırçasız doğru akım motorlarında düşük maliyet ve yüksek performans oldukça önem arz etmektedir. Yakın tarihte keşfedilen, parçacık hızlandırıcıdan, elektron depolama halkasına kadar birçok önemli uygulamada kullanılan Halbach mıknatıs dizilimlerinin alan kuvvetlendirme etkisi, kalıcı mıknatıslı elektrik makinelerinde de kullanılarak önemli performans gelişmelerine neden olmuştur.

Yapılan çalışmada, farklı yapılarıdaki Halbach mıknatıs dizilimleri, bulaşık makinesi sirkülasyon pompası uygulamasında kullanılan bir referans fırçasız doğru akım motoruna, belirli kısıtlamalar altında uygulanmıştır. Her bir Halbach diziliminden ortaya çıkan yeni fırçasız doğru akım motorları, mıknatıs yapıları hariç tamamen özdeş olup, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu şekilde, doğrudan mıknatıs dizilimine bağlı performans değişiklikleri elde edilerek, farklı dizilimlerin performans karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmada, Halbach dizilimlerinde, segment geometrisi ve segment sayısının, performansı ne yönde etki ettiğine dair sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, her bir Halbach dizilimi konfigürasyonunun, bu kısıtlamalar altında, radyal mıknatıs yapısına sahip olan referans motor performansının gerisinde kaldığı ortaya çıkmıştır. Bu durum, literatürdeki, motor tasarımında, mıknatıs yüksekliğinin belirli bir değerin üzerinde iken Halbach diziliminin performansa katkı sağladığı yönündeki bulgular ile açıklanmıştır. Bu bulgular üzerine, radyal ve Halbach dizilimlerinde mıknatıs yüksekliğinin performansa etkisi analitik ve sonlu elemanlar analizi ile ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlarda, literatürdeki bulgular doğrulanmış olup, referans motor tasarımı için, Halbach mıknatıs diziliminin faydalı olduğu minimum mıknatıs yüksekliği değeri tespit edilmiştir.

Halbach dizilimlerinin alan kuvvetlendirme etkisinin, performans analizlerinin yanında, alan zayıflatma etkisi de analiz edilmiştir. Radyal mıknatıs dizilimine sahip referans motor ile yapılan karşılaştırmada, rotor boyunduruğundaki manyetik akı dağılımının, Halbach dizilimine sahip motorlarda oldukça düşük olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu sayede, Halbach dizilimleri kullanılarak, rotor tasarımında manyetik olmayan boyunduruk kullanımı ve ya oyuk rotor tasarımı mümkün hale gelmiştir. Bu şekilde tasarlanacak motorların, maliyet ve performans faydaları ortaya konulmuştur.



## **ANALYSIS OF HALBACH ARRAY VARIATIONS ON BLDC MOTOR**

### **SUMMARY**

Brushless DC motors are commonly used in wide range of area. While brushless DC motors used in automotive, space and military applications require high reliability and high performance, they require low cost and high efficiency in home appliances. Regarding of the consumer market, obtaining higher performance with the same cost level is a remarkable and competitive factor. Since electrical motors are widely used in almost all industries and every house, the efficiency rate is getting more important factor regarding to the energy resource issue in the world. Government policy and legal regulations also encourages the research and development on efficiency projects. For that reason, this work focuses on analysis of brushless DC motor performance and efficiency for various types of magnet assemblies under constraints.

A special magnetization method, which is called Halbach or multipolar magnet array discovered by J.C. Mallinson in 1973. However, the name of the physicist at Lawrence Berkeley Laboratory, Klaus Halbach is given to this magnet array who used this magnet array on particle accelerator application. The first application of Halbach magnetization method was magnetic tape recorder. This technique is used in some important applications like electron storage rings and particle accelerator devices. Today, it is also used in modern science applications like particle accelerator infrastructure in CERN experiment.

This magnet array is the combination of longitudinally and perpendicularly polarized magnet. A longitudinally polarized magnet array has same magnetic field direction on upper and bottom sides. However, a perpendicularly polarized magnet array has opposite magnetic field direction on upper and bottom sides. For that reason, this magnet combination eliminates magnetic field on one side, and strengthen almost twice as large of normal magnet field on the other side. If this magnet array is designed with a cylindrical shape, it is possible to use it permanent magnet electrical motors.

Recent researches show that this magnet arrangement has also a remarkable effect on the performance of permanent magnet electrical motors. A brushless DC motor, designed with optimized Halbach magnet arrangement can offer higher efficiency, acceleration, torque production, dynamic response, and lesser torque ripples, volume, inertia, weight, and cost. In this work, the performance effect of Halbach magnet array variations on a brushless DC motor is investigated. A conventional brushless DC motor which is designed for dishwasher main circulation pump application is modified to Halbach arrayed motor without any change on magnet material volume. Under these circumstances, a various type of Halbach array is applied and analyzed. The detailed finite-element analysis results are carried out to compare and verify the performance changes.

First, the reference brushless DC motor which is used for dishwasher main circulation pump application is modeled with finite elements. In transient analysis,

this motor model reached to nominal speed of test motor under the nominal load condition of test motor. According to comparison of finite element analysis results and motor test results, the reference brushless DC motor model is verified with high accuracy.

After verification of the reference motor, different Halbach magnet configurations will be applied for analysis. There are four Halbach magnet configuration that are selected for analysis. In order to find out the segmentation effect, there are three magnet assembly with arc shaped geometry in 8, 12 and 16 segmentations. The fourth magnet assembly is triangular shaped with 16 segment Halbach array. This assembly is also chosen in order to show the effect of segment geometry. Since the geometry of triangular shaped magnets does not allow to apply lesser segmentation to the reference motor structure, only 16 segmented magnet configuration will be analyzed. The polarization directions of all configurations are selected as exterior field strengthen Halbach cylinder since the motor is interior rotor brushless DC motor. Thus, the magnetic field is directed to the air gap side, and rotor yoke flux density will be weakened by the way.

The reference motor magnets are redesigned with selected Halbach configurations. Four different brushless DC motor models are designed for finite element analysis. These motors are identical except their magnet configuration. They have also same magnet material and magnet volume.

After the finite element analysis of all magnet configurations, it is obtained that the increase on segmentation improves the sinusoidal shape and magnitude of air gap flux distribution. According to spectrum analysis of air gap magnetic field distribution, 3<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> harmonics are almost eliminated for 12 and 16 segmented motor. In addition, the main component increases in parallel with the number of segmentation. This case shows that increase on Halbach segmentation improves the motor performance and air gap field shape. Triangular shaped Halbach magnet array has higher value of air gap flux density in comparison with arc shaped Halbach arrays. As a result, triangular shaped array is optimum way to use Halbach magnet array to the reference motor, which provides higher efficiency and performance in all Halbach configurations.

In the analysis result, a performance comparison between radial and Halbach magnet configurations shows that Halbach arrays affect the performance negatively under the magnet constraint. According to some researches in literature, Halbach arrays are useful for performance and efficiency when magnet height reaches a critical value. Under this critical value for magnet height, radial magnetization is more reasonable to use for performance. For that reason, radial and Halbach configurations of reference brushless DC motor is analyzed without magnet constraint in order to show magnet height effect.

Before the finite element analysis, analytical magnetic field equations in cylindrical coordinate system are obtained for Halbach magnetized interior rotor structure. For this purpose, infinitely permeable back iron, infinitely long machine and ideal Halbach magnetization assumptions are considered to solve scalar magnetic potential equations. The solution of scalar magnetic potential under ideal boundary conditions, gives the magnetic field equations for interior and exterior sides of rotor cylinder. These equations are functions of geometric parameters of rotor and air gap. The variation of magnet height is applied to this equation and air gap magnetic field curves are obtained. Analytic results show that increase on magnet height improves

the air gap magnetic field but this improvement reaches to a limit value. Increasing the magnet height around the limit value will not improve the air gap magnetic field noticeably.

The reference motor and Halbach motor are remodeled in different magnet height levels. Four equally increasing magnet height levels are applied to the radial and Halbach magnetized motors. New motor models that are designed with these magnet height levels, are analyzed with finite element and compared.

After the finite element analysis, it is obtained that Halbach magnetized motor performance is more reactive than radial magnetization to change on magnet height. Eventually, unit increase on magnet height provides higher improvement on performance for Halbach magnetization in comparison with radial magnetization. For the initial magnet height value, radially magnetized reference motor has higher air gap flux density than Halbach magnetized motor. Since Halbach magnetization is more reactive to magnet height change, after the magnet height reaches the critical value, Halbach magnetization exceed the air gap flux density of radial magnetization. This critical magnet height value is calculated for reference motor geometry after the finite element analysis. Besides, it is shown that the critical magnet height is also valid for the efficiency of motors.

Halbach magnetization has also field weakening effect. This effect provides a shielding for rotor yoke. After the finite element analysis of different Halbach configurations, the flux density of rotor yoke is remarkably low in comparison with radial magnetization. In order to show this effect, magnetic field is analyzed in different height levels in the rotor yoke for both Halbach and radially magnetized motors. Results show that the magnetic field on the rotor of Halbach magnetized motor is dramatically low in comparison with radial magnetized motor.

Since the magnetic field is low in rotor yoke of Halbach magnetized motors, it is possible to design a hollow rotor yoke or non-magnetic rotor yoke. These designs provide many advantages like low inertia, high acceleration and dynamic response, elimination of eddy current losses and reduction on total weight and costs.

In conclusion, a brushless DC motor design with Halbach magnet arrays requires an analysis about critical magnet height and its geometrical feasibility. It is not a reasonable way to use Halbach magnet arrays below the critical magnet height unless the rotor is designed with non-magnetic material. This non-magnetic rotor yoke designs provides less inertia and high acceleration features that meet the requirements of some specific applications. Furthermore, using more segmented Halbach array contributes to sinusoidal shape of air gap flux distribution and motor efficiency. In segment geometry comparison, triangular shaped Halbach arrays offer higher performance.



# 1. GİRİŞ

## 1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Fırçasız doğru akım motorları, klasik doğru akım motorlarında kullanılan uyarma sisteminin yerini, kalıcı mıknatısların alması ile ortaya çıkmıştır. Klasik doğru akım motorlarından farklı olarak, fırça ve kolektör sisteminin bulunmaması, yüksek verim ve performansı ile fırçasız doğru akım motorlarını bir adım öne çıkarmış ve modern endüstrinin ihtiyaçlarını karşılayabilen bir konuma getirmiştir. Bu sayede fırçasız doğru akım motorları, yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren hava-uzay, otomotiv ve savunma teknolojilerinden, beyaz eşya ve ev elektroniği gibi tüketici ürünlerine kadar uzanan geniş bir sektörde önemli bir rol oynamaktadır.

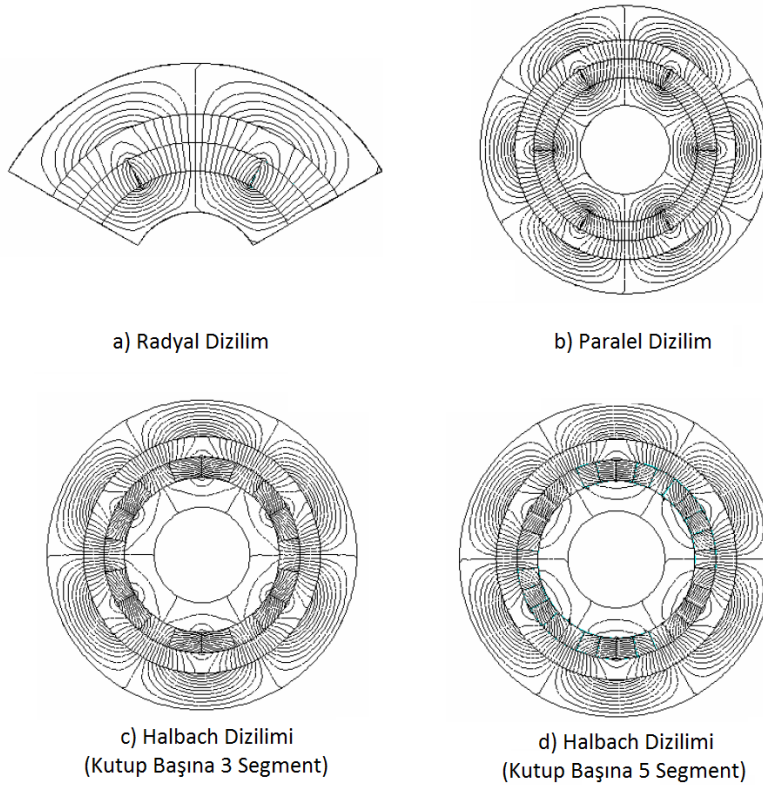
Gelişen teknoloji ve artan pazar rekabeti göz önüne alındığında, fırçasız doğru akım motorları hem performansa hem de sektörel ihtiyaçlara yönelik geliştirilmeye açık bir konudur. Bu teknolojik alanda atılacak yenilik adımları, böylesine büyük bir pazarda önemli rekabet kozları ortaya çıkarma potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle yapılan bilimsel çalışmalar, teknolojik gelişime katkısının yanında, ekonomi açısından da kayda değer bir nitelik taşımaktadır. Özellikle dünyada artan enerji sıkıntısı, hemen hemen her hane ve endüstride bulunan bu motorların yüksek verimli olma gereğini ön plana çıkarmış olup, bu şartı destekleyen yasal düzenlemeleri de beraberinde getirmiştir.

Son yıllarda Halbach dizilimi yöntemi, birçok teknolojik alanda olduğu gibi, fırçasız doğru akım motorlarına da uygulanarak, bu motorların geliştirilmesinin önünü açmıştır. Literatürde, bir çok farklı uygulamaya yönelik, geometrik, elektriksel devre ve malzeme parametreleri üzerinden geniş çaplı optimizasyon çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak, Halbach dizilimleri, mıknatıs malzemesi ve stator konstrüksiyonu gibi kısıtlamalar çerçevesinde FDAM üzerine uygulanarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilecektir. Bu analizler sonucunda, farklı Halbach dizilimlerinin performansa etkisi bu kısıtlamalar çerçevesinde ortaya çıkarılacaktır. Bununla beraber, Halbach dizilimlerinde mıknatıs yüksekliğinin hava

aralığı manyetik akı dağılımına etkisi analitik ve sonlu eleman analizleri ile ortaya konulacaktır. Ayrıca bu dizilimlerin sağladığı kalkanlama etkisi de ele alınarak, faydaya dönüştürülme yönünde öneriler de sunulacaktır.

## 1.2 Literatür Araştırması

Literatürde Halbach diziliminin fırçasız doğru akım motorları üzerine uygulanması ile ilgili çalışmalar genellikle hızlanma, moment üretimi, verimlilik ve dinamik tepki gibi özellikleri geliştirmeye odaklanmış çalışmalardır. Bu konuda yapılan bir çok çalışma, Halbach dizilimi ile verimlilik ve hızlanma gibi çıktılara odaklı optimizasyon ya da radyal ve paralel tipte çeşitli mıknatıs dizilimleri ile tasarlanan fırçasız doğru akım motorlarının performans karşılaştırmasını kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar genel olarak, Halbach dizilimi ile tasarlanan motorların, gerekli tasarım kriterleri sağlandığında önemli performans özellikleri kazandığı yönündedir.

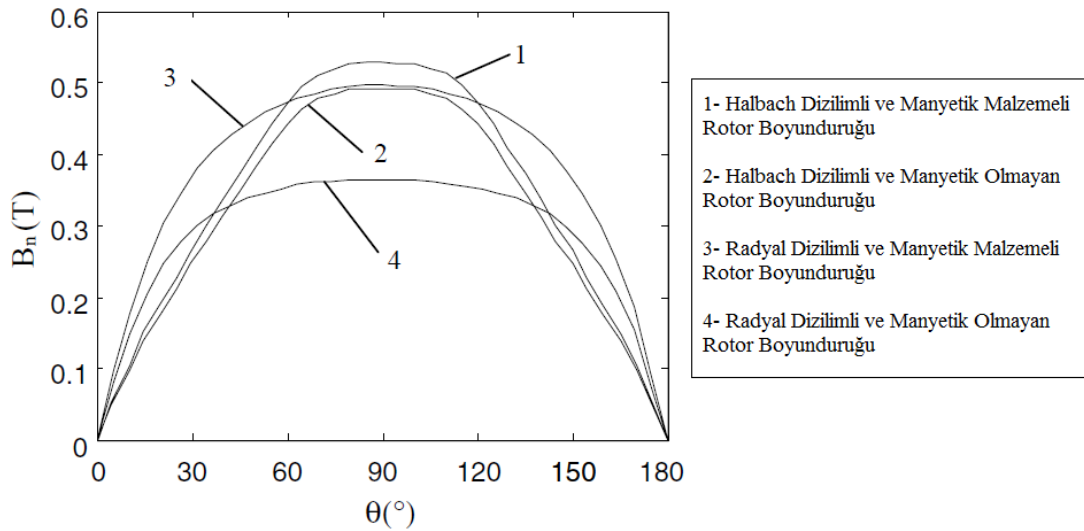


**Şekil 1.1:** Farklı mıknatıs dizilimlerine sahip FDAM'ların manyetik alan dağılımı karşılaştırması [16].



Halbach mıknatıs diziliminin en önemli özelliği olan alan kuvvetlendirme ve manyetik kalkanlama yeteneği kullanılarak, iç rotorlu FDAM'larda rotor boyunduruğunun alan yoğunluğunda kayda değer bir azalma elde edilebilmektedir. Bu durum Şekil 1.1'de yapılan rotor manyetik alan yoğunluğu karşılaştırmasındaki görülmektedir. Karşılaştırılma neticesinde görüldüğü üzere, Halbach dizilimine sahip motorların rotor kısmındaki akı yoğunlukları, radyal ve paralel dizilime sahip motorlara oranla çok düşüktür.

Bu sayede rotor boyunduruğunun içi oyuk olarak tasarımı ve ya mıknatıs haricinde manyetik malzeme kullanmadan rotor tasarımı mümkün hale getirilmiştir. Böylelikle, daha az malzeme kullanarak, daha hafif ve düşük eylemsizliğe sahip bir rotor yapısı tasarlama mümkün hale gelir. Bu şekilde tasarlanan motorlar, hızlanma ve çalışma durumu değişimlerine çabuk uyum sağlayabilen, yüksek dinamik tepki özelliğe sahip olurlar. Bu yönde yapılan bir çalışmadaki karşılaştırmada klasik dizilime sahip bir motorun eylemsizliğinin, optimize edilmiş bir Halbach dizilimine sahip motora oranla bir buçuk katından fazla eylemsizlik momentine sahip olduğu, aynı zamanda rotor kütlelerinin de iki katı olduğu ortaya çıkmıştır. Buna rağmen Halbach dizilimine sahip motor daha fazla moment üretebilmiştir [14].

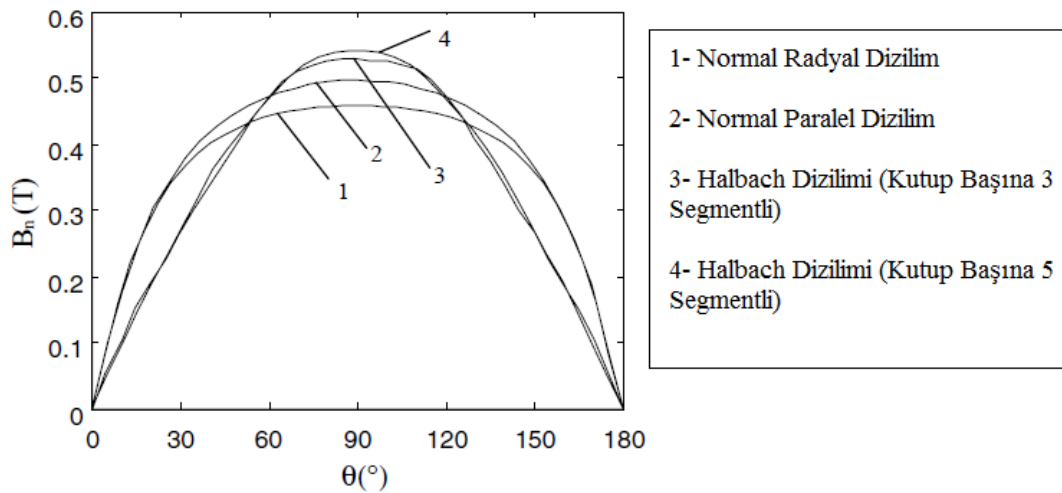


**Şekil 1.2:** Rotor boyunduruğu malzemesinin Halbach ve radyal dizilime sahip motorlarda hava aralığı akı dağılımına etkisi [16].

Buna paralel olarak manyetik malzeme kullanmadan tasarlanan rotor boyunduruğuna sahip FDAM'larda aynı mıknatıs hacminde Halbach dizilimlerinin, radyal dizilimden daha fazla moment ürettiği ortaya konulmuştur [6-16]. Bu durum,

Şekil 1.2'deki hava aralığı akı yoğunluğu karşılaştırması ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuç, Halbach diziliminin, rotor boyunduruğundaki alan zayıflatma etkisi sonucu ortaya çıkan bir durumdur. Bu nedenle, rotor malzemesinin manyetik olmayan bir malzeme ile değişmesi, rotor boyunduruğunun zaten akı yoğunluğu düşük olan bir bölge olmasından ötürü, performansta küçük bir azalmaya neden olur.

Halbach dizilimlerinin FDAM üzerindeki diğer bir etkisi de hava aralığı manyetik akı dağılımının sinüzoidal şekline katkısıdır. Bu etki, dizilimin hava aralığındaki akı dağılımının tepe değerini yükseltmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca Halbach dizilimde kutup başına düşen segmenti arttırarak sinüzoidal şekli daha da iyileştirmek mümkündür [16]. Bu durumu, Şekil 1.3'de yapılan karşılaştırmada görmek mümkündür.



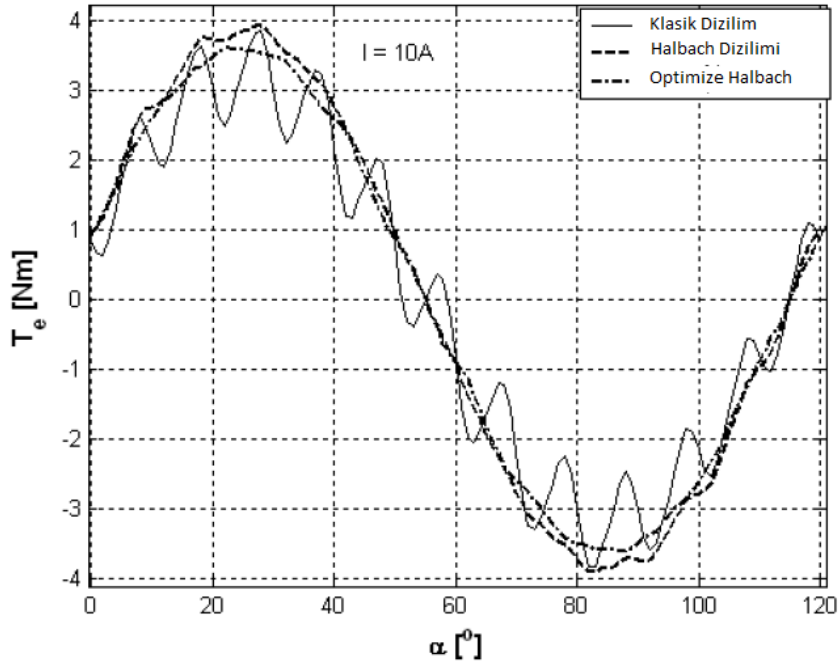
**Şekil 1.3:** Değişik dizilimler için hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı [16].

Bu dizilimin moment üretimi ve verimliliğe de belirli şartlar altında katkısı bulunmaktadır. Bu şartlardan en önemlisi mıknatıs yüksekliğinin belirli bir değerin üzerinde olması koşuludur. Bu kritik değer aşılararak tasarlanan Halbach dizilimli FDAM'ları aynı koşullarda klasik radyal dizilimli motorlardan daha yüksek moment üretme ve daha verimli olma yetisine sahiptir [6-15-16]. Rotor tasarımı, bu kritik noktadan sonra mıknatıs yüksekliğindeki artış, moment ve verim artışı olarak geri dönmektedir.

Literatürde Halbach dizilimi, vuru momentinin azaltılması amacıyla da çeşitli çalışmalarda da kullanılmıştır. Düşük hızlı uygulamalarda ortaya çıkan en büyük

problem vuruuntu momenti kaynaklı moment dalgalanmaları ve bununla bağlantılı olarak meydana gelen harmoniklerdir. Bu probleme çözüm olarak oluksuz motor tasarımı çözümü önerilmiştir. Fakat bu tasarım moment dalgalanmalarını azaltmasına rağmen hava aralığı manyetik akı yoğunluğunda ve dolayısıyla moment üretiminde azalmaya neden olmaktadır. Bu noktada Halbach dizilimi ile bu problemi hava aralığı akı yoğunluğunda azalma olmaksızın çözmek mümkündür [9].

Yapılan bir diğer çalışmada elde edilen sonuç, Halbach diziliminin vuruuntu momentini klasik dizilimli bir FDAM'a oranla tam altı kat azaltı azalttığı yönündedir (Şekil 1.4 ) [1]. Bu haricinde başka bir çalışmada sıfır vuruuntu momentine sahip oyuk rotorlu Halbach FDAM tasarım modeli uzay ve havacılık uygulamaları için önerilmiştir [12]. Yapılan bu çalışmalar, dizilimin vuruuntu momentinin azaltılmasında önemli bir katkı sağladığını kanıtlamaktadır.



**Şekil 1.4:** Radyal mıknatıs dizilimi ile Halbach diziliminin vuruuntu momenti karşılaştırması [1].

Literatürde, Halbach dizilimine sahip fırçasız doğru akım motoru tasarım optimizasyonu çalışmaları da mevcuttur. Bu optimizasyon çalışmaları, genellikle hava aralığı, rotor ve stator çapları, motor uzunluğu ve mıknatıs boyutları gibi bir çok geometrik değişkeni kapsamaktadır. Dolayısıyla çoklu değişkenleri kararak rasgele aramayı yüksek bir performansla yapabilen genetik algoritma metodu

yaygınlıkla kullanılmıştır. Bu yöntemde değişken değerlerden rasgele kombinasyonlar oluşturulur. Bu kombinasyonlardan, başlangıç popülasyonu oluşturulur. Optimizasyon hedefine göre uygunluk durumu ve ya değeri belirlenir. Bu uygunluk değeri üzerinden popülasyondan en iyiler seçilir. Bu en iyi kombinasyon karılarak yeni bir popülasyon elde edilir. Bu şekilde üretilen her bir nesil daha iyiye doğru evirilerek uygunluk koşulunu daha verimli yerine getirir ve optimizasyon hedefine yaklaşılr. Bu sayede, fırçasız doğru akım motoru optimizasyonu, bir çok değişken ile kolaylıkla gerçekleştirilir.

Optimizasyon çalışmaları incelendiğinde, tüm bu değişkenlerin arasında mıknatıs yüksekliğinin hava aralığı akı yoğunluğunda en belirleyici faktörlerden biri olduğu gözlemlenmiştir [13]. Bu faktör aynı zamanda, akım yoğunluğu, bakır kayıpları ve dolayısıyla verimliliği etkileyen bir parametredir. Bu nedenle, mıknatıs yüksekliği, Halbach diziliimli motor tasarımların da ortaya çıkan en önemli parametrelerden biridir.

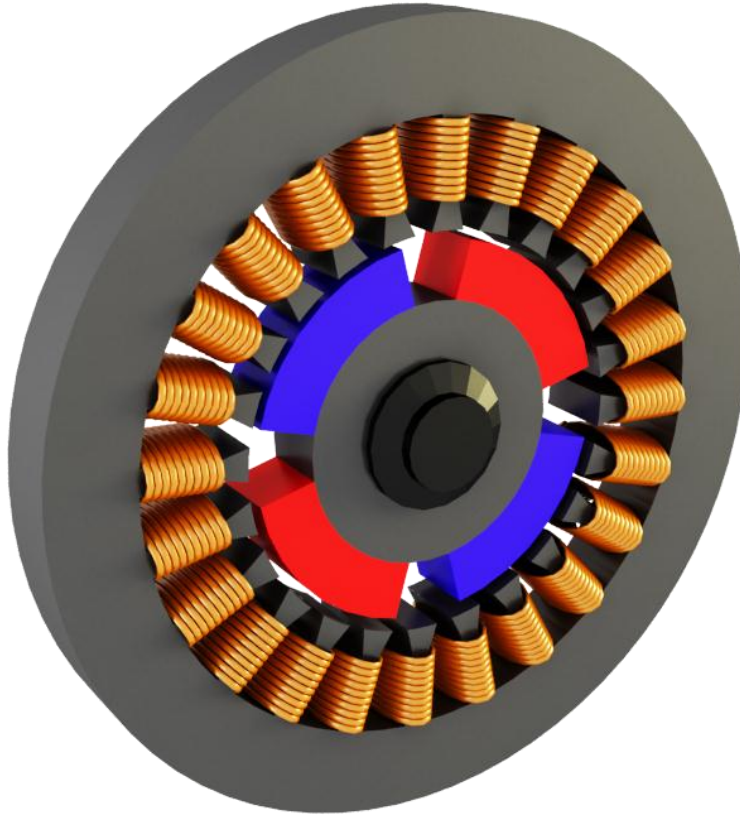
## 2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI

### 2.1 Giriş

Fırçasız doğru akım motorları, AC senkron motor kategorisine girmektedir. Senkron olarak kategori edilmesinin nedeni, rotor ve stator tarafından üretilen manyetik alanların bir birine eş frekansa sahip olmasıdır. Bu motorlar doğru akımla beslendiğinden dolayı doğru akım motoru olarak adlandırılır. Fakat doğru akım sadece motor sürücü devresinin besleme gerilimidir. Motor sürücü devresi, motor sargılarına bu doğru akımı evirerek verdiği için dolayı bu motor AC olarak kategorize edilir [3].

Fırçasız doğru akım motorları fırçalı doğru akım makinelerindeki problemlerin çözümü olarak ortaya çıkmıştır. Bu motorlar her hangi fırça ve ya kolektör düzeneğine ihtiyaç duymadığı için dolayı klasik doğru akım motorlarında görülen mekanik sürtünme sonucu ortaya çıkan kayıplar ve bakım gereksinimi gibi problemleri ortadan kaldırmıştır. Bu gelişim, doğru akım motorlarında yüksek performans, verimlilik, yüksek moment-akım oranı, düşük bakım ihtiyacı ve yüksek dinamik tepki gibi özelliklerin ortaya çıkmasının yanında, düşük ses seviyesinde, geniş hız aralığında çalışmasına olanak sağlamıştır. Bu avantajlarının yanında konum algılayıcısı ihtiyacı ve beraberinde getirdiği sürücü sistemi kompleksliği ve kalıcı mıknatısların yüksek maliyetleri de dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat konum algılayıcısının getirdiği dezavantaj, EMK analizine dayanan geri beslemeli alternatif sürüş teknikleriyle, ortadan kaldırılabilir.

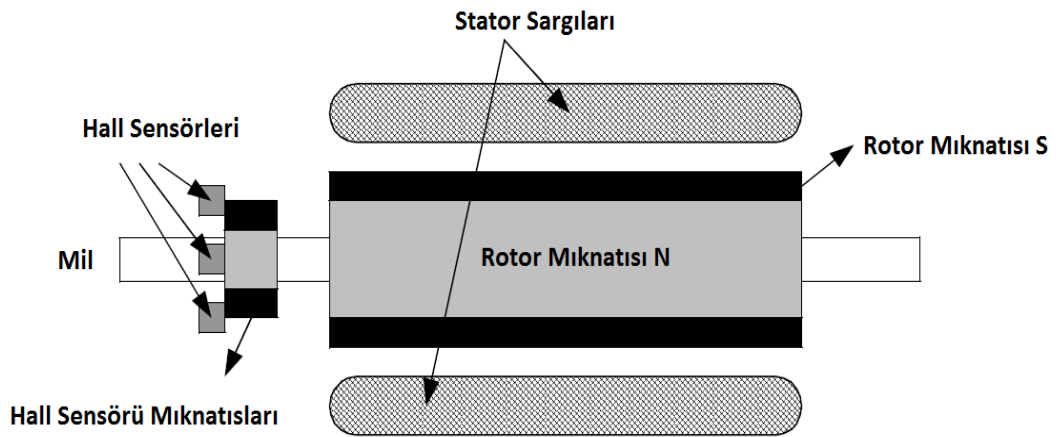
Bu motorlar, kullanıldığı uygulamaya göre, farklı faz ve kutup sayılarında, iç rotorlu ve ya dış rotorlu yapıda olabilmektedir. Şekil 2.1’de iç rotorlu bir fırçasız doğru akım motoru görülmektedir.



**Şekil 2.1:** İç rotorlu fırçasız doğru akım motoru.

## 2.2 Konstrüksiyon

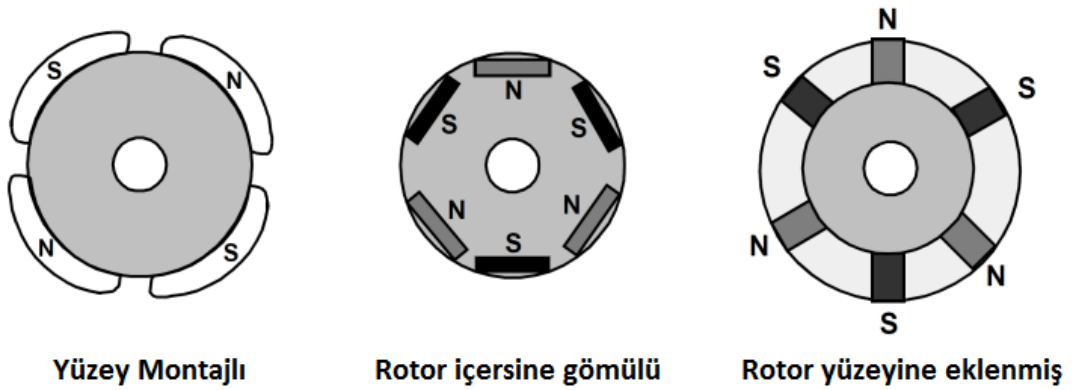
Fırçasız doğru akım motorları yapı olarak rotor ve stator bölümlerinden oluşmaktadır. Bu motorların genel yapısı Şekil 2.2’de görülmektedir.



**Şekil 2.2:** FDAM yapısı [11].

Rotor kısmında kalıcı mıknatıslar ve manyetik laminasyon malzemeden oluşturulan rotor boyunduruğu mevcuttur. Kalıcı mıknatıs olarak ferrite ve ya neodyum gibi nadir toprak mıknatısları kullanılmaktadır. Ferrite mıknatıslar ucuz olmasına rağmen, Neodymium (Nd), Samarium Cobalt (SmCo), Ferrite ve Boron (NdFeB) gibi nadir toprak mıknatısları kadar yüksek akı yoğunluğuna sahip değildir [11]. Rotorun merkezinde bulunan mil, mekanik yükü bağlantıyı kuran yapı olup, üzerinde konum bilgisi veren algılayıcılar bulundurulur.

Stator da rotora benzer olarak manyetik laminasyonlar ile kurulu olup, oluk yapılarına sahiptir. Bu oluk yapıları içerisinden motorun faz sargıları geçmektedir.



**Şekil 2.3:** Rotor mıknatıslarının değişik dizilimleri [11].

Şekil 2.3’de kalıcı mıknatısların farklı montaj şekilleri görülmektedir. Mıknatıslar yüzey mıknatıs olabildiği gibi, değişik geometriler ile rotor içersine gömülü olarak da tasarlanabilmektedir. Bu durum uygulama gereksinimlerine göre tercih edilen bir tasarım seçeneğidir.

FDAM’larda mekanik komutasyon olmadığından dolayı sürücü topolojisine göre yapısında rotor pozisyonunu tespit eden konum algılayıcıları bulunabilmektedir. Motor sürücü devresindeki yarı iletken elemanların gerçekleştirdiği polarizasyonun senkron olması açısından, bu algılayıcılardan gelen sinyaller önem arz etmektedir.

### 2.3 Çalışma Prensibi ve Temel Denklemler

Bir motorun en temel işlevi moment üretimidir. FDAM’larda bu işlevi yerine getirmek için stator ve rotor tarafında üretilen manyetik alanların etkileşimi gerekmektedir. Bu iki alan bir birlerini 90°’lik açıyla kestiği zaman maksimum moment elde edilir. Bu nedenle motor sargılarına, fırça ve kolektör düzeneği

olmadığından dolayı evirici yapısındaki motor sürücü devresi ile elektronik komutasyon uygulanır. Motor sürücü devresi aynı zamanda sargılara uygulanan gerilimin genliğini bir kıyıcı ya da benzer bir topoloji ile kontrol ederek hız ve moment kontrolünü mümkün kılmaktadır.

Elektik motorlarında, bir motorun temel fonksiyonu olan moment üretimi için elektromekanik enerji dönüşümü gerekir. Bu nedenle motora elektrik enerjisi verilerek bu dönüşüm ile mekanik enerji elde edilir. FDAM'a uygulanan elektrik enerji bileşenleri olan gerilim ve akımın neticesinde oluşan manyetik alan ve ters EMK, Maxwell denklemlerinden elde edilen ifadelerle aşağıdaki denklemlerde görülmektedir [7] .

$$\nabla \times (v \nabla \times \vec{A}) = \vec{J} + v(\nabla \cdot \vec{M}) \quad (2.1)$$

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (2.2)$$

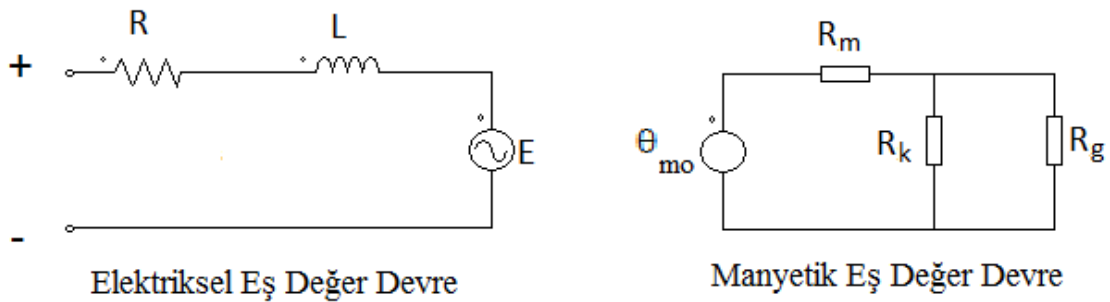
$$\lambda_{abcs} = L_s i_{abcs} + \lambda'_m \quad (2.3)$$

$$\lambda'_m = \lambda'_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \left[ -\frac{R}{L} \cdot i_a(t) \right] + \left[ -\frac{1}{L} \right] \cdot \{V_a - E_a(t)\} \quad (2.5)$$

Denklemlerde,  $\vec{A}$  manyetik vektör potansiyeli,  $\vec{J}$  akım yoğunluğu,  $\vec{M}$  kalıcı mıknatıs manyetik vektörü,  $\lambda'_m$  akı bağıntısı genliği,  $E_a$  ters elektromotor kuvveti (EMK),  $R$  ve  $L$  armatür direnci ve endüktansı,  $i_a$  ise armatür akımıdır.

FDAM elektriksel ve manyetik eş değer devresi ise Şekil 2.4'te görülmektedir.



**Şekil 2.4:** FDAM elektriksel ve manyetik eş değer devreleri.



Elektriksel eş değer devrede,  $R$  armatür direnci,  $L$  armatür endüktansı ve  $E$  ise üretilen EMK'dir. Manyetik eş değer devrede ise,  $\theta_{mo}$  mıknatıs tarafından üretilen manyetik gerilim,  $R_m$  mıknatıs relüktansı,  $R_g$  hava aralığı relüktansı,  $R_k$  ise kaçak akı relüktansıdır. Manyetik devreden görüldüğü üzere, manyetik akı hava aralığından aktarılırken, mıknatısın kendi relüktansı kaçaklara sebep olurken, kaçak akı relüktansı da akı kayıplarına neden olan, verimlilikle ters orantılı çalışan etmenlerdir.

$$T_d = k_t i_a \quad (2.6)$$

$$E_f = k_e n \quad (2.7)$$

$T_d$  motor moment,  $E_f$  ters EMK,  $k_t$  moment sabiti,  $k_e$  ters EMK sabiti ve  $n$  ise motor hızıdır.

Yukarıdaki denklemler, FDAM'da elektriksel ve mekanik güç bileşenlerinin dengesini açıklamaktadır. Motorun, başlangıç durumunda hızı sıfır olduğundan dolayı, ters EMK bileşeni sıfırdır (2.7). Bu koşulda, motora uygulanacak gerilim, doğrudan, armatür direnci ve endüktansı üzerine bineceğinden, ilk kalkış sırasında faz akımı yüksek bir değerden başlayacaktır. Bu durumda, başlangıçta yük moment ve eylemsizliği yenebilmek için, bu yüksek akım, denklem 2.6'da görüldüğü üzere yüksek bir moment üretecektir. Geçici hal durumunda hızlanmaktan olan motorun üreteceği ters EMK denklem 2.7'de görüldüğü üzere artış gösterir. Besleme geriliminin sabit olduğu bir koşulda, denklem 2.5'e göre, artan ters EMK ile makinenin faz akımlarında geçici hal sürecinde azalma meydana gelir ve moment bileşeninde zayıflama olur. Basitçe, motorun kalkış sürecinde mekanik olarak moment, hız bileşenine, elektriksel olarak da akım, ters EMK bileşenine dönüşür.

Denklemlerden görüldüğü üzere sabit gerilimde ters EMK artışı akımın azalması anlamına gelir. Ters EMK ise rotor hızının fonksiyonu olup (2.7) yüksek hızlarda etkili bir büyüklük haline gelir. Bu nedenle yüksek hızlarda çekilen akım düşük olur. Moment de çekilen akımın fonksiyonu olduğundan (2.6) yüksek hızda çekilen az akım momentin de az olduğu anlamına gelir.

Elektromekanik güç dengesinden elde edilen FDAM moment denklemi aşağıda görülmektedir.

$$T_e = \frac{\sum_{m=1}^{f_{az sayisi}} e_{ph-m}(t) \cdot i_{ph-m}(t)}{\omega_r} \quad (2.8)$$

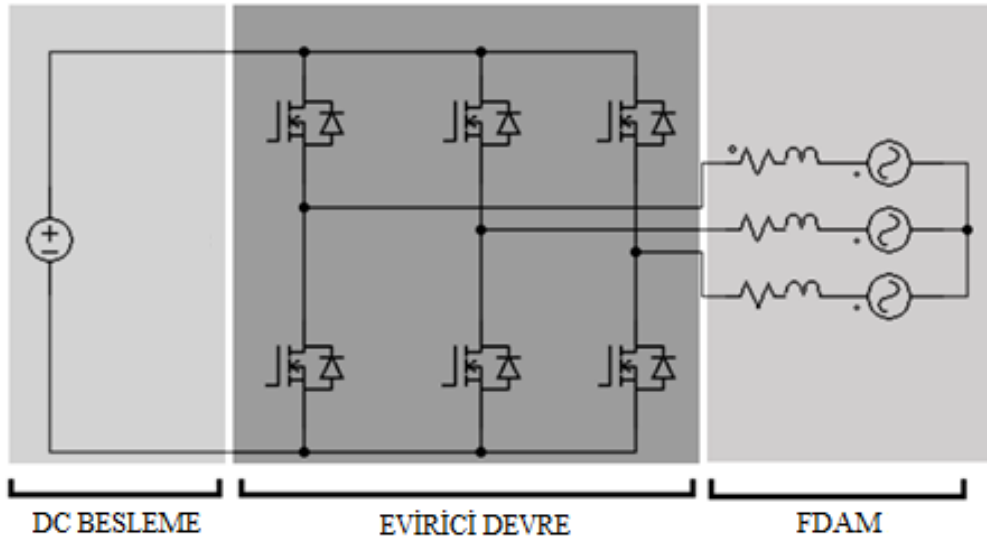
Üretilen moment, geçici halde daha çok yükün hızlanması ve eylemsizliğinin yenilmesine harcanırken, denge konumunda ise yük momenti, mekanik sürtünme gibi faktörlerden dolayı oluşan kayıplar tarafından tüketilir (2.9).

$$T_e - T_f - T_{load} = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (2.9)$$

(B: Viskoz sürtünme katsayısı, J: Toplam eylemsizlik,  $T_f$ : Coulomb sürtünme momenti)

## 2.4 FDAM Sürücü Sistemleri

FDAM sürücü sistemleri, motor fazlarını uygun polaritede süren, hız ve moment kontrolü yapabilen, ihtiyaca göre farklı güç elektroniği topolojilerinde tasarlanan evirici yapıdaki sistemlerdir. Bu evirici köprüler, motorun faz sayısı kadar bacağına sahiptir. Sürücü devresi FDAM sistemi içerisine dahil edildiğinde, doğru akımla çalışan bir yapı haline gelir. Normalde, sürücü devresi, motoru evirilmiş bir akım ile besler. Şekil 2.5'te basitleştirilmiş bir FDAM sürücü şeması görülmektedir.

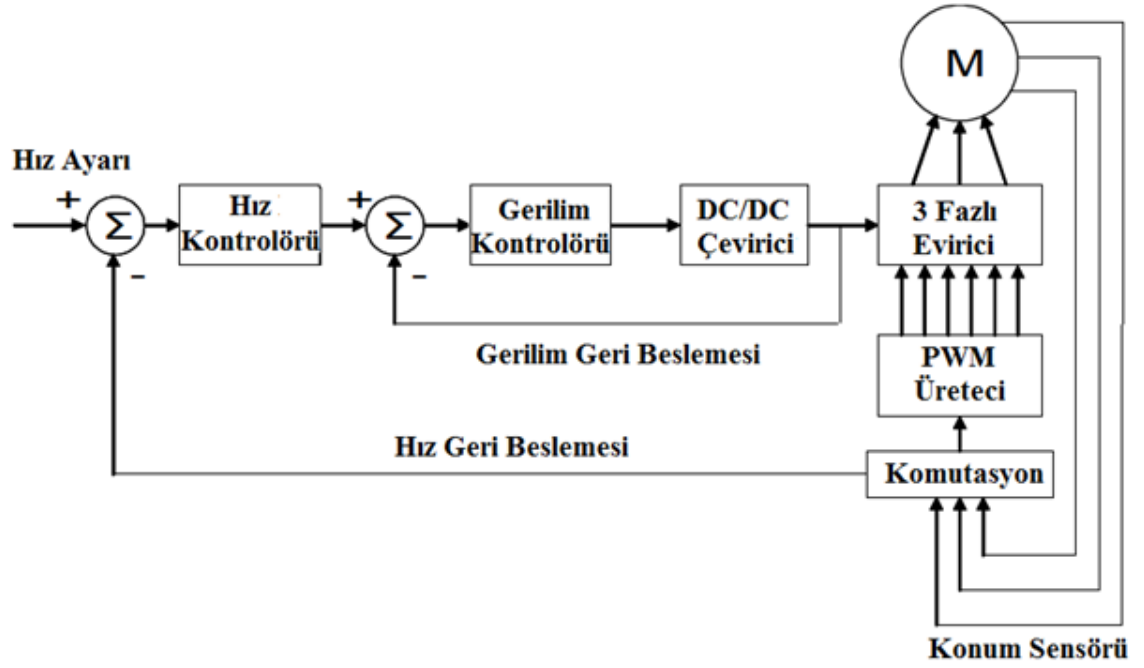


**Şekil 2.5:** Basitleştirilmiş motor sürücü devresi şeması.

Fırçasız doğru akım motorunun çalışması için stator sargıları doğru sırada enerjilendirilerek senkron bir polarizasyon elde edilmelidir. Bu nedenle rotor pozisyonu bilgisi bu senkronizasyon için önem arz eder.

Rotor pozisyonu bilgisi, konum algılayıcıları aracılığıyla ve ya ters EMK'nın analizi ile algılayıcısız olarak elde edilir. Bu konum bilgilerine göre, evirici yapısında

bulunan yarı iletken köprünün ilgili bacakları devreye sokularak, senkron evirme işlemi başlar. Sonuç olarak manyetik alanların senkronlanması sağlanır. Bu kapalı çevrim içerisinde motorun hız kontrolü mümkündür. Fırçasız doğru akım motorlarında hız kontrolü, gerilim ile kontrol edildiğinden dolayı, DC bara gerilimi DC-DC çevirici ve benzeri topolojiler ile kontrol edilir. Şekil 2.6’de hız kontrolü sisteminin şeması görülmektedir.



Şekil 2.6: Hız kontrolü diyagramı.



### **3. HALBACH DİZİLİMLERİ VE UYGULAMALARI**

#### **3.1 Tarihçe ve Kullanım Alanları**

Halbach mıknatıs diziliminin alan etkisi ilk olarak J.C. Mallinson tarafından 1973 yılında keşfedilmiştir. Mallinson keşfettiği bu dizilimi daha çok manyetik kaset kayıt sisteminde kullanmıştır [10]. Daha sonra Lawrence Berkeley laboratuvarından bir fizikçi olan Klaus Halbach bu dizilimleri parçacık hızlandırma uygulamalarında kullanılabileceğini keşfetmiştir. Bu mıknatıs dizilimine ismi verilen fizikçi, parçacık hızlandırma ile elektron depolama halkası uygulamasının önünü açmıştır.

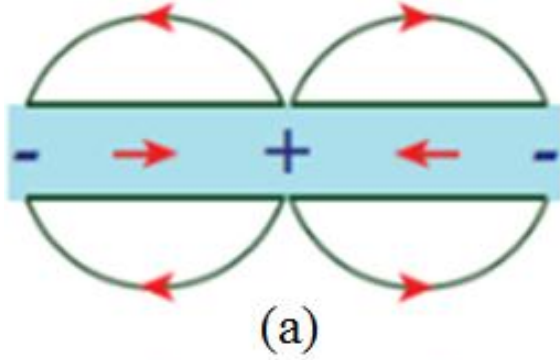
Herbert Leupold ve Ernest Potenziani de Halbach dizilimi üzerinde çalışarak Halbach küresini keşfetmişlerdir [4]. Daha sonra da Douglas Basarab ile birlikte çalışarak bu dizilimin kalıcı mıknatıslı motorlarda nasıl kullanılabileceğini göstermişlerdir. Bu şekilde tasarlanan motorlar akı şekillendirmede fazladan ferromanyetik malzemeye ihtiyaç duymamaktadır. Bu, dizilimin elektrik motorlardaki uygulaması için ilk girişimdir. Bu yöntem ile tasarımın matematiksel analizini basitleştirip, motorun daha hafif tasarlanmasının önünü açmaktadır [5].

Robert Post da bu dizilimleri ilk defa elektrik motorlarına uygulamıştır. Yaptığı çalışmaların sonucunda 1990 yılında kalıcı mıknatıs dışında herhangi bir manyetik malzeme kullanmadan elektrik motoru tasarım çözümü sunmuştur. Bu şekilde sadece ağırlıkta azalma değil aynı zamanda sirkülasyon akımları kaynaklı kayıpların da ortadan kalkması gibi önemli sonuçlar elde edilmiştir [2].

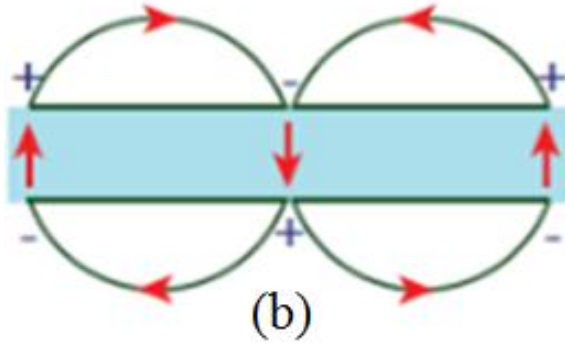
#### **3.2 Halbach Dizilimi Yapısı**

Halbach dizilimi özel bir kalıcı mıknatıs konfigürasyonu olup, bir taraftaki alan şiddetini arttırırken diğer taraftaki alan şiddetini azaltan bir etkiye sahiptir. Bir başka deyişle, ideal şartlar altında bir taraftaki manyetik alan yok edilirken diğer taraftaki alan iki kat arttırılabilmektedir. Şekil 3.1’de bu dizilimin nasıl ortaya çıktığı görülmektedir. Boyuna ve dikine olmak üzere iki farklı kutuplanma dizilimin kombinasyonu bir birine entegre edilmesi ile Halbach dizilimini ortaya

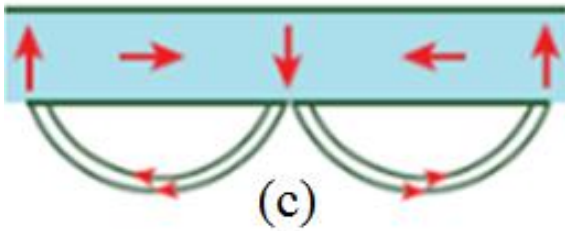
çıkarmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere alt taraftaki manyetik alan doğrultuları eş yönlü olup ikisinin birleşimi daha kuvvetli bir alan şiddeti ortaya çıkarır. Fakat üst taraftaki alan çizgileri zıt olduğundan bir birini ideal şartlarda yok ederek manyetik alanı ortadan kaldırır.



Boyuna  
Kutuplanmış Dizilim



Dikine  
Kutuplanmış Dizilim



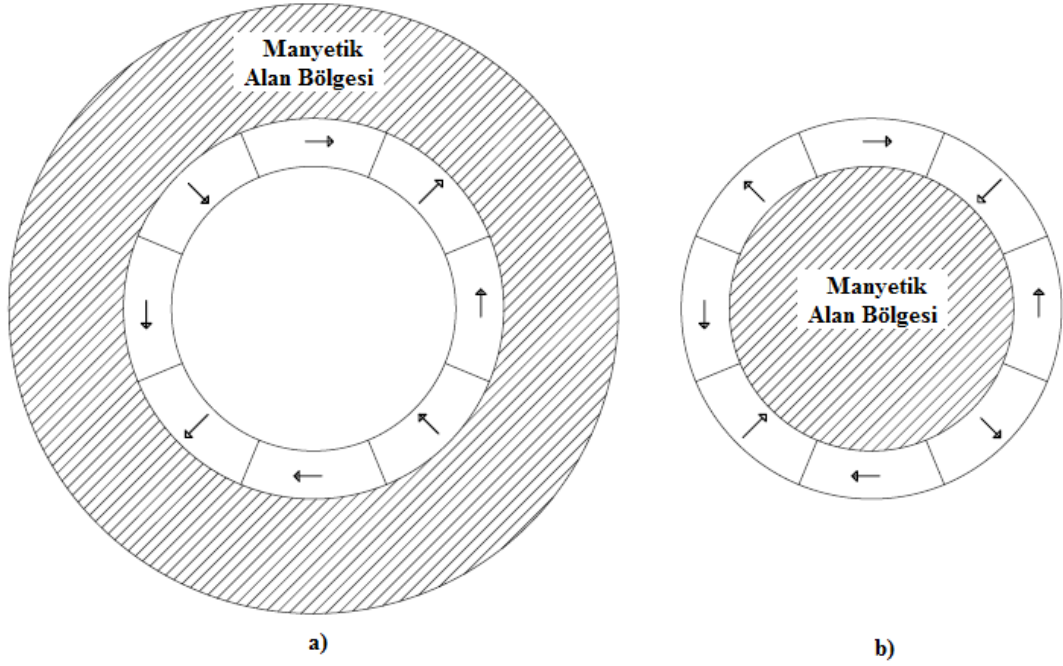
Halbach Dizilimi

**Şekil 3.1:** Halbach diziliminin elde edilmesi [10].

### 3.3 Halbach FDAM Uygulamaları

FDAM'larda Halbach dizilimi uygulanırken, dizilimin alan kuvvetlendirme ve kalkanlama bölgeleri önem arz eder. Motorun, iç ve ya dış rotorlu oluşuna bağlı olarak, alan kuvvetlendirme, içeriye ve ya dışarıya yönelik Halbach polarizasyonu seçilir. Şekil 3.2'de iki farklı Halbach dizilim polarizasyonlarının yarattığı alan kuvvetlendirme bölgeleri gösterilmiştir. İç rotorlu FDAM'larda alan dışarı doğru yoğunlaştırılırken, dış rotorlu FDAM'larda ise içeri doğru yoğunlaştırılır. İki motor

tipinde de amaç, manyetik alanı hava aralığında yoğunlaştırarak, boyunduruk bölgesini kalkanlamaktır.



**Şekil 3.2:** İç rotorlu(a) ve dış rotorlu(b) motorlar için çift kutuplu tek segmentli Halbach rotor yapısı.

Halbach diziliminin silindirik koordinatlarda manyetik vektör denklemleri;

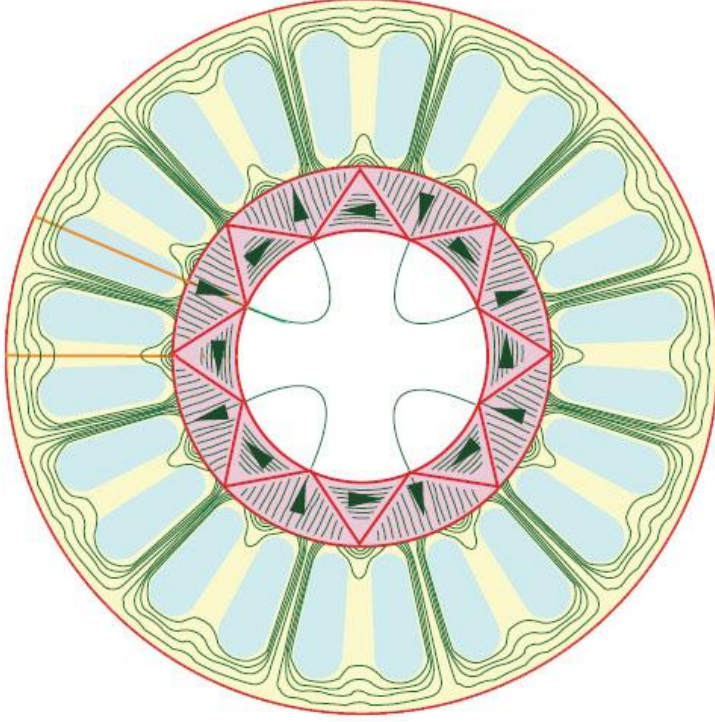
$$M = M_r \cos(\rho\theta)r \pm M_r \sin(\rho\theta)\theta \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{M} = \nabla \cdot (\sum_n M_r \cos(\rho\theta)r \pm \sum_n M_r \sin(\rho\theta)\theta) \quad (3.2)$$

Denklemde bileşenler, Halbach dizilimi iç rotorlu motorlarda kullanıldığında çıkarılır, dış rotorlularda ise toplanır.

Şekil 3.2'deki dizilimde 2 kutup çifti ile tek segmentli bir Halbach dizilimi bulunmaktadır. Halbach dizilimli rotor tasarımlarında az kutuplu motorlarda kutup yayları daha geniş olduğu için daha hassas bir manyetik alan yönlendirmesine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle bu tip motorlarda çok kutuplulara nazaran kutup başına düşen segment sayısı daha fazla olur. Çok segmentli tasarımlar, daha iyi bir kalkanlama, daha sinüzoidal bir akı dağılımı ve daha düşük kaçak akıya neden olmasına rağmen, üretim fizibilitesi azaldığından dolayı özellikle çok kutuplu motorlarda limitlendirilmeye çalışılan bir faktördür [2].

Özellikle yüksek moment, düşük hız uygulamalarında kutup sayısının çok olması nedeniyle segment kullanılması zorlaşmaktadır. Bu nedenle üçgen kesitli mıknatıs yapıları tercih edilmektedir. Bu sayede mıknatıslar arası manyetik alan rotasyonunun keskinliği düşürülebilmekte ve kalkanlanan bölgeye sızan akılar azaltılabilmektedir [5].



**Şekil 3.3:** Üçgen kesitli mıknatısla Halbach Dizilimi [5].



## 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

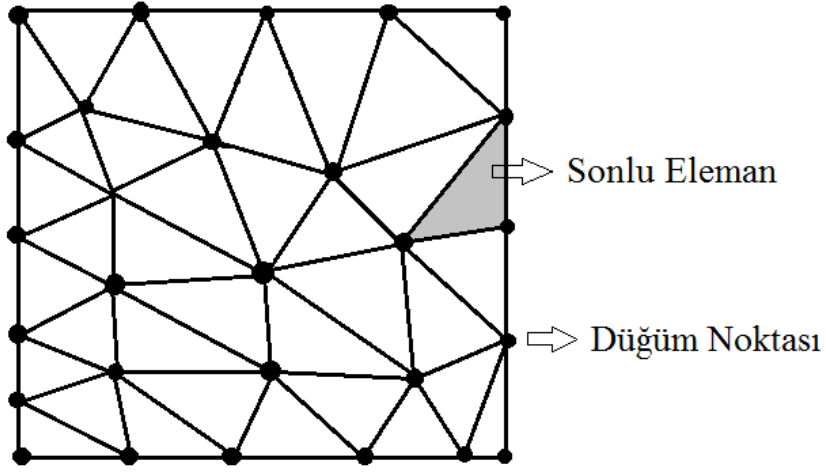
### 4.1 Tarihçe ve Uygulama Alanları

Sonlu elemanlar metodu, ilk olarak 1960'lı yıllarda ortaya çıkmış olup, 1970 itibariyle mühendislik problemleri çözümlerinde yaygınlıkla kullanılmaya başlanmıştır [8]. Bu yıllarda daha çok, ısı transferi, stres analizi, akışkan analizi gibi problemlerin yaklaşık çözümlerinde kullanılmıştır. 1970 itibariyle, sonlu elemanlar teorisini temel alan, çeşitli mühendislik problemlerinde analiz imkanı tanıyan ticari yazılımlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu yazılımlar gelişen bilgisayar teknolojisiyle beraber gelişerek, modern mühendislik problemlerine yaygınlıkla kullanılır hale gelmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde, ısı analiz, akışkanlar analizi, manyetik ve elektrostatik analiz, ve stres analizlerinde kullanılmakta olup, otomotiv, havacılık, savunma sanayi, hidrolik, inşaat, makine ve robotik gibi bir çok sektöre hizmet etmektedir. Elektrik mühendisliğinde ise sonlu elemanlar yöntemi, manyetostatik analiz, geçici hal, zaman-frekans domeninde elektromanyetik analiz, elektrostatik analiz, akım dağılımı analizi, ısı analizi ve stres dağılımı analizleri kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun en önemli avantajı, farkı malzeme tiplerine sahip kompleks geometrilerin çeşitli fiziksel analizlerini, zaman ve ya frekans domeninde gerçekleştirebilmesidir. Yaklaşık çözüm sunması, dezavantajı olmasına rağmen sonlu elemanların bölgelendirilmesinde yapılacak optimizasyon ile daha hassas ve doğru sonuçlar da elde edilebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi, bir geometrinin çeşitli fiziksel durumlarının analizinde, küçük sonlu parçalara ayrılarak ayrı ayrı çözümlere birleştirilmesidir. Şekil 4.1'de iki boyutlu kare bir geometri, düğüm noktalarının birleşmesi ile oluşan sonlu eleman bölgelerine ayrılmıştır. Bu geometri, bir, iki ve ya üç boyutlu olabilmektedir. Her bir elemanın cebirsel denklemi elde edilir ve hepsi matris halinde bir araya getirilir. Bu matris ise sınır koşulları uygulanarak çözülür.

## 4.2 Sonlu Elemanlar Teorisi

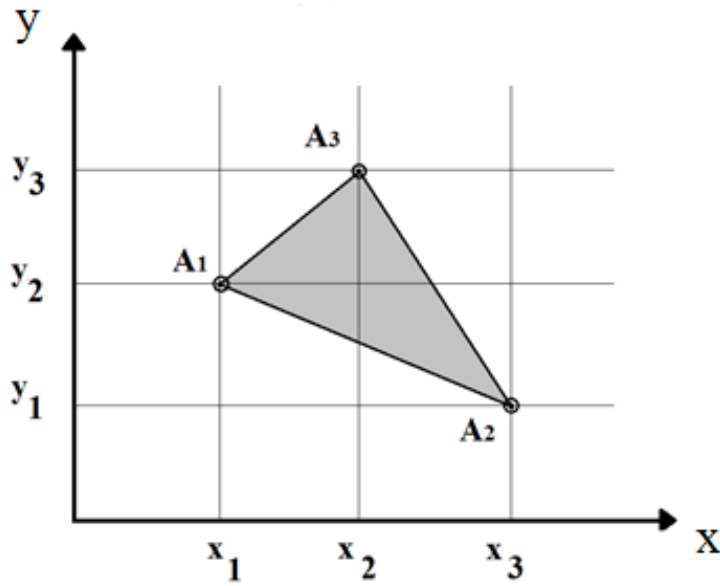


**Şekil 4.1:** İki boyutlu bir geometrinin sonlu elemanlara ayrılması.

Bu cebirsel denklemin genel ifadesi denklem 4.1’de verilmiştir.

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (4.1)$$

$K$  fiziksel kat sayı,  $F$  fiziksel etken,  $u$  ise bilinmeyen davranıştır. Parçalara ayrılmış bir sistemdeki, bir sonlu elemanın ifade Şekil 4.2’deki gösterim üzerinden matematiksel olarak tanımlanmıştır.



**Şekil 4.2:** İki boyutlu sonlu eleman.

$$\frac{d^2 A_z}{dx^2} + \frac{d^2 A_z}{dy^2} = 0 \quad (4.2)$$

$$A^{(e)} = \sum_{i=1}^3 x_i(x, y) A_i \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Sistemin parçası olan bu sonlu eleman, denklem 4.4'deki matris formunda tanımlanır.

Sonlu eleman problemini çözmek amacıyla, sonlu elemanlara ayrılan sistemin, eleman katsayı matrisinin elde edilmesi gerekir.  $K$  eleman katsayısının matris formu denklem 4.5'de edilmiştir.

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots \\ k_{21} & k_{22} & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\{u\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (4.6)$$

Birleştirilmiş cebirsel denklemin çözümü ise sonlu eleman analizi probleminin çözümünü verir (4.6).

### 4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Manyetik Analiz

Sonlu elemanlar yöntemi, elektrik mühendisliğinde özellikle elektrik makineleri alanında, manyetik alan problemlerinin çözümü amacıyla yaygınlıkla kullanılmaktadır. Manyetik alan problemlerinin sonlu elemanlar ile çözümünde ise, 4.7'deki manyetik Laplace denklemi ve ya 4.8'teki manyetik Poisson denklemi kullanılır. Bu denklemde  $A$  manyetik alan vektörüdür.

$$\nabla^2 A = 0 \quad (4.7)$$

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (4.8)$$

Bir sonlu eleman içerisindeki manyetik enerji denklem 4.9'deki gibi ifade edilir. Bu denklem sonlu elemana uyarlanınca denklem 4.10 elde edilir. Burada  $A$  düğüm potansiyel matrisi,  $K^{(e)}$  ise katsayılar matrisidir.

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \int |\nabla A|^2 dS \quad (4.9)$$

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} A^T K^{(e)} A \quad (4.10)$$

Enerji denkleminin türevini sıfır yapan düğüm potansiyel değerleri bulunur. Bu şekilde manyetik Laplace denkleminin çözümü bulunmuş olur. Bu çözüm ile elde edilen potansiyele bağlı olan diğer manyetik alan büyüklükleri de elde edilebilir.

## 5. HALBACH FDAM FEM MODELLEMESİ VE ANALİZLERİ

Bu bölümde, Halbach dizilimlerinin FDAM üzerinde etkisini ortaya koymak amacıyla çeşitli çalışmalar ve sonuçları sunulacaktır. Bu amaçla, ilk olarak seçilen bir referans fırçasız doğru akım motoru, sonlu elemanlar ile modellenerek analiz edilecektir. Bu analizler sonucu doğrulanacak motora, çeşitli Halbach dizilimleri belirli kısıtlamalar altında uygulanarak, performans analizi yapılacaktır. Daha sonra mıknatıs yüksekliğinin performansa etkisi analiz edilerek, kritik yükseklik ortaya konulacaktır.

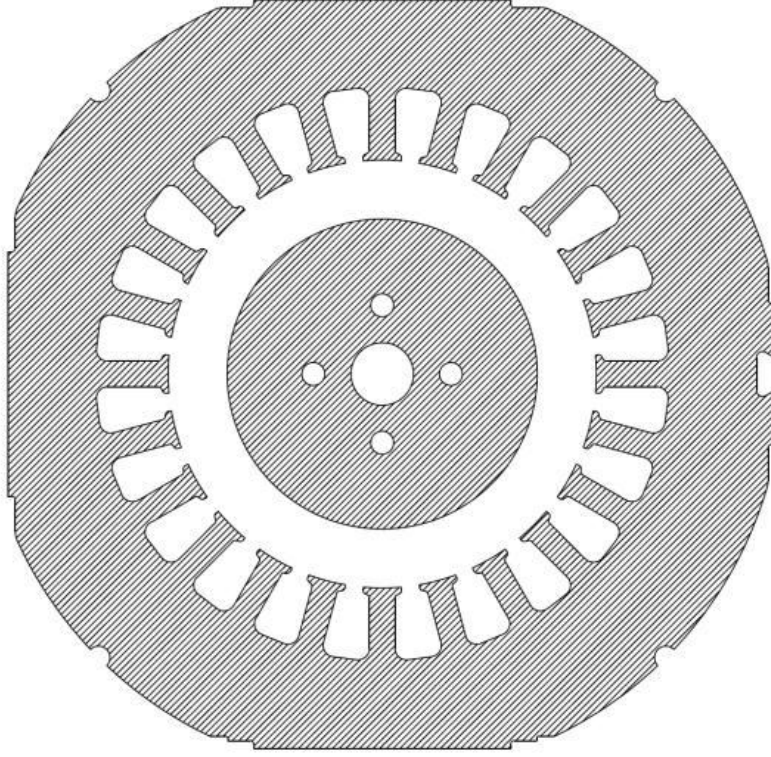
### 5.1 Referans Motorun Modellenmesi ve Analizi

Çalışmada, Halbach dizilimlerinin etkisini göstermek amacıyla modifiye edilecek referans motor, bulaşık makinesi ana sirkülasyon pompası uygulamasında kullanılan bir fırçasız doğru akım motorudur. Bulaşık makinesi ana sirkülasyon pompası uygulamalarında kullanılan motorlar, düşük yükte, yüksek hız koşullarında çalışacak şekilde tasarlanırlar. Üzerinde Halbach dizilimlerinin uygulanacağı bu referans motorun genel özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1:** Referans motorun özellikleri.

Nominal Güç	90 W
Nominal Moment	0.26 Nm
Nominal Hız	2800 1/min
Mıknatıs Hacmi	27 cm <sup>3</sup>
Mıknatıs Malzemesi	Ferrite
Laminasyon Malzemesi	M700

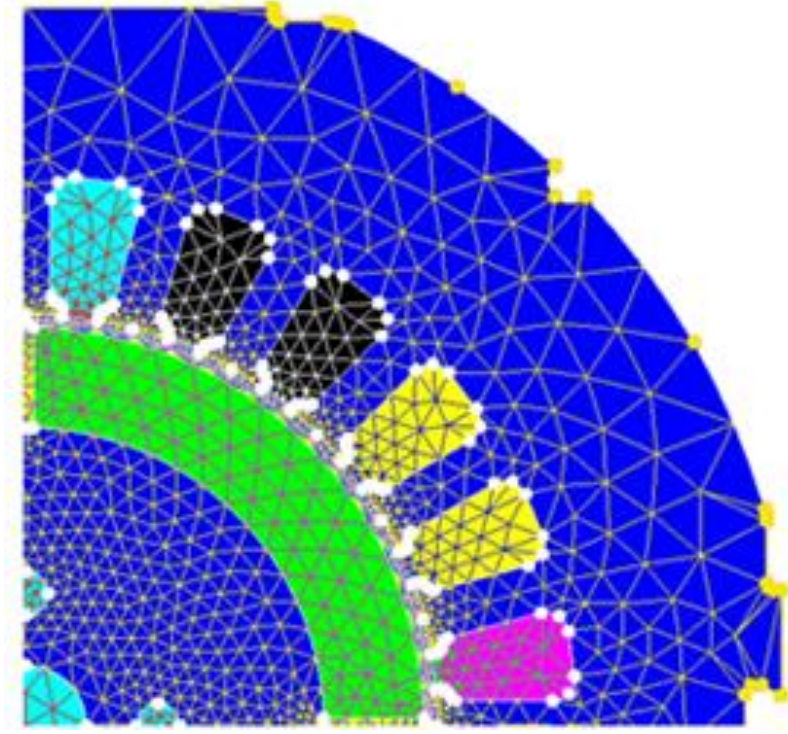
Motorun stator geometrisi 3 faz sargının geçeceği, 24 adet oluklu yapıya sahiptir. Laminasyon malzemesi olarak stator ve rotorda M700, mıknatıs malzemesi olarak ise Ferrite kullanılmıştır. Mıknatıslar 4 kutuplu olup, yüzey mıknatıs yapısındadır. Motorun laminasyon kesitinin geometrisi Şekil 5.1’de görülmektedir.



**Şekil 5.1:** Referans motorun laminasyon kesiti.

Bu motor yapısına öncelikle, referans motoru doğrulamak amacıyla, standart mıknatıs dizilimi olan 4 kutuplu radyal mıknatıs dizilimi uygulanarak FEM modellemesi yapılacaktır. Bu model, iki boyutlu manyetik analiz modunda incelenecektir.

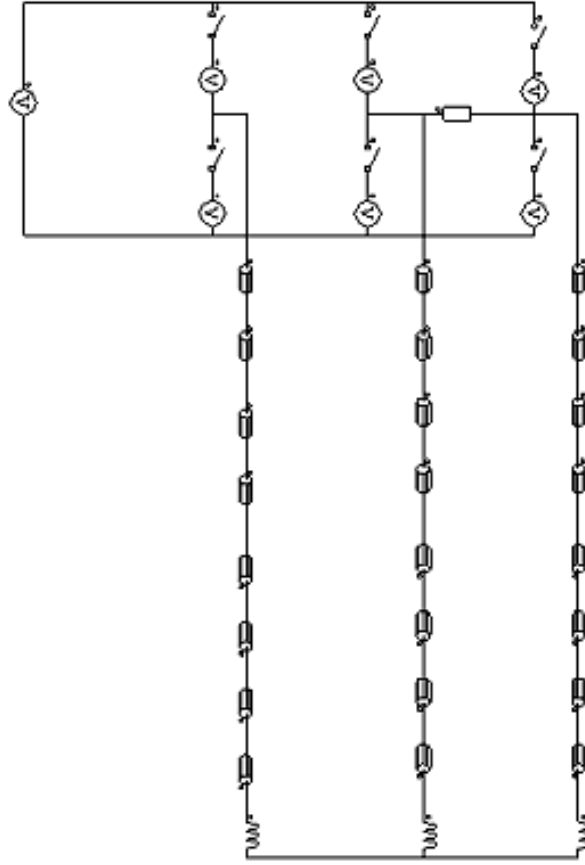
Bu amaçla, laminasyon, şaft, oluk ve mıknatıs geometrileri çizilerek bölgeleştirilmiştir. Rotor ve stator laminasyonu bölgelerine M700 malzemesi, mıknatıs bölgesine Ferrite malzeme, stator oluğu, delik ve hava aralığı bölgelerine de hava i eşleşmesi yapılmıştır. Mıknatıs polarizasyonları, rotor koordinat sisteminde tanımlanmış olup, radyal açı değerlerinde girilmiştir. Oluk bölgeleri, elektriksel devredeki bobin iletkenleri ile eşleştirilerek sarım sayıları girilmiştir. Hava aralığı üç katman olarak modellenmiş olup, orta katmanı döner hava bölgesi olarak atanmıştır. Rotora ait bölgeler olan rotor laminasyonu, şaft, rotor hava aralığı ve mıknatıslar, şaft merkezini referans alacak şekilde dönen bir mekanik sete atanmıştır. Statora ait bölgeler olan, stator laminasyonu, oluklar ve stator hava aralığı ise sabit mekanik sete atanmıştır. Son olarak, geometride düğüm nokta yoğunlukları atanarak, tüm geometri Şekil 5.2’te görüldüğü gibi sonlu elemanlara bölünmüştür.



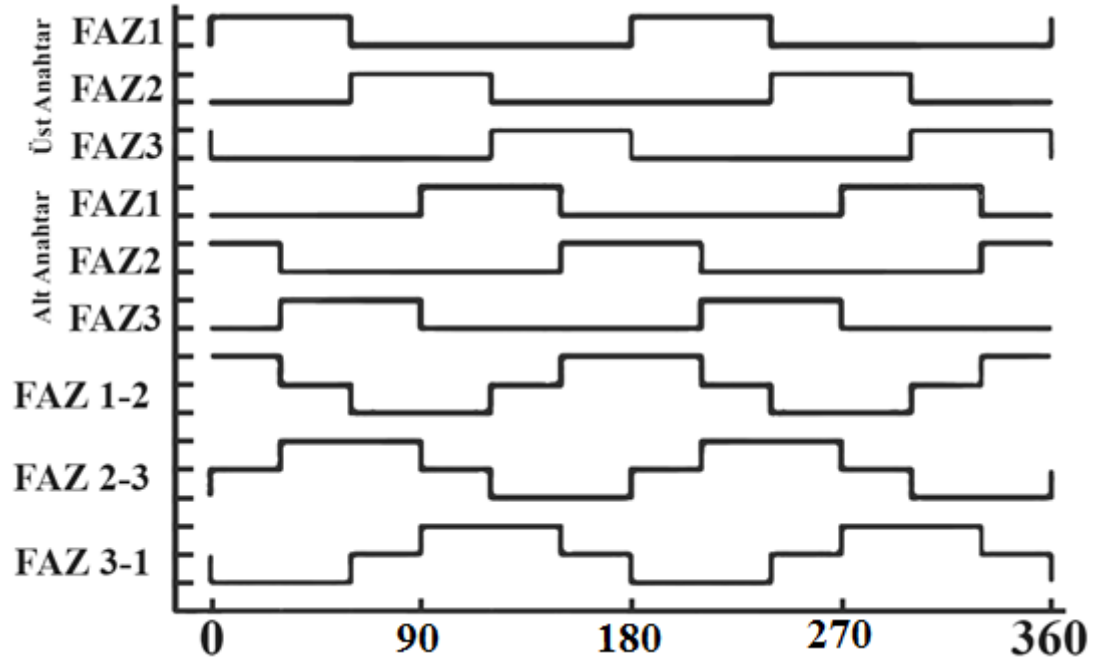
**Şekil 5.2:** Referans motorun FEM modeli.

Motor sürücü devresi ise 3 faz sargıdan dolayı, 3 fazlı yarı iletken anahtarlama elemanlarından kurulu evirici köprü yapısına sahiptir. Sürücü devresi şebeke değerleri olan 220-240V ve 50 Hz'lik bir AC gerilimle çalışmaktadır. Bu gerilim tam dalga doğrultucu ve DC/DC çevirici yapısı üzerinden DC baraya bağlıdır. Bu DC bara ise, sürücü devresinin evirici köprüsü beslemektedir. Sürücünün anahtarlama elemanları, 4 kutup için  $60^\circ$ 'lik trapezoid dalga ile sürülmektedir. Analiz için kurulan motor sürücü devresi, Şekil 5.3'te verilmiştir.

Modelde, her bir faz sargısına 8 oluk bölgesi düştüğünden dolayı, bir faz sargısı 8 parça bobin iletkeni ve bir endüktans ile modellenmiştir. Sargı direnç değerleri, bu bobin iletkeni elemanları içerisinde tanımlanmıştır. 3 fazlı sargıyı süren, 3 ayağa sahip 6 anahtarla elemanından kurulu evirici köprü, DC gerilim kaynağı ile beslenmiştir. Simülasyondaki anahtarlama elemanları ideal olduğundan dolayı, gerilim düşümü ve kayıpları modellemek için gerilim kaynakları kullanılmıştır. Evirici devresinin anahtarlama sinyalleri Şekil 5.4'te görülmektedir.



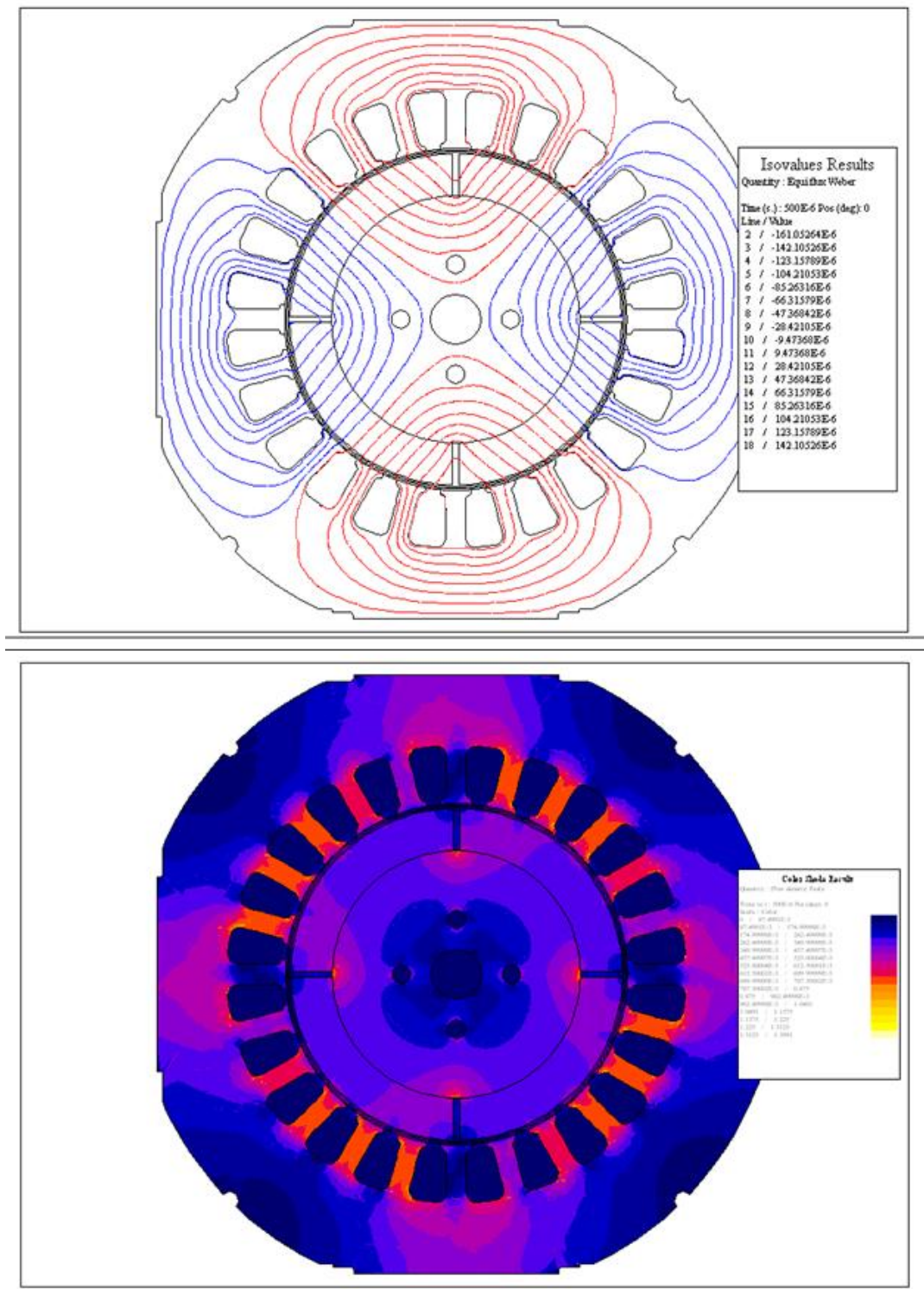
Şekil 5.3: Referans motor sürücü modeli.



Şekil 5.4: 60°'lik trapezoid anahtarlama sinyalleri.

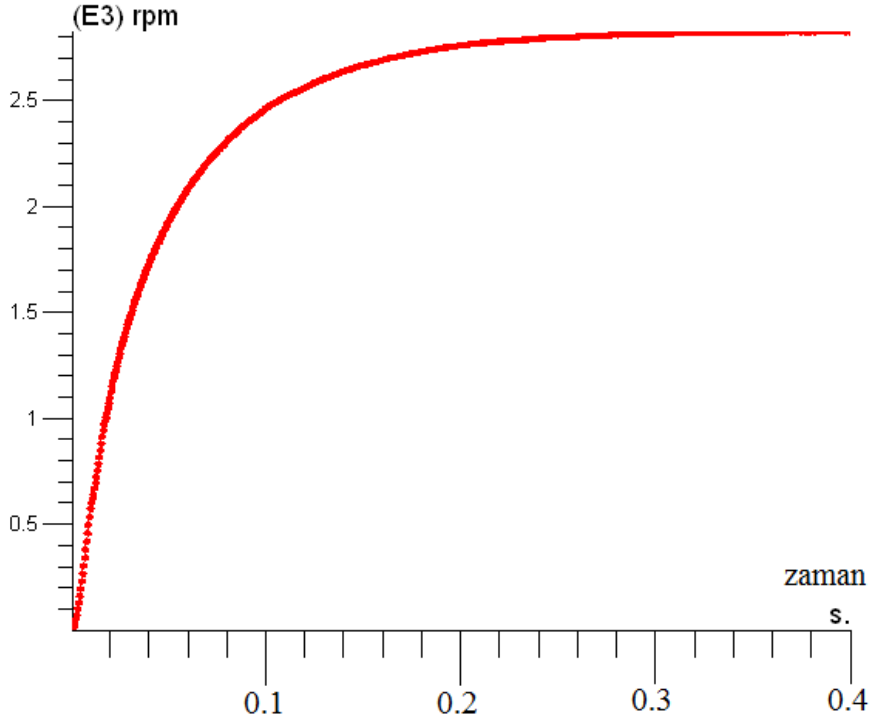


Model, referans motorun nominal yükü olan 0.26 Nm ile yüklenerek, nominal çalışma hızı olan 2800 min<sup>-1</sup> hızında analiz edilmiştir. Yapılan sonlu eleman analizi sonucunda Şekil 5.5'te görülen akı dağılımı ve akı yoğunlukları ortaya çıkmıştır.

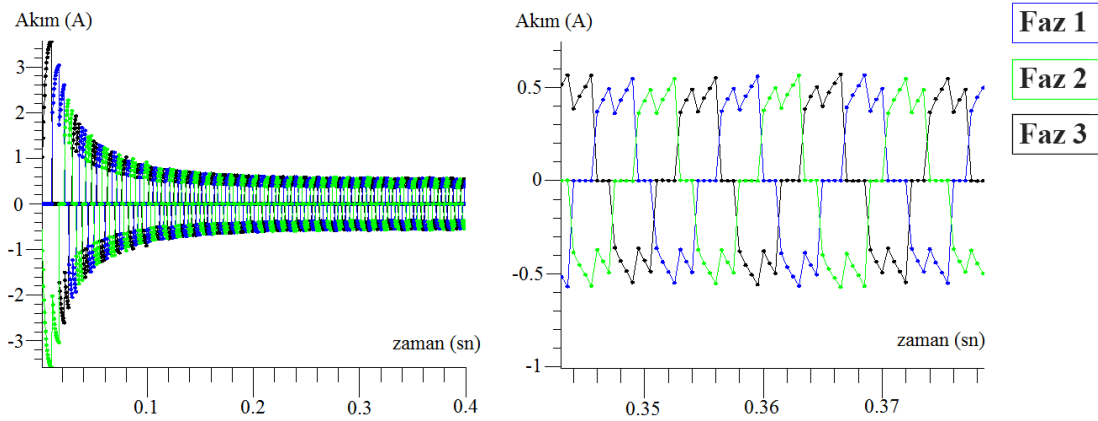


Akı dağılımları için kullanılan skala  $\pm 0.00015$  Weber iken, akı yoğunlukları için kullanılan skala ise 1.4 T'dir.

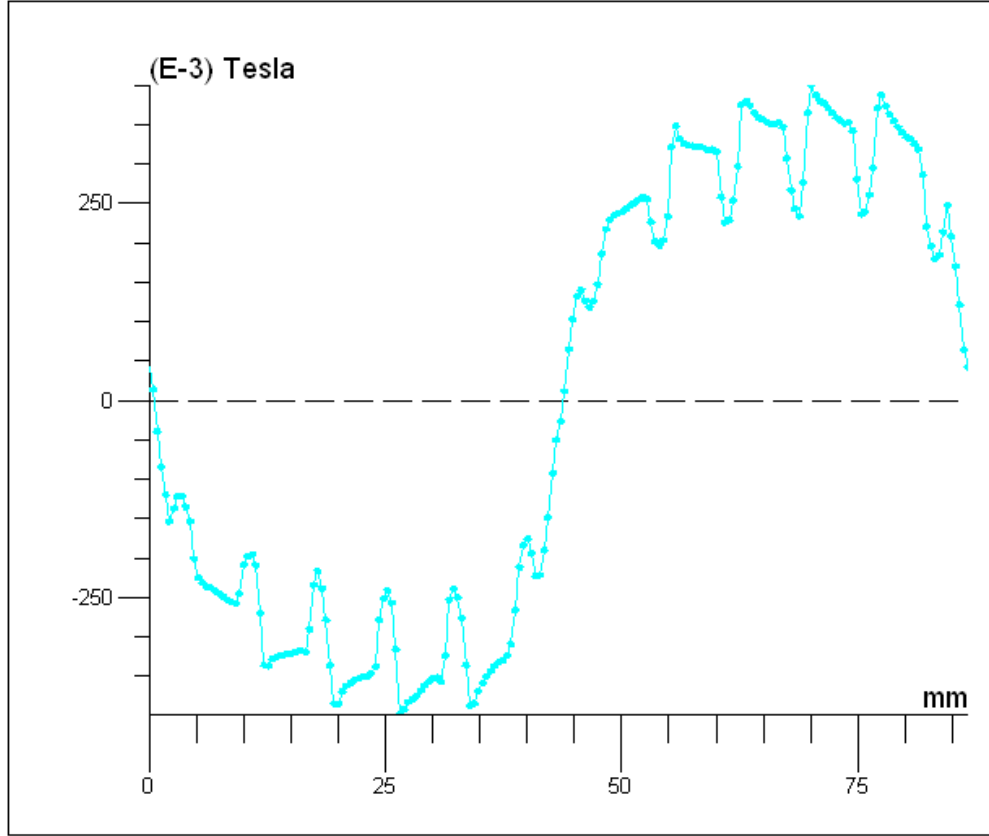
Modellenen motorun, geçici hal manyetik analizi sonucunda elde edilen hızlanma, faz akımları, hava aralığı manyetik akı dağılımı grafikleri Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'deki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 5.6: Motor hızlanma eğrisi.



Şekil 5.7: Motor kalkış durumu faz akımları.



**Şekil 5.8:** Motor hava aralığı manyetik akı dağılımı.

Analizde elde edilen, giriş gücü, çıkış gücü ve verimlilik değerlerinin, gerçek test değerleri ile karşılaştırılmasını içeren tablo ise Çizelge 5.2’te görülmektedir. Tablodaki düşük sapma değerlerinden görüldüğü üzere, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen motor doğrulanmıştır.

**Çizelge 5.2:** Analizlerin, gerçek test değerleri ile karşılaştırılması.

	Devir[ $\text{min}^{-1}$ ]	$P_i$ [W]	$P_o$ [W]	Moment [Nm]	Verim
<b>Test Motoru</b>	2800	97	75	0.26	77.32%
<b>Modellenen Motor</b>	2800	95.7	75.2	0.262	78.58%
<b>Sapma</b>	0.0%	-1.3%	0.3%	0.8%	1.6%

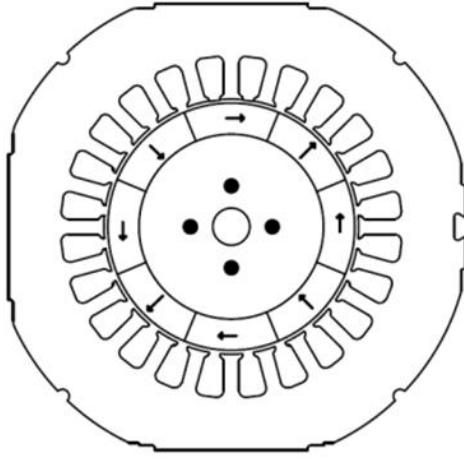
## 5.2 Halbach Dizilimlerinin Motora Uygulanması ve Analizi

FEM modellemesi ve analizi neticesinde doğrulanan referans motor üzerinde farklı segment sayılarında ve geometride Halbach dizilimleri uygulanacaktır. Halbach dizilimleri uygulanırken tüm modellerde aynı kalacak motor özellikler aşağıdaki listelenmiştir;

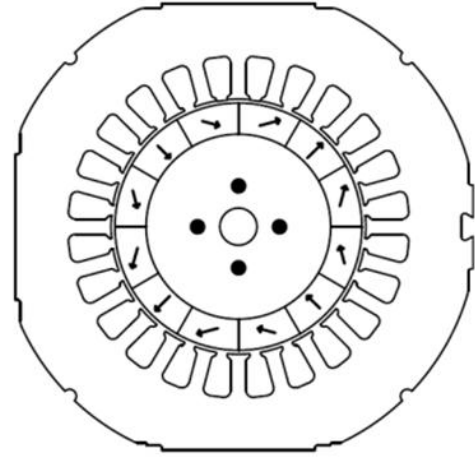
- Rotor ve stator laminasyonu geometrisi
- Rotor ve stator laminasyonu malzemesi
- Mıknatıs hacmi ve mıknatıs malzemesi
- Hava aralığı uzunluğu
- Motor sargısı elektriksel devresi
- Motor sürücü devresi ve sürüş yöntemi
- Giriş gerilimi değeri

Bu şekilde, motorun diğer parametreleri değiştirilmeden, farklı Halbach mıknatıs dizilimlerinin fırçasız doğru akım motoru performansına etkisi ortaya çıkarılacaktır.

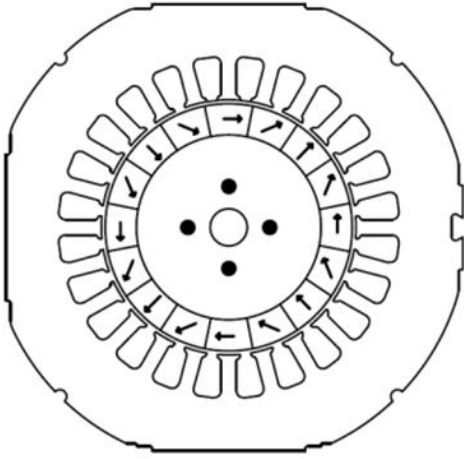
Referans motor üzerine yay geometrisinde 8, 12 ve 16 segmentli ve üçgen geometride 16 segmentli olmak üzere 4 farklı şekildeki Halbach dizilimleri uygulanacaktır. Yay geometrisinin farklı segmentli yapılarda uygulanması ile segment sayısının etkisinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Üçgen geometrideki Halbach ise geometrisinin getirdiği etkiyi gösterecektir. Bu geometride, yapısal olarak minimum 16 segment kullanılabildiğinden dolayı, sadece 16 segment uygulanmıştır. Daha yüksek segment adetleri, üretilebilirlik problemleri nedeniyle uygulanmamıştır.



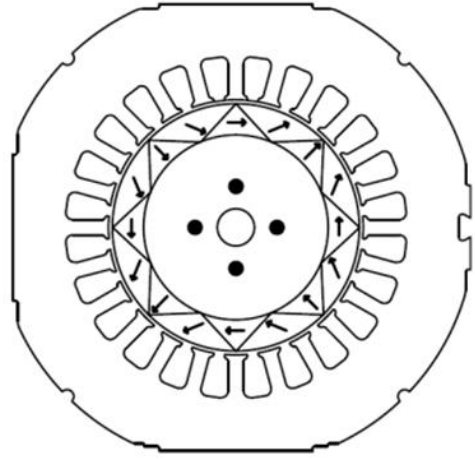
Yay geometrisinde 8 segmentli



Yay geometrisinde 12 segmentli



Yay geometrisinde 16 segmentli



Üçgen geometride 16 segmentli

**Şekil 5.9:** Farklı geometri ve segment sayılarında uygulanan Halbach dizilimleri.

Referans motora uygulanan Halbach dizilimlerinin geometrik yapısı ve mıknatıs polarizasyonları Şekil 5.9'de görülmektedir. Polarizasyonlar, iç rotorlu motorlarda kullanılan, rotor içerisinde alan zayıflatırken, hava aralığında alan kuvvetlendiren yapıda tasarlanmıştır. Çizelge 5.3'te ise tüm mıknatıs dizilim tipleri için, rotor koordinat sistemi üzerinde tanımlanmış mıknatıs polarizasyon açıları verilmiştir. Tabloda da görüldüğü üzere mıknatıs polarizasyonları, optimize edilmemiş olup, sabit artan açı değerinde uygulanmıştır.

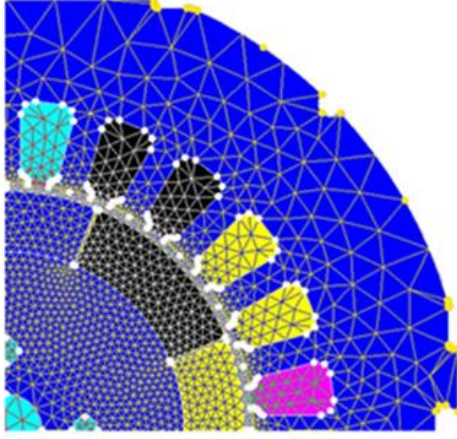
**Çizelge 5.3:** Dizilimlerin mıknatıs polarizasyon açıları.

	Referans motor radyal dizilimi	Yay geometrili 8 segmentli	Yay geometrili 12 segmentli	Yay geometrili 16 segmentli	Üçgen geometride 16 segmentli
<b>Mıknatıs 1</b>	0°	0°	0°	0°	0°
<b>Mıknatıs 2</b>	270°	315°	330°	337.5°	337.5°
<b>Mıknatıs 3</b>	180°	270°	300°	315°	315°
<b>Mıknatıs 4</b>	90°	225°	270°	292.5°	292.5°
<b>Mıknatıs 5</b>		180°	240°	270°	270°
<b>Mıknatıs 6</b>		135°	210°	247.5°	247.5°
<b>Mıknatıs 7</b>		90°	180°	225°	225°
<b>Mıknatıs 8</b>		45°	150°	202.5°	202.5°
<b>Mıknatıs 9</b>			120°	180°	180°
<b>Mıknatıs 10</b>			90°	157.5°	157.5°
<b>Mıknatıs 11</b>			60°	135°	135°
<b>Mıknatıs 12</b>			30°	112.5°	112.5°
<b>Mıknatıs 13</b>				90°	90°
<b>Mıknatıs 14</b>				67.5°	67.5°
<b>Mıknatıs 15</b>				45°	45°
<b>Mıknatıs 16</b>				22.5°	22.5°

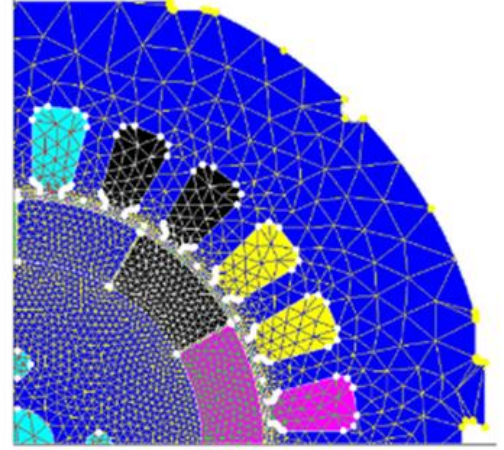
Referans motorun mıknatıs geometrileri değiştirilerek, farklı segment sayılarında ve geometrilerde Halbach geometrileri rotor üzerine çizilmiştir. Tasarlanan tüm Halbach dizilimli fırçasız doğru akım motorları, referans motorun özellik tablosunda verilen 27 cm<sup>3</sup>'luk mıknatıs hacmine ve mıknatıs malzemesine sahiptir. Geometride, hava aralığı ve rotor laminasyonları sabit tutulduğundan dolayı, mıknatıs hacmini aynı tutmak için, mıknatıs segmentleri arasındaki boşluklar artan segment sayısından dolayı küçülmüştür. Bu şekilde tasarlanan dört farklı Halbach dizilimine sahip motor modellerinin polarizasyon açıları Çizelge 5.3'deki değerlere göre atanmıştır. Motorun diğer parametreleri, referans motor ile aynı olacağından dolayı, referans motor üzerinde mıknatıslardan başka değişiklik yapılmamıştır. Yeni mıknatıs geometrisine ait sonlu eleman ve düğüm yoğunlukları da tanımlandıktan sonra, geometri sonlu elemanlara ayrılmıştır. Bu şekilde modellenen farklı Halbach



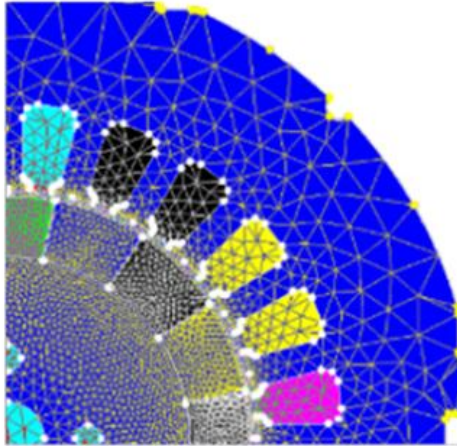
dizilimlerine sahip dört motorun sonlu elemanlara ayrılmış geometrileri Şekil 5.10'da görülmektedir.



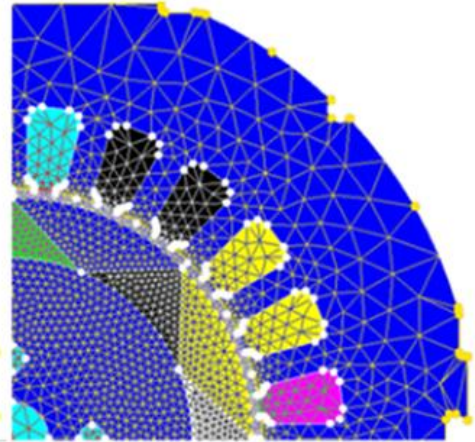
Yay geometrisinde 8 segmentli



Yay geometrisinde 12 segmentli



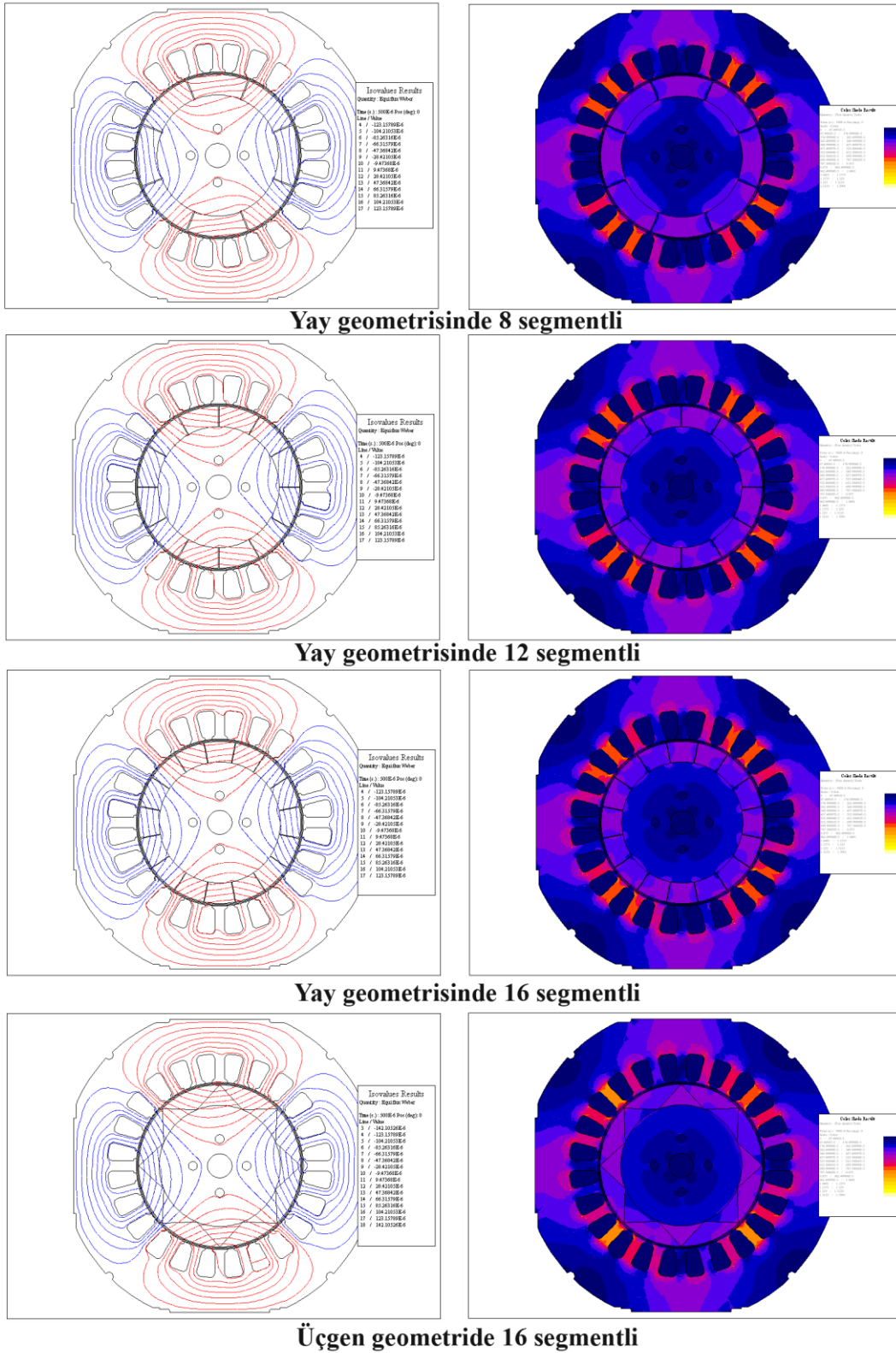
Yay geometrisinde 16 segmentli



Üçgen geometride 16 segmentli

**Şekil 5.10:** Farklı Halbach dizilimlerinin FEM modelleri.

Oluşturulan tüm motor modelleri, referans motorun, nominal giriş geriliminde, standart çalışma koşulu olan  $2800 \text{ min}^{-1}$  hızda analiz edilecektir.

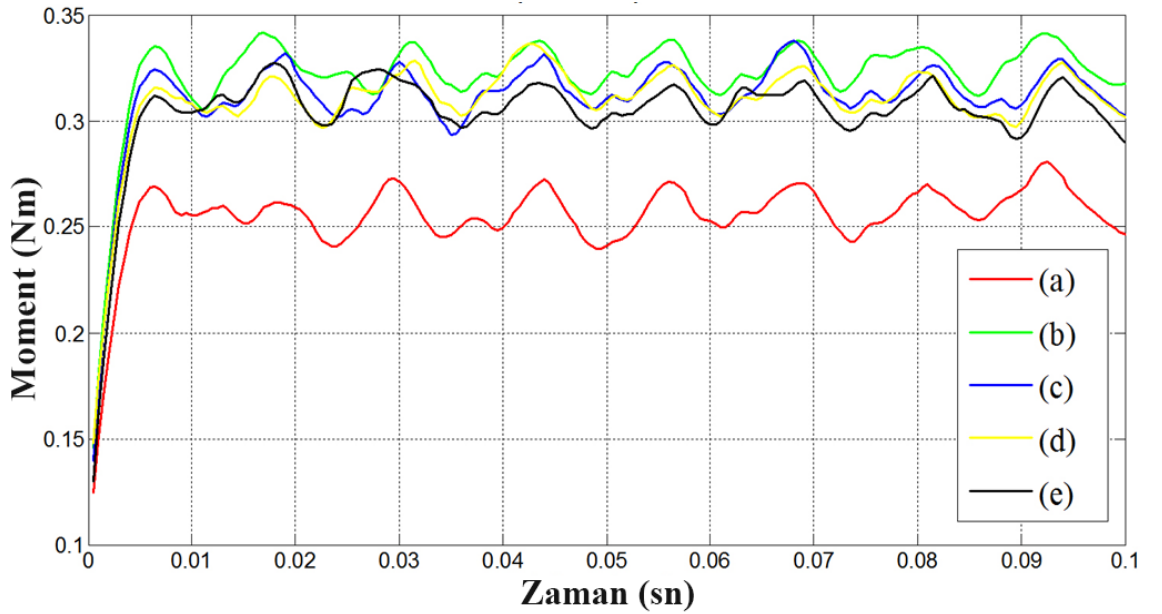


**Şekil 5.11:** Farklı Halbach dizilimlerinin akı dağılımı ve akı yoğunlukları.

Analiz neticesinde elde edilen akı dağılımı ve akı yoğunluğu grafikleri Şekil 5.11’de görülmektedir. Kullanılan skalalar, referans motorun analizdeki değerler olan, akı



dağılımda  $\pm 0.00015$  Wb, akı yoğunluğunda ise 1.4 T'dir. Referans motorun akı dağılımı ve yoğunluğu, Halbach dizilimleri ile karşılaştırıldığında, rotor boyundukundaki akı yoğunluğu azalması şekillerde görülmektedir. Bu, Halbach dizilimlerinin alan kuvvetlendirme etkisinin beraberinde getirdiği kalkanlama etkisinden kaynaklanmaktadır. Farklı Halbach segmentlerinin, rotor akı yoğunlukları karşılaştırıldığında, segment sayısındaki artışın, kalkanlamaya katkı sağladığı görülmektedir. Üçgen geometrideki Halbach dizilimi ise diğer Halbach dizilimlerinin rotor akı yoğunlukları ile karşılaştırıldığında kalkanlama olarak en optimum dizilimdir. Ortaya çıkan bu kalkanlama etkisi, rotorda manyetik olmayan malzeme kullanmanın önünü açtığından, bu şekilde tasarlanacak rotor yapısı ile Halbach dizilimi maliyet ve hafifleme avantajı haline getirilebilir.



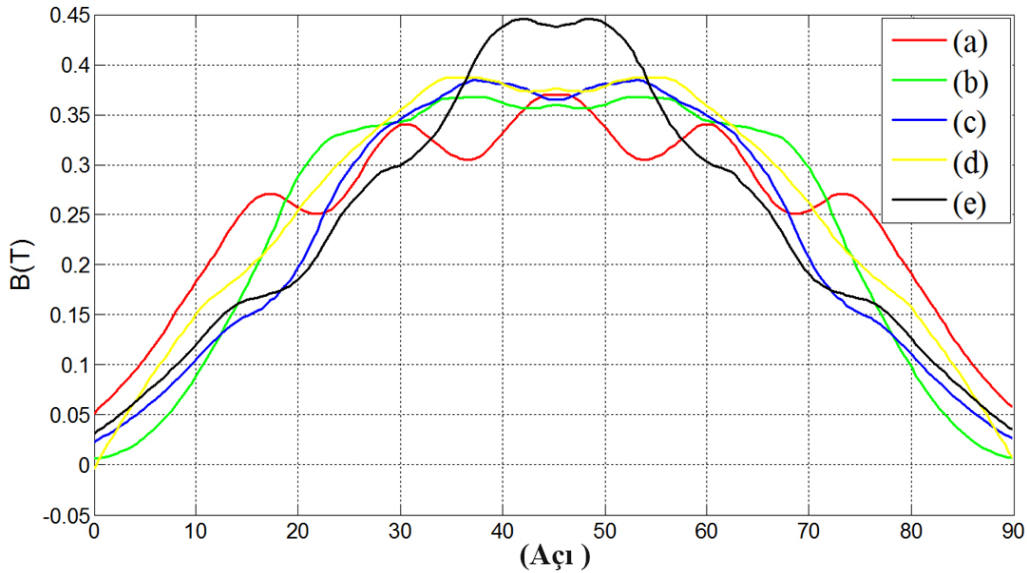
**Şekil 5.12:** Halbach dizilimlerinin moment karşılaştırması (a-Radyal dizilim, b- Yay geometride 8 segmentli, c- Yay geometride 12 segmentli, d- Yay geometride 16 segmentli, e- Üçgen geometride 16 segmentli).

Referans motor ve Halbach dizilimli motor modellerinin aynı giriş gerilimde ürettikleri moment karşılaştırılması Şekil 5.12'te verilmiştir. Bu durumda, Halbach dizilimli motorların  $2800 \text{ min}^{-1}$  hızında, aynı giriş gerilimi için daha fazla moment ürettikleri görülmektedir. Benzer şekilde, tüm motorlar nominal yük olan 0.26 Nm ile yüklendiğinde, Halbach dizilimli motorlar %7-8 oranlarında  $2800 \text{ min}^{-1}$  hızın üstüne çıkmaktadırlar. Sonuç olarak, Halbach dizilimleri, aynı gerilim değerinde motorun daha fazla mekanik güç üretmesi yönünde etki etmektedir. Bu durumun verim üzerine etkisine bakıldığında, uygulanan Halbach dizilimlerinin motora negatif

yönde etki ettiği, Çizelge 5.4'te sunulan verim karşılaştırma tablosunda görülmektedir.

**Çizelge 5.4:** Motor varyasyonlarının güç ve verim karşılaştırması.

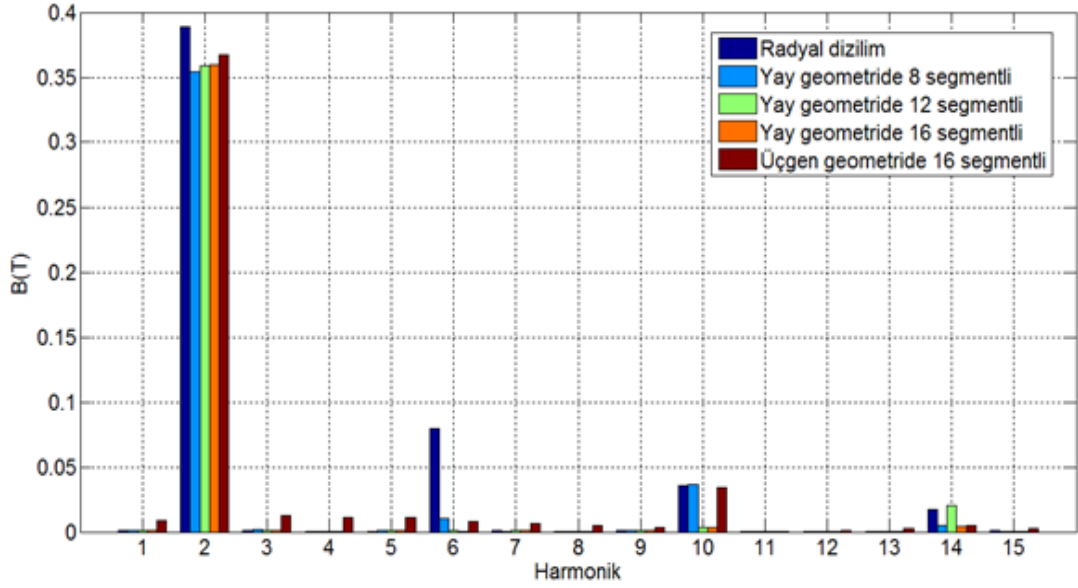
Mıknatıs Dizilim Tipi	Giriş Gücü (W)	Çıkış Gücü (W)	Moment (Nm)	Verim
Radyal Dizilim	97	75	0,26	77.30%
Yay geometride 8 segmentli	125	94	0,32	75.20%
Yay geometride 12 segmentli	122	92	0,31	75.41%
Yay geometride 16 segmentli	121	92	0,31	76.03%
Üçgen geometride 16 segmentli	116	89	0,3	76.72%



**Şekil 5.13:** Halbach dizilimlerinin hava aralığı akı dağılımı karşılaştırması (a-Radyal dizilim, b- Yay geometride 8 segmentli, c- Yay geometride 12 segmentli, d- Yay geometride 16 segmentli, e- Üçgen geometride 16 segmentli).

Bu durumun nedenini açıklamak amacıyla, her bir motorun hava aralığı akı dağılımları incelenecektir. Şekil 5.13'te tüm referans motor ve Halbach dizilimli motor modellerinin hava aralığı akı dağılım karşılaştırması verilmiştir. Bu karşılaştırmada üçgen geometrideki 16 segmentli Halbach dizilime sahip motor, tepe değer olarak diğer dizilimlerin önündedir. Yay geometrisindeki Halbach dizilimli motorlar da, radyal dizilime sahip referans motordan daha yüksek bir tepe değere sahiptir. Literatürde incelendiği üzere, Halbach dizilimin hava aralığındaki akı

dağılımının genliğini arttırması beklenen bir durumdur. Bu durum, hava aralığının akı dağılımının sinüzoidal şekline de katkı da bulunmaktadır. Fakat Halbach dizilimli motorların hava aralığı akı dağılımı tepe değeri daha yüksek ve daha sinüzoidal şekilde olsa da, toplam hava aralığı akısı, radyal dizilimli referans motorun hava aralığı akı yoğunluğundan daha azdır. Bu durum, Şekil 5.14'te verilen hava aralığı akı yoğunluklarının spektrum analizi karşılaştırmasında görülmektedir.



**Şekil 5.14:** Halbach dizilimlerinin hava aralığı akısı spektrum karşılaştırması.

Spektrum analizde, yay geometride 16 segmente sahip Halbach diziliminin, hava aralığı akı dağılımı, en az harmoniğe sahip olurken, sinüzoidal şekle en yakın olanıdır. Halbach dizilimlerinin temel bileşenlerini kendi aralarında karşılaştırdığımızda, yay geometrili dizilimlerde, segment artışının pozitif etkisi görülmektedir. Ayrıca, üçgen geometrideki dizilimin, Halbach dizaynları arasında en yüksek hava aralığı akı dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Fakat referans motorda kullanılan radyal dizilimin, tüm Halbach dizilimli motorlardan daha yüksek temel bileşene sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda, Halbach dizilimlerin referans motor üzerinde hava aralığı akı dağılımını zayıflattığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Hava aralığı alan zayıflaması, motor performansında denklem 2.1'den anlaşılacağı gibi, aynı giriş gerilimi değeri için, akım yoğunluğu artışına neden olur. Bu durum, makinenin aynı giriş gerilimde daha fazla moment üretmesine sebep olarak, çıkış gücünü yükseltir. Fakat artan akım yoğunluğu nedeniyle kaynaktan çekilen güç artar ve bakır kayıpları yükselir. Artan kayıplar nedeniyle de verimlilikte azalma yaşanır.

Bu durum, literatürde incelendiği üzere, kısıtlamaların ve referans motor geometrisinin yeterli mıknatıs yüksekliğine imkân tanımaması nedeniyle, Halbach diziliminin faydalı olduğu kritik yükseklik değeri aşılammıştır. Denklem 3.1 ve 3.2’de, iç rotorlu sistem kullanıldığından dolayı, silindirik koordinatlardaki  $r$  ve  $\theta$  bileşenlerinin farkı, manyetik vektörü tayin etmektedir. Bu bileşenlerden, mıknatıs yüksekliği ile alakalı olan  $r$  bileşeni zayıf kaldığından, Halbach dizilimi, radyal dizilime oranla daha zayıf alan yaratır. Spektrum analizleri, 16 segmentli yay geometrideki diziliminin, en az harmonikli hava aralığı akı dağılımına sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, Halbach dizilimleri kendi aralarında karşılaştırıldığında, üçgen geometrideki dizilim, motor performansı açısından en yüksek katkı sağlayan dizilimdir. Segment sayısındaki artış, performansa pozitif katkı sağlarken, hava aralığı akı dağılımının sinüzoidal şekline de katkıda bulunmaktadır. Bunun dışında radyal dizilimle karşılaştırıldığında, Halbach diziliminin fırçasız doğru akım motoru performansına sağladığı pozitif etkiler, her geometri yapısı için geçerli değildir. Halbach diziliminin pozitif etkilerinden faydalanabilmek için, literatürdeki mıknatıs kritik yüksekliği koşulunun, geometri olarak motor yapısına uygulanabilirliğinin analiz edilmesi gereklidir.

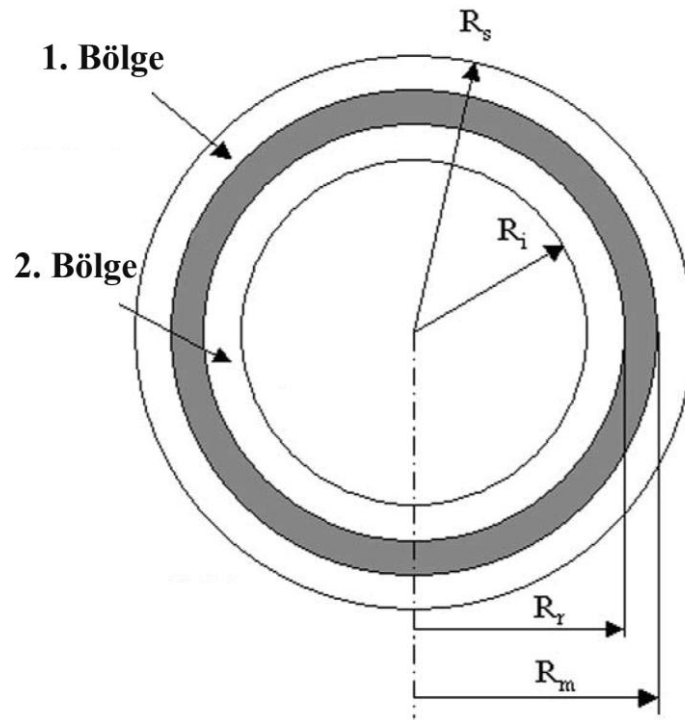
Bu nedenle, mıknatıs hacmi kısıtlaması kaldırılarak, Halbach dizilimleri ve radyal dizilim, aynı mıknatıs hacminde olacak şekilde, farklı mıknatıs yüksekliklerinde karşılaştırılarak, Halbach diziliminin faydalı olduğu koşul ortaya konulacaktır.

### **5.3 Halbach Dizilimlerinde Mıknatıs Yüksekliğinin Performansa Etkisi**

Halbach dizilimlerinde, mıknatıs yüksekliğinin performans etkisini ortaya koymak amacıyla, ilk olarak hava aralığı akı dağılımının analitik analizi gerçekleştirilecektir. Bu analiz sonrasında, radyal ve 12 segmentli bir Halbach dizilimi aynı mıknatıs hacimlerinde, mıknatıs yüksekliği arttırılarak ayrı ayrı modellenecek ve FEM ile analiz karşılaştırılması yapılacaktır.

### 5.3.1 Mıknatıs yüksekliği etkisinin analitik analizi

Halbach dizilimlerinde, mıknatıs yüksekliği tasarımda önemli bir parametredir. Analitik analiz yöntemiyle, farklı mıknatıs yüksekliği değerlerinde, fırçasız doğru akım motoru hava aralığı akı dağılımları karşılaştırılacaktır. Bu amaçla, Halbach diziliminin analitik analizinde kullanılacak geometrik ve motor parametreleri Çizelge 5.5'te referans motor değerleri ile verilmiştir. Bu geometrik parametrelerin karşılığı ayrıca Şekil 5.15'da sunulmuştur.



**Şekil 5.15:** Halbach diziliminin analitik manyetik alan modelinde kullanılacak geometrik parametreler [15].

**Çizelge 5.5:** Halbach hava aralığı analitik analizinde kullanılacak geometrik parametreler.

Sembol	Tanım
$R_i$	Rotor laminasyonu iç çapı
$R_r$	Rotor laminasyonu dış çapı
$R_m$	Mıknatıs dış çapı
$R_s$	Stator iç çapı
$h_{pm}$	Mıknatıs yüksekliği
$g$	Hava aralığı
$p$	Kutup sayısı
$B_r$	Mıknatıs Kalıcılığı

Silindirik koordinatlarda, fırçasız doğru akım motoru rotorunun iç ve dış bölgeleri için skaler manyetik potansiyellerden kurulu manyetik alan denklemleri, sınır koşulları çerçevesinde çözülerek, geometrik parametrelerin fonksiyonu olan denklemler elde edilmiştir (5.1, 5.2) [15]. Bu denklemlerden, 5.3 ve 5.4, Şekil 5.15’da tanımlanmış alan kuvvetlendirme bölgesi olan 1. bölgeye ait manyetik alanın  $r$  ve  $\theta$  bileşenleridir [15]. İç rotorlu motor analiz edildiğinden dolayı, bu iki bileşenin farkı, manyetik alanın silindirik koordinatlardaki fonksiyonunu verir. Bu bölge, iç rotorlu fırçasız doğru akım motorunun hava aralığı bölgesini tanımlamaktadır.

Denklem 5.5 ve 5.6 ise, Şekil 4.16’da tanımlanan 2. bölgeye ait olup, iç rotorlu fırçasız doğru akım motorunda, rotor boyunduruğu bölgesini tanımlar. Bu denklemler ise alan zayıflatma bölgesinin manyetik alan ifadesidir.

$$\nabla^2 \varphi_I = \frac{d^2 \varphi_I}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_I}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \varphi_I}{d\theta^2} = 0 \quad R_m < r < R_s \quad (5.1)$$

$$\nabla^2 \varphi_{III} = \frac{d^2 \varphi_{III}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{III}}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \varphi_{III}}{d\theta^2} = 0 \quad R_r < r < R_m \quad (5.2)$$

$$B_{1r} = B_r \frac{p}{p+1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{p+1}}{1 - \left(\frac{R_i}{R_s}\right)^{2p}} \cdot \left[ \left(\frac{r}{R_s}\right)^{p-1} \cdot \left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{p+1} + \left(\frac{R_m}{r}\right)^{p+1} \right] \cos p\theta \quad (5.3)$$

$$B_{1\theta} = -B_r \frac{p}{p+1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{p+1}}{1 - \left(\frac{R_i}{R_s}\right)^{2p}} \cdot \left[ \left(\frac{r}{R_s}\right)^{p-1} \cdot \left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{p+1} - \left(\frac{R_m}{r}\right)^{p+1} \right] \sin p\theta \quad (5.4)$$

$$B_{2r} = B_r \frac{p}{p+1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{p+1}}{1 - \left(\frac{R_i}{R_s}\right)^{2p}} \cdot \left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{2p} \cdot \left[ \left(\frac{r}{R_m}\right)^{p-1} + \left(\frac{R_i}{R_m}\right)^{p-1} \cdot \left(\frac{R_i}{r}\right)^{p+1} \right] \cos p\theta \quad (5.5)$$

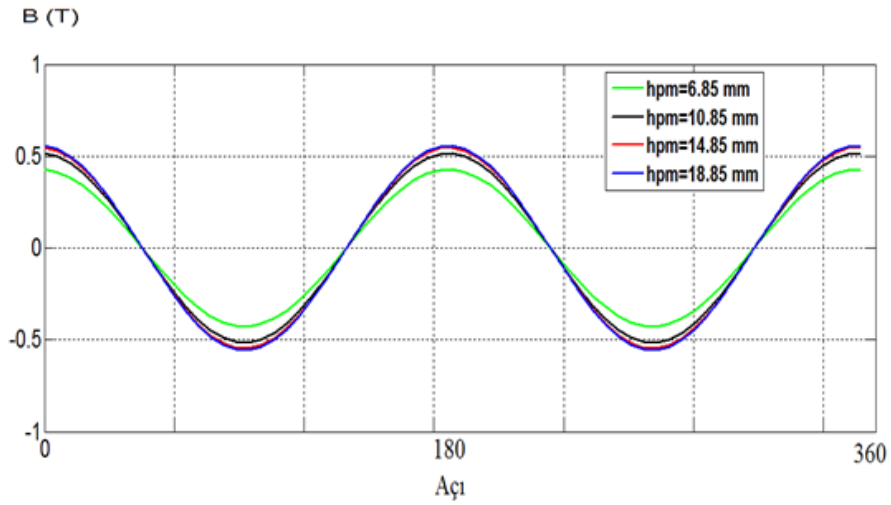
$$B_{2\theta} = -B_r \frac{p}{p+1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{p+1}}{1 - \left(\frac{R_i}{R_s}\right)^{2p}} \cdot \left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{2p} \cdot \left[ \left(\frac{r}{R_m}\right)^{p-1} - \left(\frac{R_i}{R_m}\right)^{p-1} \cdot \left(\frac{R_i}{r}\right)^{p+1} \right] \sin p\theta \quad (5.6)$$

Bu denklemlerin çözümünde [15];

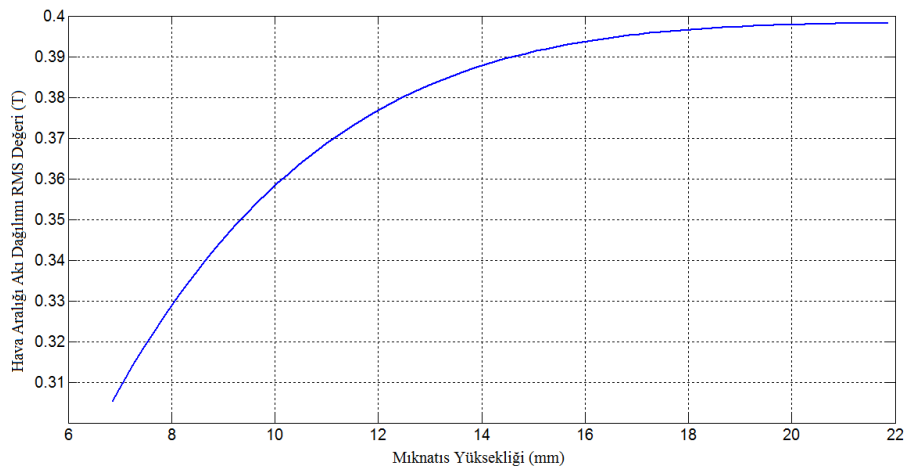
- Mıknatıs geometri ve polarizasyonunun ideal Halbach dizilimidir
- Eksenel uzunluk etkisi ihmal edilip, sonsuz uzunlukta kabul edilmiştir
- Rotor boyunduruğunun sonsuz manyetik geçirgenliktedir.
- Mıknatıs relatif geçirgenliği  $\mu_r=1$  olarak alınmıştır.

Denklemler kullanılarak, mıknatıs yüksekliği, rotor dış çapını azaltacak şekilde, 4 mm’lik kademelerde toplam 12 mm azaltılarak, hava aralığı akı dağılımı

hesaplanmıştır. Motor hava aralığı orta noktası olan 27.575 mm yarıçapındaki dairede 360°'lik alanda, hesaplanan akı değerleri eğri haline getirilmiştir. Sonuç olarak, Şekil 5.16'deki alan dağılımları ortaya çıkmıştır. Artan mıknatıs yüksekliğinin belli bir limite yaklaşan bir alan etkisi olduğu görülmektedir. Bunu daha hassas olarak ifade etmek için, mıknatıs yüksekliği daha küçük artışlar ile hava aralığı manyetik alanının tepe değeri ve efektif değeri analizleri Şekil 5.17'de sunulmuştur. Artan mıknatıs yüksekliğinin alan kuvvetlendirme etkisinin yaklaştığı limit değerler bu şekilde görülmektedir.



**Şekil 5.16:** Farklı mıknatıs yüksekliklerindeki Halbach dizilimlerinin hava aralığı akı dağılımları.

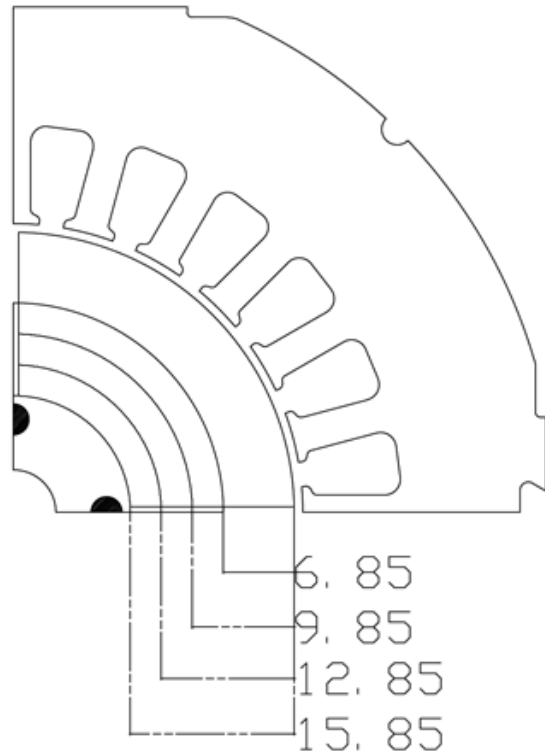


**Şekil 5.17:** Halbach dizilimin artan mıknatıs yüksekliğinin hava aralığı akı dağılımına etkisi.

### 5.3.2 Mıknatıs yüksekliği etkisinin FEM analizi

Literatürde, fırçasız doğru akım motorlarında Halbach mıknatıs diziliminin, radyal mıknatıs diziliminden daha yüksek performans etkisi yaratabilmesi için, mıknatıs yüksekliğinin kritik bir değerin üstünde olması gerekliliği konusunda çalışmalar mevcuttur. Bu kritik değeri elde etmek amacıyla, radyal ve Halbach dizilimine sahip iki motor modeli, farklı mıknatıs yüksekliklerinde sonlu elemanlar ile analiz edilecektir.

Referans motorun 6.85 mm olan mıknatıs yüksekliği, 3 mm hassasiyetle yükseltilerek, radyal ve yay geometrili 12 segmentli Halbach dizilime sahip motorların, hava aralığı manyetik akı dağılımları karşılaştırılacaktır. Bu amaçla, iki motorun mıknatıs yüksekliği, 4 farklı kademede tasarlanarak, toplam 8 motor modeli sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilecektir. Motorların geometri yapılarına uygulanacak değişim Şekil 5.18’de görülmektedir.

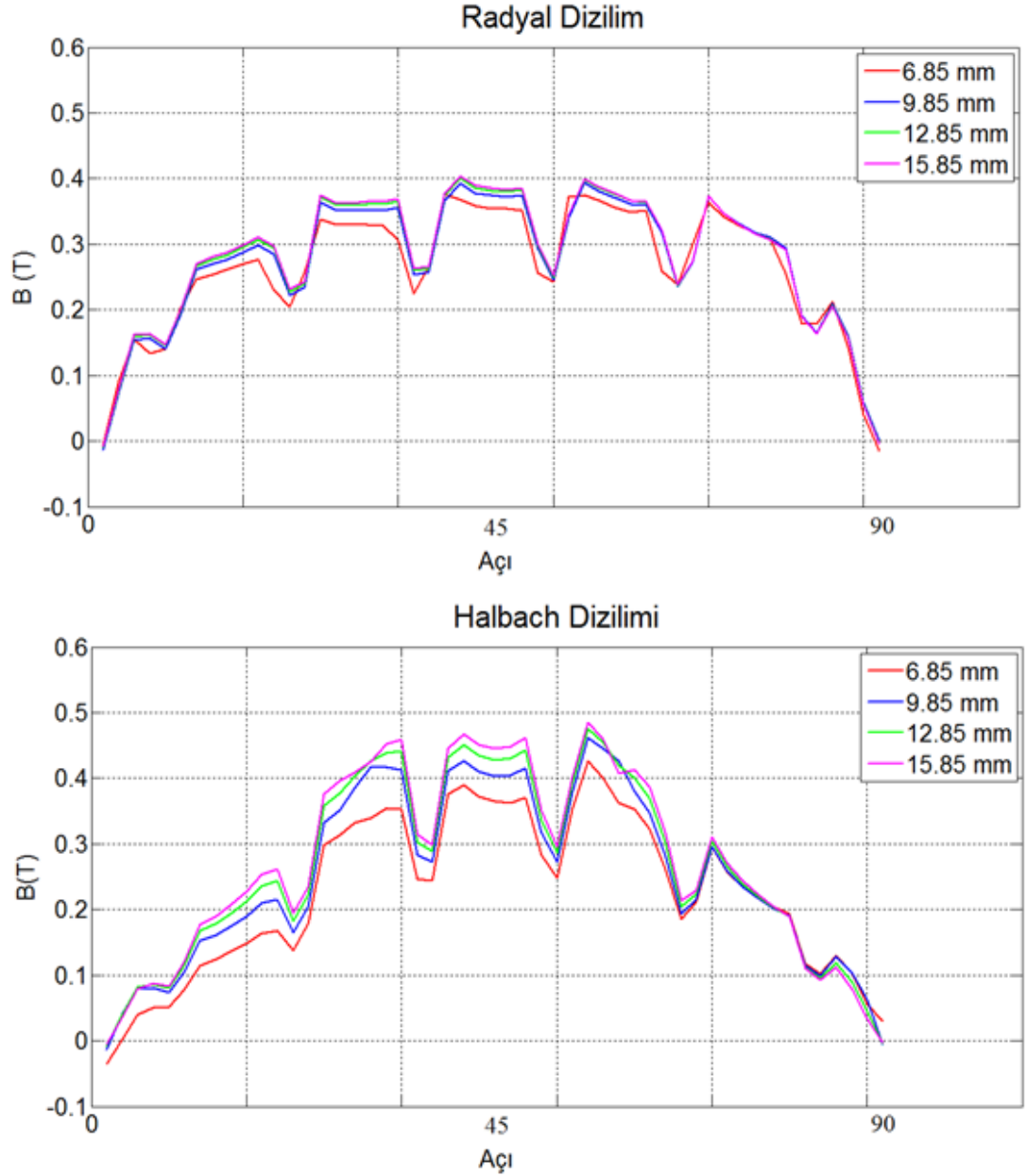


**Şekil 5.18:** Analiz için modellenecek mıknatıs yüksekliği kademeleri.

Her bir mıknatıs yüksekliğinde analiz edilen, radyal ve Halbach dizilimli motorların hava aralığı manyetik akı dağılımı karşılaştırması yapılan analizler neticesinde Şekil

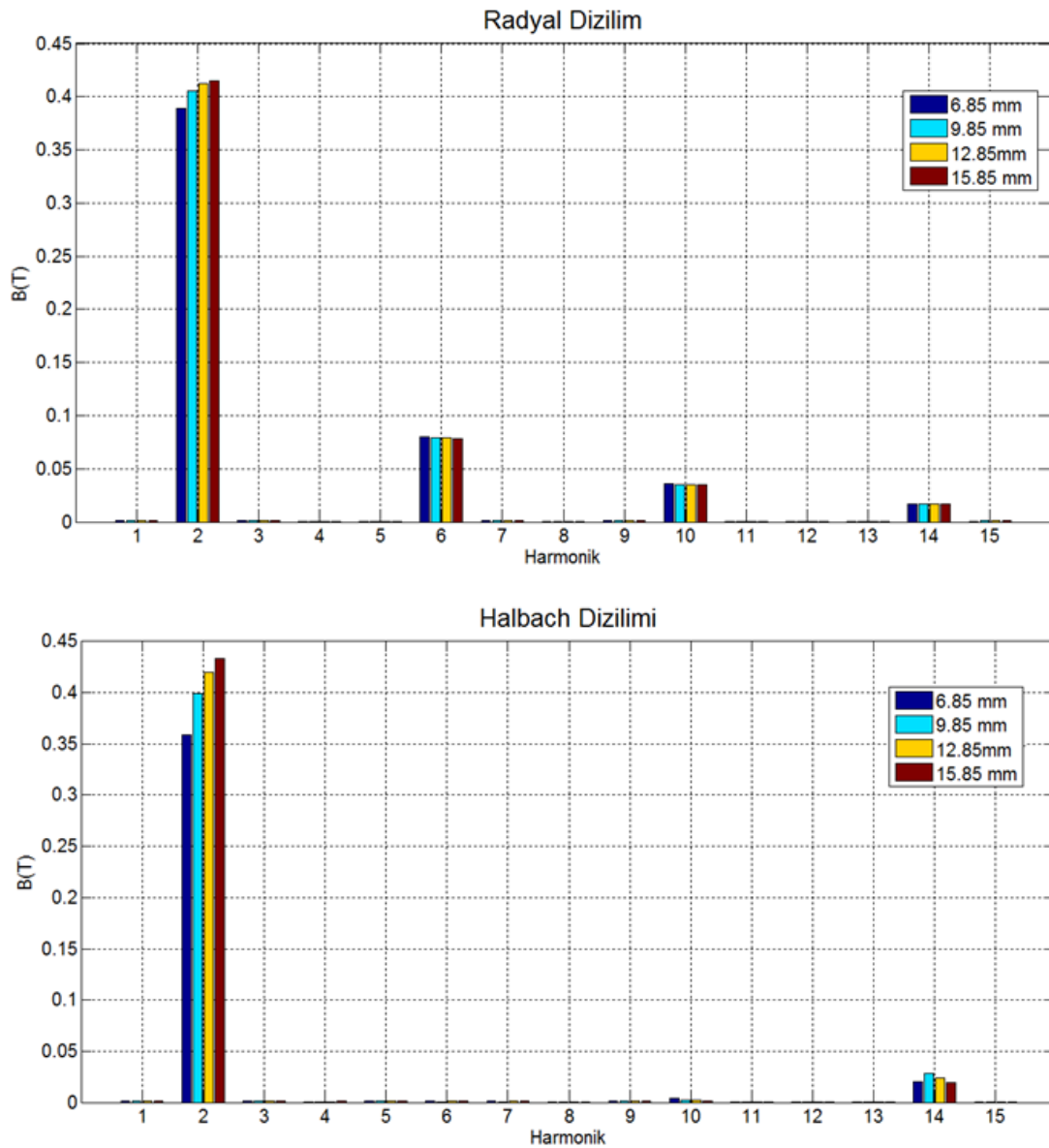


4.20'deki gibi elde edilmiştir. Bu sonuçlarda, artan mıknatıs yüksekliği, Halbach dizilimine sahip motorda hava aralığı akısına daha fazla etki etmektedir. Bu nedenden dolayı, mıknatıs yüksekliğinin başlangıç değerinde, radyal dizilimli motordan daha düşük hava aralığı manyetik alanına sahip olan Halbach dizilimi, belirli bir mıknatıs yüksekliği değerinden sonra radyal dizilimli motorunun hava aralığı manyetik alan değerini, aynı mıknatıs hacmi için geçecektir.



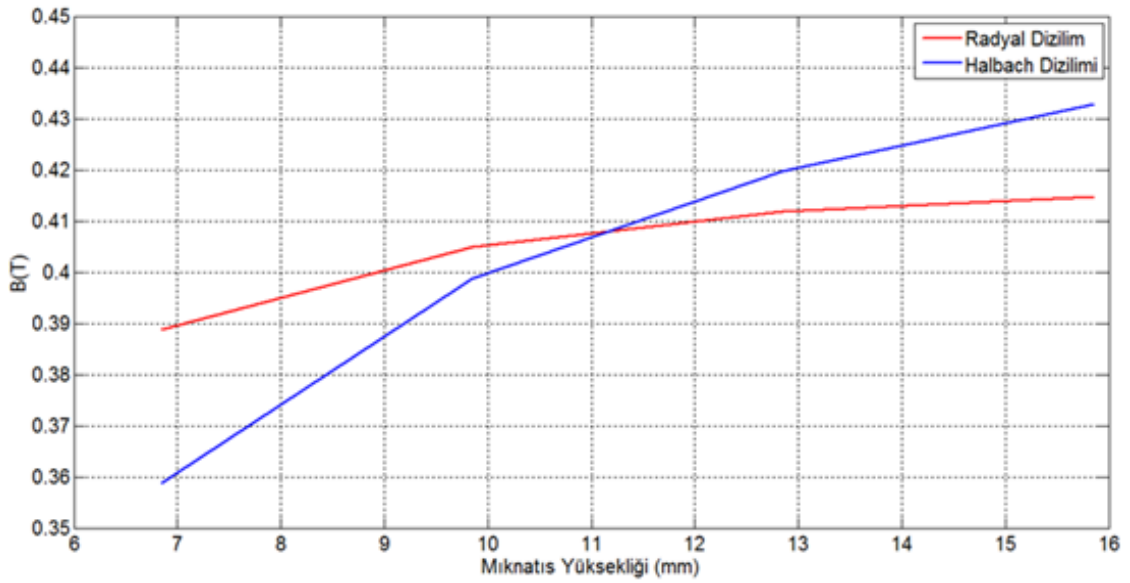
**Şekil 5.19:** Farklı mıknatıs yüksekliği kademelerinde radyal ve Halbach dizilimli motorlarda hava aralığı akı dağılımları.

Hava aralığı manyetik akı dağılımının spektrum analizi Şekil 5.20’de görülmektedir. Mıknatıs yüksekliğinin performansa etkisinin analizde elde edilen sonuçlara benzer şekilde, artan birim mıknatıs yüksekliğinin sağlayacağı manyetik alan katkısı azalarak, bir limit değere yaklaşmaktadır. Karşılaştırma yapıldığında, Halbach dizilimli motorun, artan mıknatıs yüksekliğinin temel bileşene katkısının, radyal dizilimli motorunkinden daha fazla olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, spektrum analizdeki temel bileşenin harmonikleri incelendiğinde, Halbach dizilimli motorun harmonik değerinin çok düşük olup, motorun hava aralığı akı dağılımının, sinüzoidal şekle daha yakın olduğu ortaya çıkmaktadır.



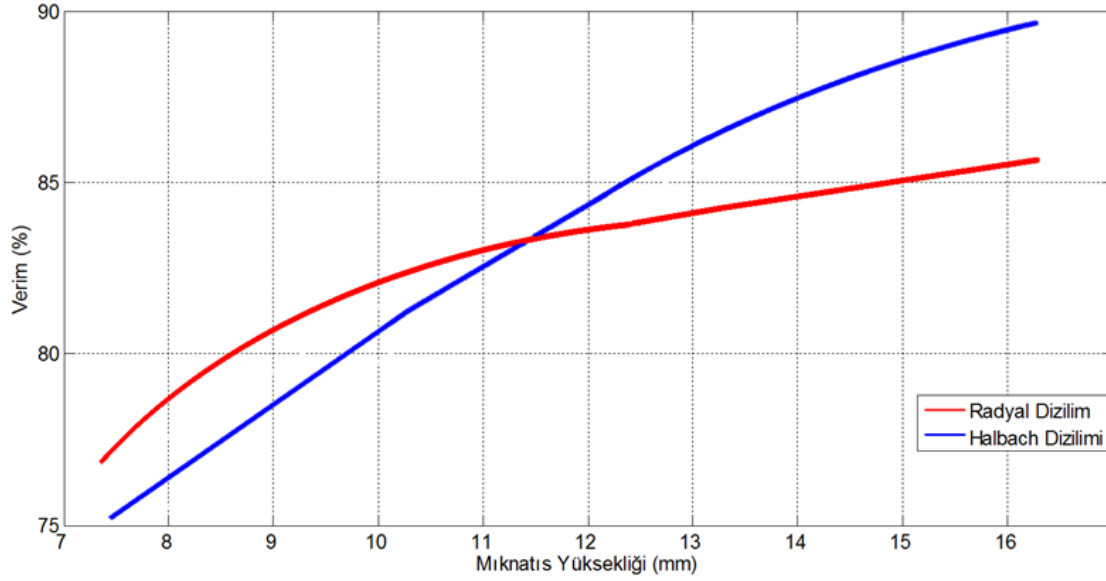
**Şekil 5.20:** Farklı mıknatıs yüksekliği kademelerinde radyal ve Halbach dizilimli motorlarda hava aralığı akı spektrum analizleri.

Arttırılan mıknatıs yüksekliğinin, Halbach dizilimli motorda daha fazla katkı vermesi, kritik bir mıknatıs yüksekliği değerinden itibaren, Halbach dizilimini, radyal dizilimin önüne geçirmektedir. Bu durum, Şekil 5.21’de, her iki motorun spektrum analizindeki temel bileşen değerlerinin karşılaştırılması ile gösterilmiştir. Bu noktada, referans motorun kritik mıknatıs yüksekliği 11.2 mm’dir. Mıknatıs yüksekliği bu değerin altında ise radyal, üzerinde ise de Halbach dizilimi kullanılması, performans açısından faydalı olacaktır.



**Şekil 5.21:** Halbach diziliminin kritik mıknatıs yüksekliği.

Mıknatıs yüksekliğinin, motor verimliliğine etkisi de Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Mıknatıs yüksekliğinin kritik değeri, motor performansı ve verimliliği için de geçerli olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise, hava aralığında kuvvetlendirilen alanın, motorun mevcut çalışma koşullarında daha az akım yoğunluğuna sahip olması ve dolayısıyla kayıpları azaltmasıdır. Sonuç olarak, Halbach dizilimi, mıknatıs yüksekliği kritik değerinden sonra daha fazla alan kuvvetlendirme yeteneğine sahip olması nedeniyle, verim açısından da radyal dizilimin üzerine çıkmaktadır.



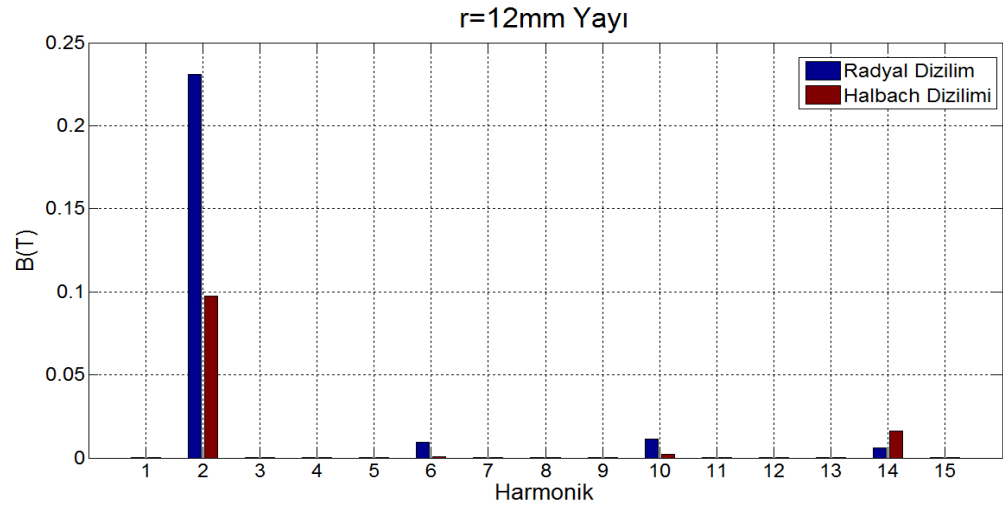
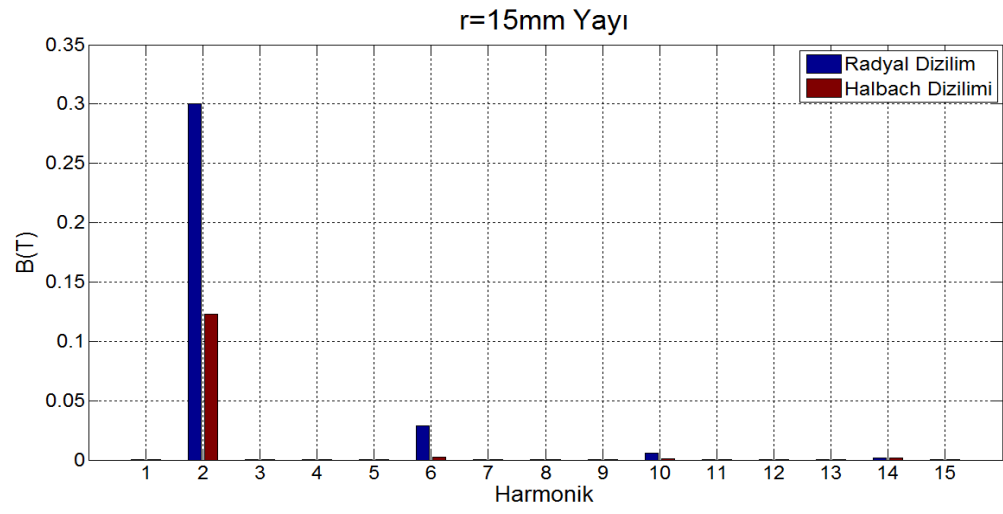
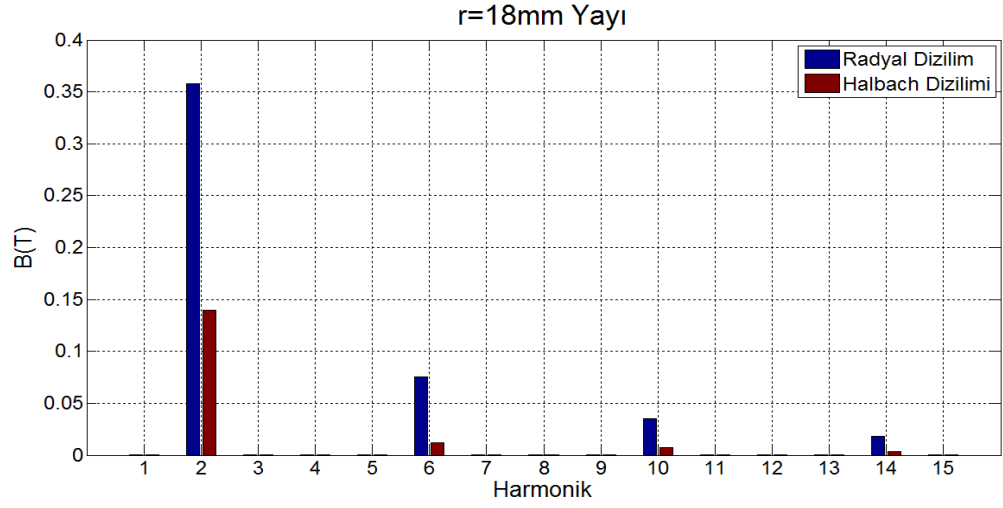
**Şekil 5.22:** Farklı mıknatıs yüksekliği kademelerinde radyal ve Halbach dizilimli motorlarda verimlilik karşılaştırması.

#### 5.4 Halbach Diziliminin Kalkanlama Etkisi Analizi

Farklı Halbach dizilimlerinin referans motor üzerinde analizleri neticesinde, üçgen geometriye sahip olan 16 segmentli Halbach diziliminin, alan zayıflatma konusunda en iyi seçenek olduğu sonucu elde edilmiştir.

Bu dizilimin rotor boyunduruğunda meydana getirdiği alan zayıflatma etkisi, radyal mıknatıs dizilimine sahip referans motor ile akı yoğunluğu karşılaştırması yapılarak ortaya çıkarılmıştır. Şekil 5.23’de, iki motorun, rotor boyunduruğu içerisinde, üç farklı yarı çap kademesine ait manyetik akı dağılımları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, Halbach dizilimin, %60 civarında rotor boyunduruğu içerisinde alan zayıflatığı sonucu elde edilmiştir.

Literatürde, bu durumu avantaja çevirmek amacıyla, oyuk rotor ve ya manyetik olmayan malzeme ile rotor boyunduruğu tasarımları önerilmiştir. Bu tasarımların, hafiflik, maliyet ve hızlanma performansı gibi çıktıları mevcutken, Halbach dizilimli yapılarda çok az bir verimlilik kaybına neden olur. Benzer rotor tasarımları, radyal mıknatıs yapısına sahip motorlara uygulandığında ise, verim açısından önemli kayıplara neden olmaktadır.



**Şekil 5.23:** Radyal ve Halbach dizilimli motorların rotor manyetik akı yoğunluğu karşılaştırması.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Halbach mıknatıs dizilimleri, birçok teknik alanda yeni uygulama alanları yaratırken, son yıllarda kalıcı mıknatıslı elektrik motorlarında da önemli gelişmelere neden olmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmada, farklı Halbach dizilim yapılarının, standart radyal mıknatıslı bir fırçasız doğru akım motoruna kısıtlamalar çerçevesinde uygulanarak, motor performansını nasıl etkilediği ortaya konulmuştur.

Referans motora, farklı segment sayılarında ve geometrilerde dört farklı Halbach dizilimi uygulanarak, dört yeni fırçasız doğru akım modeli tasarlanmıştır. Bu tasarımlar, mıknatıs yapıları hariç bir biriyle özdeşdir. Yapılan analizler sonucunda, üçgen segment geometrisine sahip Halbach dizilimine sahip motor, Halbach dizilimleri arasında en yüksek performansa sahip motordur. Bunun yanında, rotor boyunduruğundaki en yüksek alan zayıflatma etkisine de sahiptir. Farklı segmentlerdeki Halbach dizilimine sahip motorların karşılaştırmasında ise segment sayısındaki artışın, performansı olumlu yönde etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır. Motor konfigürasyonlarının, hava aralığı akı dağılım spektrumları analizi neticesinde de, 16 segmentli, yay geometrideki Halbach dizilimine sahip motorun, en az harmoniğe sahip olup, akı dağılımı sinüzoidale en yakın olduğu neticesine varılmıştır.

Farklı yapılarıdaki Halbach motorları, radyal mıknatıs yapısına sahip referans motor ile karşılaştırıldığında, Halbach dizilimine sahip motorların daha düşük verimli oldukları ortaya çıkmıştır. Bu durum Halbach dizilimlerinin, geometrik sınırlamalar sonucu, kritik mıknatıs yüksekliğinin altında kalınması nedeniyle, ortaya çıkmıştır. Literatürde de bu sonucu destekleyen bulgular mevcuttur.

Referans motorun Halbach mıknatıs dizilimi uygulamasına elverişli olmaması neticesinde, kritik mıknatıs yüksekliği tespiti için farklı mıknatıs yüksekliklerinde analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, artan birim mıknatıs yüksekliğinin, hava aralığı akı dağılımına katkısı, Halbach dizilimine sahip motorlarda yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, Halbach dizilimlerinin hava aralığı akı yoğunluğu, belirli bir mıknatıs yüksekliğinden sonra, radyal dizilimin akı

yoğunluğunu geride bırakır. Halbach diziliminin, fırçasız doğru akım motoru için faydalı olduğu bu kritik nokta tespit edilerek, mıknatıs yüksekliğinin, motor verimi ile paralel olduğu ortaya konmuştur.

Halbach diziliminin alan kuvvetlendirme etkisinin yanında, rotor içinde sağladığı alan zayıflatma etkisi de analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, rotor boyunduruğu manyetik alanında önemli bir azalma tespit edilmiştir. Bu sayede, rotor malzemesinin manyetik olmayan malzeme ile tasarlanması mümkün hale gelir. Bu durum Halbach dizilimlerinde çok az bir performans düşüşüne neden olurken, radyal dizilime sahip bir motor için önemli bir kayba neden olur.

Sonuç olarak, Halbach dizilimi ile tasarlanacak motorlarda, kritik mıknatıs yüksekliği analizi yapılması gerekmektedir. Motor geometrisi tasarımında, yüksek verim ve performans elde etmek amacıyla, bu kritik noktanın yukarısına çıkılabiliyorsa Halbach dizilimleri, çıkılamıyor ise radyal dizilim tercih edilmelidir. Kritik mıknatıs yüksekliğinin aşılamadığı durumlarda, dizilimin alan zayıflatma özelliği kullanılarak, rotor boyunduruğu manyetik olmayan malzeme ile tasarlanarak, düşük maliyette ve düşük eylemsizlik momentinde daha hafif ve daha yüksek dinamik tepki özelliği elde edilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Adrian M., Marian L.** (2008). Optimization Of The Pm Array Of Brushless Dc Motor For Minimum Cogging Torque. Department of Electrical Engineering, Automatic Control and Computer Science, *Technical University of Opole, ul. Luboszycka*
- [2] **Bernard T. M., Robert F. P., Gary R. D., Donald A. B.** (1994). Halbach Array Motor/Generators - A Novel Generalized Electric Machine. Lawrence Livermore National Laboratory. *Halbach Festschrift Symposium, Berkeley, CA*
- [3] **Hanselman D. C.,** (2006). Brushless Permanent Magnet Motor Design. *Second Edition, Magna Physics Publishing, USA.*
- [4] **Herbert A. L., Ernest P.** (1987). Novel High Field Permanent Magnet Flux Sources. U.S. Army Electronics Technology and Devices Laboratory. *IEEE Transactions on Magnetics*
- [5] **Herbert A. L., Ernest P., Douglas J. B.** (1988). A Novel Self Shielding Permanent Magnet Rotor Assembly. U.S. Army Electronics Technology and Device Laboratory, Fort Monmouth. *Journal of Applied Physics*
- [6] **J. Ofori-Tenkorrang, and J. H. Lang,** (1995). A comparative analysis of torque production in Halbach and conventional surface-mounted permanentmagnet synchronous motors. *IEEE Industry Applications Conference*
- [7] **Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D.** (2002). Analysis of Electric Machinery and Drive. Second Edition Wiley Inter-Science, *IEEE Press*
- [8] **Cook Robert** (2002). Concepts and Applications of Finite Element Analysis. Fourth Edition JohnWiley & Sons
- [9] **M. H. Ravichandran, V. T. S. Achari, C. C. Joseph, Robert D.** (2010). Magnetic Field Analysis and Performance Assessment of Halbach Array Permanent Magnet Brushless DC Motor for Satellite Payload Drive Mechanism *IEEE*
- [10] **Mallinson J.C.** (1973). One-Sided Fluxes - A Magnetic Curiosity?, *IEEE Transactions on Magnetics.*
- [11] **Padmaraja, Y.** (2003). Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. *Microchip Technology Inc.*

- [12] **Praveen R. P., Ravichandran M. H., Sadasivan A., Jagathy R. V. P., Madhu G., Bindu G. R.** (2010). Design and Analysis of Zero Cogging Brushless DC Motor for Spacecraft Applications. *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference.*
- [13] **Siavash S., Leila P.** (2011). Multiobjective Design Optimization of Five-Phase Halbach Array Permanent-Magnet Machine. Department of Electrical, Computer and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 47, NO. 6,*
- [14] **Suman D., Leila P., Kamiar J. K.** (2009). Design and Analysis of Halbach Array Permanent Magnet Motor for High Acceleration Applications. Dept. of Electrical, Computer and Systems Engg Rensselaer Polytechnic Institute and The Boeing Company Seattle, WA, *IEEE*
- [15] **Xia Z. P. , Zhu Z. Q., Howe D.** (2004). Analytical Magnetic Field Analysis of Halbach Magnetized Permanent-Magnet Machines. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 40, NO. 4,*
- [16] **Xu Y., Feng K.** (2006). Analysis on Toothless Permanent Magnet Machine with Halbach Array. School of Electric Engineering, Shandong University, Jinan, P.R.China Wendeng Allwin Motor Co., Ltd, Wengdeng, P.R.China. *IEEE*

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Ferit GÜLER

**Doğum Yeri ve Tarihi:** İSTANBUL, 02.11.1987

**E-Posta:** ferit@elecreate.com

**Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü

**Mesleki Deneyim ve Ödüller:**

- ❖ **Mart 2012 – Devam Ediyor :** Elecreate LTD.
  - Kurucu Ortak / Proje ve İş Geliştirme
- ❖ **Ağustos 2010 – Mart 2012 :** GERSAN Elektrik A.Ş.
  - Ürün Geliştirme Mühendisi
  - İç Denetçi (ISO 9001:2008, ISO 14001)

**Yayın ve Patent Listesi:**

- ❖ “*Busbar Enerji Hattı Üzerinden Haberleşen Düşük Maliyetli Bir Aydınlatma Otomasyonu Sistemi*” II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 2011.
- ❖ “*Elektrikli Araç Şarj İstasyonları*” II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 2011.
- ❖ “*Mobil cihazlar için bütünleşik ödeme unsuruna sahip kablosuz şarj cihazı.*”  
Faydalı Modeli, 2012

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Güler F., Ergene L.T., Ekin C., 2013: HALBACH ARRAY VARIATIONS ON BLDC MOTOR UNDER MAGNET CONSTRAINT. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drive*, May 13-17, 2013 Istanbul, Turkey.