

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKSENEL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE
RADYAL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUYLA
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ertuğrul YEŞİLBAĞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKSENEL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE
RADYAL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUYLA
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Etuğrul YEŞİLBAĞ
504131006**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE

Aralık 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504131006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ertuğrul YEŞİLBAĞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**EKSENEL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE RADYAL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUYLA KARŞILAŞTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Öğr. Gör. Dr. Taşdemir AŞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Kasım 2015
Savunma Tarihi : 28 Aralık 2015

Aileme ve Sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca, değerli yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve katkılarıyla beni yönlendiren yüksek lisans tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezim süresince bilgileriyle bana destek olan Sayın Yasemin DÖNMEZER ERTUĞRUL'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince, 2228-A son sınıf lisans öğrencileri için lisansüstü burs programı kapsamında, beni maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na (TÜBİTAK-BİDEB) değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca, sıkıntılı ve mutlu olduğum tüm zamanlarda yanımda olan tüm yakın dostlarıma da ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Beni bu konuma getiren, en yoğun ve zor anlarımda hep yanımda olan, desteklerini ve güvenlerini her zaman yanımda hissettiğim, aileme can-ı gönülden minnettarlığımı sunuyorum.

Kasım 2015

Ertuğrul YEŞİLBAĞ
(Elektrik Mühendisi&Elektronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. SÜREKLİ MIKNATISLAR VE FIRÇASIZ SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLAR.....	11
2.1 Sürekli Mıknatıslı Malzemeler.....	11
2.2 Fırçasız Sürekli Mıknatıslı Motorlar.....	12
2.2.1 Sürekli mıknatıslı senkron motorlar.....	13
2.2.2 Fırçasız doğru akım motorları.....	13
2.2.2.1 Radyal akıllı fırçasız doğru akım motorları	18
2.2.2.2 Eksenel akıllı fırçasız doğru akım motorları	19
3. RADYAL VE EKSENEL AKILI MOTORLARIN KARŞILAŞTIRILMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	23
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	23
3.2 Analitik Yöntem.....	26
4. RADYAL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU ANALİZİ	27
4.1 Radyal Akıllı FDAM Özellikleri	27
4.2 Radyal Akıllı FDAM SEY Modeli ve Ağ Yapısı	30
4.3 Radyal Akıllı FDAM SEY Analizleri	31
4.3.1 Zıt E.M.K. analizleri	32
4.3.2 Nominal yükte analizler	35
4.4 Radyal Motor Ağırlık, Hacim ve Verim Hesabı	39
5. EKSENEL AKILI FDAM TASARIMI.....	43
6. EKSENEL AKILI FDAM ANALİZLERİ.....	53
6.1 Eksenel Akıllı FDAM SEY Analizleri.....	55
6.1.1 Zıt E.M.K. analizi.....	55
6.1.2 Nominal yük analizi	57
6.2 Eksenel Akıllı FDAM'nun Moment Dalgallılığının Azaltılması.....	60
6.3 Eksenel Akıllı FDAM Kayıp ve Verim Analizi.....	64
7. SONUÇLAR	67
8. KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75

KISALTMALAR

AlNiCo	: Alüminyum-Nikel-Kobalt
CEMEP	: European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics
E.M.K.	: Elektro Motor Kuvveti
FDAM	: Fırçasız Doğru Akım Motoru (Brushless Direct Current Motor-BLDC)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
NdFeB	: Neodimyum-Demir-Bor
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SmCo	: Samaryum-Kobalt
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu

SEMBOLLER

A	: Manyetik vektör potansiyeli
A_S	: Stator çizgisel akım yoğunluğu
S_g	: Hava aralığı kesit alanı
B	: Manyetik akı yoğunluğu
B_g	: Hava aralığı akı yoğunluğu
B_r	: Kalıcı mıknatısiyet
B_{RB}	: Rotor boyunduruğunun akı yoğunluğu
B_{SB}	: Stator boyunduruğunun akı yoğunluğu
B_U	: Mıknatıs yüzeyinden elde edilebilir akı yoğunluğu
D	: Elektriksel akı yoğunluğu (elektriksel deplasman)
$D_{ETKİN}$: Eksenel motor için etkin çap
D_g	: Ortalama hava aralığı çapı
D_i	: Eksenel motor iç çapı
D_o	: Eksenel motor dış çapı
E	: Elektrik alan şiddeti
e_{as}	: Stator a fazına ait zıt elektro motor kuvveti
f	: Frekans
g	: Hava aralığı kalınlığı
G	: Ağırlık
H	: Manyetik alan şiddeti
I_S	: Stator faz akımı
I_{RMS}	: Faz akımı efektif değeri
i	: Faz akımı
J	: Akım yoğunluğu
J_S	: Stator sargıları akım yoğunluğu
K_{cu}	: Stator olukları doluluk oranı
K_d	: Kaçak akı faktörü
K_e	: Zıt elektro motor kuvveti sabiti
K_i	: Akım sabiti
K_p	: Güç katsayısı
K_t	: Moment sabiti
l	: Bir faz sarımları toplam uzunluğu
L_{cu}	: Eksenel motor için stator sargılarının laminasyondan taşıdığı radyal uzunluk
$L_{ETKİN}$: Eksenel akılı motor için etkin eksenel uzunluk
L_M	: Eksenel akılı motor için mıknatıs eksenel kalınlığı
L_R	: Eksenel akılı motor için rotor toplam eksenel uzunluğu
L_{RB}	: Eksenel akılı motor için rotor boyunduruğu eksenel uzunluğu
L_S	: Eksenel akılı motor için stator toplam eksenel uzunluğu
L_{SB}	: Eksenel akılı motor için stator boyunduruğu eksenel uzunluğu
L_{SO}	: Eksenel akılı motor için stator olukları eksenel uzunluğu (derinliği)
L_{st}	: Motorun eksenel paket boyu
n	: Çıkış hızı
n_m	: Mekanik devir sayısı

N	: Sarım sayısı
N_{faz}	: Faz başına sarım sayısı
p	: Çift kutup sayısı
P_{BAKIR}	: Stator bakır kaybı
$P_{\text{Ç}}$: Çıkış gücü
$P_{\text{DEMİR}}$: Toplam demir kaybı
$P_{\text{DEMİR-ROTOR}}$: Rotor demir kaybı
$P_{\text{DEMİR-STATOR}}$: Stator demir kaybı
$P_{\text{YOĞUNLUK}}$: Hacimsel güç yoğunluğu
R_{ro}	: Rotor dış yüzey yarıçapı
R_{S}	: Stator faz direnci
S	: Stator iletken kesit alanı
T	: Moment
ω_e	: Elektriksel açısal hız
ω_m	: Mekanik açısal hız
λ	: Eksenel motor iç çapın/dış çapa oranı
$\lambda_{\text{EN-İYİ}}$: Güç yoğunluğuna göre en iyi iç çap/dış çap oranı
λ	: Akı halkalanması
Θ_e	: Elektriksel açısal konum
Θ_p	: Açısal kutup adımı
Θ_r	: Rotor mekanik açısal konumu
Φ_g	: Hava aralığı kutup akısı
ρ	: Bakır iletken öz direnci
η	: Motor verimi
μ	: Manyetik geçirgenlik
ε	: Elektriksel geçirgenlik
σ	: Öz iletkenlik

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Şekil 2.2'deki durum için stator sargıların aktif oldukları aralıklar.	16
Çizelge 2.2 : Tam bir devirde anahtarların iletimde oldukları aralıklar.	17
Çizelge 4.1 : Radyal akılı FDAM plaka değerleri.	28
Çizelge 4.2 : Radyal akılı FDAM'nun özellikleri.	28
Çizelge 4.3 : 1000 min ⁻¹ hızında deney ve SEY sonucunun karşılaştırılması.	35
Çizelge 4.4 : Motor mil momentinin karşılaştırılması.	37
Çizelge 4.5 : Eksenel ve radyal akılı motorlarda kullanılan malzeme yoğunlukları ve birim fiyatları.	39
Çizelge 4.6 : Radyal akılı motorda kullanılan malzeme ağırlık, hacim ve maliyetleri.	40
Çizelge 5.1 : Farklı kutup sayılarında algoritma sonucu oluşan tasarımların özellikleri.	50
Çizelge 5.2 : Radyal akılı FDAM yerine tasarlanan eksenel akılı FDAM ön tasarım özellikleri.	52
Çizelge 6.1 : 530 min ⁻¹ hızında zıt E.M.K. analitik sonucu ile SEY sonucunun karşılaştırılması.	56
Çizelge 6.2 : 530 min ⁻¹ hızında radyal ve eksenel akılı motorların zıt E.M.K. değerlerinin karşılaştırılması.	56
Çizelge 6.3 : Eksenel akılı motorun nominal yükünde faz akımlarının karşılaştırılması.	59
Çizelge 6.4 : Eksenel akılı motorun nominal yükünde moment değerlerinin karşılaştırılması.	60
Çizelge 6.5 : Farklı α_i değerleri için tasarımların performans karşılaştırması.	62
Çizelge 7.1 : Radyal ve eksenel akılı FDAM'ların karşılaştırılması.	68
Çizelge 7.2 : Radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan malzeme ağırlıkları.	69
Çizelge 7.3 : Radyal ve eksenel akılı motorların moment titreşimleri.	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sürekli mıknatıslı malzemelerdeki gelişmeler a) Maksimum enerji çarpanındaki gelişmeler b) Kalıcı mıknatıslıyet ve giderici kuvvet karşılaştırmasındaki gelişmeler	12
Şekil 2.2 : FDAM endüklenen zıt E.M.K., faz besleme akımları ve güç üretimi.....	16
Şekil 2.3 : FDAM stator fazları ve sürücü devresi	16
Şekil 2.4 : Radyal akılı FDAM modeli	19
Şekil 2.5 : Eksenel akılı FDAM modeli	20
Şekil 2.6 : Eksenel akılı FDAM'ların elektrik motorları ailesindeki yerleri	21
Şekil 2.7 : Eksenel akılı FDAM stator rotor sayılarına göre sınıflandırılması, (a) Tek tabakalı (1 rotor-1 stator), (b) Çift tabakalı (2 rotor-1 stator), (c) Çift tabakalı (1 rotor-2 stator), (d) Çok tabakalı (3 rotor-2 stator)	21
Şekil 3.1 : Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan ayrıklaştırma elemanları (a) 1 Boyutlu, (b) 2 Boyutlu, (c) 3 Boyutlu	24
Şekil 4.1 : Radyal akılı FDAM kesit görüntüsü.	27
Şekil 4.2 : Radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan ferrit sürekli mıknatıs karakteristiği.	29
Şekil 4.3 : Radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan ferromanyetik malzeme karakteristiği.	29
Şekil 4.4 : Radyal akılı FDAM sonlu elemanlara ayrıklaştırılmış modeli.	30
Şekil 4.5 : Hava aralığındaki yüksek yoğunluktaki sonlu elemanlar.....	31
Şekil 4.6 : 200 min ⁻¹ ve 600 min ⁻¹ mekanik hızlarında endüklenen zıt E.M.K'lar... ..	32
Şekil 4.7 : 530 min ⁻¹ mekanik hızında endüklenen zıt E.M.K.....	33
Şekil 4.8 : 1000 min ⁻¹ hızında SEY analizi sonucu oluşan zıt E.M.K.	34
Şekil 4.9 : 1000 min ⁻¹ hızında yapılan test sonucu zıt E.M.K.	34
Şekil 4.10 : Sırasıyla T1, T2, T3, T4, T5 ve T6 transistörlerine ait sürücü devre anahtar akımları.	36
Şekil 4.11 : Stator faz akımları.	36
Şekil 4.12 : SEY analizi sonucu motor milinden elde edilen moment.	37
Şekil 4.13 : Radyal akılı motorun manyetik akı yoğunluğu tayfı.....	38
Şekil 4.14 : Radyal akılı motorun manyetik akı yoğunluğunun maksimum olduğu bölgeler.	38
Şekil 5.1 : Eksenel akılı FDAM temel ölçülerini gösteren modeli.....	44
Şekil 5.2 : Kurulan tasarım algoritması akış diyagramı.	47
Şekil 5.3 : Farklı kutup sayıları için λ' 'ya bağlı hacimsel güç yoğunluğu değişimi. ..	48
Şekil 5.4 : Farklı kutup sayıları için λ' 'ya bağlı moment yoğunluğu değişimi.	48
Şekil 5.5 : Farklı kutup sayıları için λ' 'ya bağlı motor ağırlığı değişimi.....	49
Şekil 5.6 : Farklı kutup sayıları için λ' 'ya bağlı motor aktif hacim değişimi.	49
Şekil 5.7 : Farklı kutup sayıları için λ' 'ya bağlı motor toplam maliyeti değişimi.....	50
Şekil 6.1 : Tasarımı yapılan eksenel akılı FDAM üç boyutlu modeli.	53
Şekil 6.2 : Konsantrik sargıların yerleştirilmesi ile oluşan üç boyutlu eksenel akılı FDAM modeli.	54
Şekil 6.3 : Ağ yapısı ile birlikte eksenel akılı FDAM çeyrek dilim modeli.	55

Şekil 6.4 : Eksenel akılı motorda 530 min^{-1} hızında endüklenen zıt E.M.K.	56
Şekil 6.5 : Eksenel akılı FDAM'ın nominal yükünde anahtar akımları.	57
Şekil 6.6 : Nominal yükte stator faz akımları.	58
Şekil 6.7 : Eksenel akılı motorun nominal yükünde çıkış momenti.	59
Şekil 6.8 : Farklı mıknatıs açısı/kutup açısı oranları için moment eğrileri.	61
Şekil 6.9 : Farklı mıknatıs açısı/kutup açısı oranları için faz akımları.	61
Şekil 6.10 : $\alpha_2=130/180$ değeri için eksenel akılı motor momenti.	63
Şekil 6.11 : $\alpha_2=130/180$ değeri için eksenel akılı motor faz akımları.	63
Şekil 6.12 : Eksenel akılı motorun manyetik akı yoğunluğu tayfı.....	64
Şekil 6.13 : Statorun manyetik akı yoğunluğu tayfı.	64

EKSENEL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE RADYAL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUYLA KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Elektrik enerjisine ve elektrikli ekipmanların temellerinden birini oluşturan elektrik motorlarına olan bağlılık ve ihtiyaç gün geçtikçe artan dünya nüfusu ile birlikte artmaktadır. Gelişen teknoloji ve değişen ihtiyaçlar ile birlikte daha küçük hacimli ve çoklu işlem yapma özelliği olan sistemlerin kullanımı ve tasarımları artmaktadır. Bu durum ise, kısıtlı bir alanda birçok elektronik bileşenin ve elektrik motorunun bir arada bulunmasını ve çalışmasını gerektirmektedir. Kullanılan elektrik motorlarının sayısının artması, artan enerji ihtiyacı ve daha küçük hacimli sistemlere karşı olan tutum, elektrik motorlarında yüksek verim ile hacim ve ağırlık kısıtlarını karşımıza çıkarmaktadır.

Verim, hacim ve ağırlık isterlerini karşılayabilen makineler olarak ön plana sürekli mıknatıslarla uyartılmış makineler çıkmaktadır. Bu makineler; en basit şekilde, kullanılması gereken elektromıknatıslar yerine kullanılan sürekli mıknatısların getirdiği, kayıpların ve ağırlığın azalması, güç yoğunluğunun (W/m^3) artması gibi avantajlarla isterleri sağlayabilmektedirler. Sürekli mıknatıslı motorlardan olan ve üstün bazı avantajlarından dolayı günümüzde ön plana çıkan elektrik motorlarından birisi de sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorudur (FDAM – BLDC).

Fırçasız doğru akım motorları, motor içerisindeki akının izlediği yola bağlı olarak radyal akılı ve eksenel akılı olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında çamaşır makinesi uygulamasında kullanılan radyal akılı fırçasız doğru akım motoru yerine daha düşük hacim, ağırlık ve maliyette, yüksek güç yoğunluğuna sahip bir eksenel akılı fırçasız doğru akım motoru tasarlanmış ve bu iki motorun karşılaştırmaları yapıpı birbirlerine göre üstünlükleri ortaya konulmuştur.

Eksenel akılı motorun tasarımına başlanmadan önce, üretimde olan radyal akılı motor analizleri yapılmıştır. Üretimde olan ve incelenen motor; 24 oluklu, 4 kutuplu, rotorunda ferrit sürekli mıknatısları olan, nominal çalışmada 530 min^{-1} hızında $1,2 \text{ Nm}$ 'lik çıkış momentini verebilen bir radyal akılı FDAM'dur. Eksenel akılı motor tasarımına başlanmadan önce üretimde olan radyal akılı motorun alınan plaka değerleriyle ve mekanik boyutlarıyla birlikte, sonlu elemanlar yöntemine (SEY) göre çalışan bir paket programda iki boyutlu modeli kurulmuş ve analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler, motorun deney sonuçları ve plaka değeriyle karşılaştırılarak kurulan SEY modelinin tutarlılığı ortaya konulmuştur.

Eksenel akılı motorlar, motor topolojisinde kullanılan stator ve rotor sayılarına göre sınıflandırılabilir. Tasarlanan eksenel akılı motor çamaşır makinesi uygulamasında kullanılan radyal akılı motor yerine tasarlanmıştır ve çamaşır makinesi uygulaması düşük güçlü uygulamalar sınıfında yer almaktadır. Düşük güçlü uygulamalarda hacim, ağırlık ve maliyet kısıtları altında seçilen eksenel akılı FDAM tipi tek tabakalı bir rotor ve bir stator içeren motor modelidir.

Eksenel akılı motor topolojisine karar verildikten sonra çıkartılan temel boyutlandırma denklemleri kullanılarak MATLAB® programı üzerinde, farklı kutup sayılarına göre, güç yoğunluğunu maksimum yapan bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile radyal akılı motorun çamaşır makinesi uygulaması için yerine getirmesi gereken 530 min^{-1} hızında, 1,2 Nm'lik çıkış momenti özelliklerini sağlanacak şekilde, farklı kutup sayıları için eksenel akılı motorlar tasarlanmıştır. Eksenel akılı motor tasarımlarında, radyal akılı motor ile karşılaştırma yapılabilmesi adına, radyal akılı motorda kullanılan malzemeler kullanılmıştır. Farklı kutup sayılarına göre yapılan tasarımlar arasından, maliyet, motorun üretilebilirliği ve güç yoğunluğu kısıtları gözetilerek uygun bir kutup sayısı seçilmiş ve eksenel akılı motorun temel boyutlandırması yapılmıştır. Temel boyutlandırma adımından sonra elektriksel tasarımı da yapılan eksenel akılı motorun analitik tasarımı tamamlanmıştır.

Analitik tasarımı tamamlanan eksenel akılı FDAM 12 oluklu, 8 kutuplu, üç fazlı stator sargısı olan ve mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği bir motordur. Eksenel akılı motorun SEY analizlerinin yapılabilmesi için üç boyutlu modeller gerekmektedir. Radyal motorun aksine eksenel motorda, eksenel değişimin çok olması ve akının eksen boyunca hareket etmesi çözümlerin doğruluğu açısından üç boyutlu model kurulmasını ve analiz yapılmasını zorunlu hale getirmiştir.

Radyal motor analizlerinde kullanılan SEY tabanlı paket program eksenel akılı motor için de kullanılmıştır. Çözüm sürelerinin ve bilgisayar bellek kullanımının azaltılması için eksenel akılı motorun çeyrek motor modeli üç boyutlu olarak kurulmuştur. Kurulan çeyrek motor modeli 4 oluk ve 2 kutup içermektedir, böylece simetri özelliğinden faydalanıp daha kısa sürelerde daha fazla benzetim yapma imkanı doğmuştur. Kurulan eksenel akılı motor modeli ile analizler yapılmış ve bu analiz sonuçları analitik tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılarak, motor tasarımı doğrulanmıştır. Daha sonra yapılan SEY analizlerine eksenel ve radyal akılı motorların analitik olarak hesaplanmış verim, hacim, ağırlık ve maliyet verileri eklenerek ayrıntılı bir karşılaştırma yapılmıştır.

Radyal akılı ve eksenel akılı FDAM'ları güç yoğunluğu, moment yoğunluğu, hacim, toplam ağırlık, maliyet, verim ve mil momentindeki titreşim başlıkları altında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda tasarlanan eksenel akılı motor, radyal akılı motora göre %68,8 daha fazla güç yoğunluğuna, %209,6 daha fazla moment yoğunluğuna, %40,6 daha düşük hacme, %67,6 daha düşük ağırlığa ve %54,3 daha düşük maliyete sahiptir. Bunun yanında ise, eksenel akılı motorun verimi, radyal akılı motorun %52,67'lik verimine göre %31,9 artarak, %69,5 değerini almıştır. Eksenel motor tasarımına başlanırken hedeflenen durumlar gerçekleşmiş, yeni motor tasarımı ile birlikte güç yoğunluğu artırılmış ve ağırlık ile hacim düşürülmüştür. Bu iyileştirmelerin yanında ise verimde de bir artış sağlanmıştır. Eksenel motorun radyal motora göre güç, moment yoğunluğunun artması hacmin ve ağırlığının azalmasının temel sebebi tasarımda kullanılan malzeme miktarının azaltılmasıdır. Eksenel ve radyal akılı motorlarda kullanılan malzeme miktarları incelendiğinde, kullanılan ferit sürekli mıknatıs miktarlarının birbirlerine yakın oldukları görülmüştür. Bunun yanında stator ve rotor laminasyonlarında kullanılan ferromanyetik malzeme miktarı radyal motorda, eksenel motordakinin üç katından fazladır. Bu büyük farklılık ise radyal motorda, 2T civarında doymaya giren ferromanyetik malzemenin çok düşük seviyelerde kullanılmasıdır. Eksenel motorda ise ferromanyetik malzeme dirsek bölgesine yakın bölgede kullanılarak malzemeden çok daha fazla fayda sağlanmakta, bu da kullanılması gereken malzeme miktarını azaltmaktadır. Azalan ferromanyetik

malzeme miktarı, hacmin ve ağırlığın küçülmesini güç ve moment yoğunluklarının eksenel motorda artmasını sağlamıştır. Ferromanyetik malzemeden faydalanma katsayısı artarken beraberinde malzemede meydana gelen histerezis ve girdap (eddy) kayıpları toplamından oluşan demir kayıpları artmaktadır. Kullanılan bakır iletken miktarı ise eksenel motorun daha küçük hacimli yapısı sonucu sarım uzunluğunun azalmasından dolayı radyal motora göre oldukça düşmüştür. Ayrıca faz sarım sayısı artmasına rağmen, faz direnci değeri radyal motora göre daha küçüktür. Bunun sebebi ise eksenel motorun yapısı sonucu sarım uzunluğunun radyal motorun sarım uzunluğuna göre oldukça kısılmasıdır. Her iki motor türü için de faz akımlarının değerleri yakın olduğundan, eksenel motorda azalan faz direnci beraberinde daha az bakır kaybı getirmektedir. Sonuç olarak, eksenel motorda demir kaybı artışına rağmen, verim üzerinde daha etkili ve büyük bir değere sahip bakır kaybındaki azalış, radyal motora göre verimi arttırmıştır.

Mil momentinde oluşan titreşimler açısından ise, %55 olan radyal akılı motorun mil momenti titreşimi, eksenel motor ön tasarımında artarak %72 değerini almıştır. Daha sonra mıknatıs açısı/kutup açısı oranı, kullanılan mıknatıs hacmi sabit tutularak değiştirilmiş ve eksenel motor momentindeki titreşim %27,5 değerine düşürülmüştür.

Yapılan karşılaştırmalardan görüldüğü gibi, eksenel akılı motor tasarımı ile hedeflere ulaşılmış ve karşılaştırılan her alanda tasarlanan eksenel akılı fırçasız doğru akım motoru üstün çıkmıştır ve çamaşır makinelerinde kullanılabilecek yeni bir motor olduğunu kanıtlamıştır.

DESIGN AN AXIAL FLUX BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR AND COMPARISON WITH A RADIAL FLUX BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR

SUMMARY

Need and dependence on electrical energy and electrical motors that constitute one of the fundamental of electrical equipment are increasing with a growing world population. The necessity of the new designs which have compact and multitasking are also increased. These type of systems require various electronic components and electrical motors that must exist and work together in a narrow space. Increasing the number of used electrical motors, energy requirement with the attitudes toward compact system reveal the constraints that are high efficiency, low volume and low weight in electrical motors.

Electrical motors excited by permanent magnets come into prominence with the ability to satisfy the requirements of efficiency, volume and weight. With the simplest explanation, the usage of permanent magnets on rotor instead of electromagnets in conventional motors gives rise to lower weight and losses, and hence, it improves the volumetric power density (W/m^3) and efficiency. The permanent magnets brushless motors can provide requirements on efficiency, volume and weight with these superior advantages. The permanent magnet brushless direct current (BLDC) motor that comes to fore with some outstanding features, is one of the permanent magnet motors.

BLDC motors are classified according to flux path in the motor; these are radial flux and axial flux BLDC motors. In this thesis, instead of a radial flux motor used in a washing machine, an axial flux motor was designed with higher power density, lower volume and less weight. Later on, axial and radial flux motors are compared.

Before starting the axial flux motor design, analysis of a radial flux motor already used in a washing machines is completed. Radial flux BLDC motor has 24 slots, 4 poles, ferrite type permanent magnets on the rotor, rated operation at 530 min^{-1} speed and 1,2 Nm shaft torque. Before starting the axial motor design, two dimensional model of radial flux motor was set up by using the mechanical and electrical specifications taken from the manufacturer. Two dimensional model was created in a package software programme that made analysis and calculations according to the finite element method (FEM). The radial motor was analysed and accuracy of 2 dimensional FEM motor model was proven by comparing FEM results with radial flux motor test results and rated values.

Axial flux motor can be classified according to a number of rotor and stator used in motor topologies. Designed axial flux motor is low power motor; this is because axial flux motor was designed as an alternative to the radial flux motor used in low power washing machine applications. In low power applications and under the volume, weight and cost constraints, the best choice of axial flux BLDC motor

configuration is single sided topologies which are comprised of one stator and one rotor.

After specifying the axial flux motor topology, using the basic sizing equations for single sided motor that is deduced from literature, an analytical algorithm was created using MATLAB[®]. This algorithm designed for single sided axial flux BLDC according to maximum power density for a different number of poles. Axial flux motors were designed by using developed MATLAB[®] algorithm for a different number of poles, to provide same nominal operation performance with radial flux 530 min⁻¹ speed and 1,2 Nm shaft torque. The same materials such as stator, rotor laminations, ferrite permanent magnet and copper conductor were used while designing the axial flux motor to make a proper comparison of radial and axial flux motors. Under the cost, manufacturability and power density conditions, the optimum motor design was chosen for a proper number of poles, out of designed axial flux motors with a different number of poles, and then the basic sizing and electrical design of axial motor were done. Thus, the analytical design of the axial flux motor were completed.

The analytically designed axial flux motor has 12 slots, 8 poles, 3 phase stator windings and surface mounted magnets on the rotor. 3 dimensional model of axial flux motor is required in order to do FEM analysis. Contrary to the radial motor, a large change in axial axis and axial path of magnetic flux in axial motor made three dimensional model and analysis mandatory.

The same FEM based package program used in the radial analysis were used in axial flux BLDC motor analysis too. The quarter model of the axial motor was set up in order to decrease simulation time and memory usage. The quarter model contained 4 slots and 2 poles. Thus, taking advantage of symmetry, more simulations with shorter times were done. FEM analysis were performed by using the quarter three dimensional axial flux BLDC motor model, the results were compared with analytical results and the design was confirmed. Later on, axial and radial flux motors' analytically calculated efficiency, volume, weight and cost data were added on FEM results and detailed comparisons of these motors were given.

Radial and axial flux BLDC motors were compared under the power density, torque density, volume, total weight, efficiency and pulsation on the shaft torque headings. The comparison results show that designed axial flux motor has 68,8% higher power density, 209,6% higher torque density, 40,6% lower volume, 67,6% less weight and 54,3% lower cost versus radial flux motors. Besides, the efficiency of the axial flux motor increased 31,9% according to radial flux motors, from 52,67% to 69,5%. Thus, the targets at the starting of design such as higher power density and lower volume and less weight were performed successfully also the designed axial motor has higher efficiency. The basic reason why axial flux motor has higher power and torque density, lower volume and less weight than radial flux motor, was less used materials in the axial flux motor design. When the amount of used materials in radial and axial flux BLDC motor were investigated, it can be clearly seen that the amount of ferrite permanent magnets used in both axial flux and radial flux motors were nearly the same. However, the amount of used ferromagnetic material in the rotor, stator laminations located in axial and radial flux motors was higher more than 3 times at radial flux motor than axial flux. This huge difference is due to the utilization of the ferromagnetic material. The used ferromagnetic material used both radial and axial flux motors began to saturation about 2T. In radial flux motor,

ferromagnetic materials used very low levels of magnetic flux density that gave rise to low utilization of the ferromagnetic material. Besides, axial flux motor used ferromagnetic material at near knee area in B-H curve that caused the higher utilization of ferromagnetic material. The better utilisation reduced the amount of required ferromagnetic material. Lower ferromagnetic material provided a reduction on motor volume and weight, and also an improvement on power and torque density. While the ratio of utilization on the ferromagnetic material was increasing along with the iron losses composed of hysteresis and eddy losses. In addition, required amount of copper conductor decreased in axial flux motor compare to radial flux motor due to the decreasing winding turn length of the compact structure result of axial flux motor. If the examination of losses is continued: Even though axial flux motors number of phase turns went up, stator phase resistance was lower than radial flux motor. Because, the compact structure of axial flux motors gave rise to a lot smaller turn length according to radial motors. Both of radial and axial flux phase currents were close to each other; therefore, the smaller phase resistance caused lower copper losses that occurred in axial flux motor. As a result, even iron losses increased in axial flux motor, the copper losses that has bigger value and more impact on motor efficiency, was lower in axial flux motor, the axial flux BLDC motor efficiency was higher than radial flux BLDC motor.

In terms of motor torque pulsations, the radial flux reference motor had 55%, the preliminary designed axial flux motor had 72% torque pulsation. Later on, magnet pole arc to pole pitch ratio was changed while keeping used magnet volume constant and axial flux motor torque pulsation was decreased to 27,5%.

The comparisons revealed that the design goals accomplished and axial flux motor surpassed in each comparison aspects; as a result, the axial flux BLDC motor has proved to be a suitable motor that can be used in washing machine applications.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan ihtiyaç gün geçtikçe artan dünya nüfusu ile paralel bir şekilde artmaktadır. Buna karşın elektrik enerjisi üretimi temel kaynaklarındaki azalma ve bir gün biteceği bilgisi, alternatif enerji sistemleri ve enerji verimliliği konularını dünya gündemine getirmiş ve ülkeler artık enerji politikaları hazırlamaya başlamıştır.

Elektrik enerjisinin büyük bir kısmı; çevremizde hemen her yerde karşımıza çıkabilecek, küçük güç kademelerinden büyük güç kademelerine kadar olabilen elektrik makineleri tarafından harcanmaktadır. Elektrik makinelerinin çoğunluğunu ise motor işletme konumunda çalıştırılan elektrik motorları oluşturmaktadır. Artan dünya nüfusu ile birlikte kullanılan elektrik motoru sayısı da artmaktadır. Azalan enerji kaynaklarına karşın artan elektrik motoru ve dolayısıyla artan enerji ihtiyacı; elektrik enerjisi fiyatlarında artmalara sebep olabilmektedir. Bu durumlar beraberinde enerjinin daha verimli kullanılması gerektiğini getirmektedir. Üretilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmını tüketmesi sebebiyle, elektrik motorlarındaki verimlerin arttırılması gerekliliği dünya tarafından kabul görmüş ve çeşitli önlemler alınmaya ve elektrik motorları ile ilgili halihazırda bulunan standartlarda güncellemeye gidilmiştir. Güncellenen standartlardan biri; Avrupa Elektrik Makinaları Üreticileri Komitesi (CEMEP) ve Avrupa Komisyonu'nun 1999 tarihli deklarasyonu sonucu kabul edilen elektrik motorları verim sınıfları, 2011 yılında güncellenerek IEC6004-30 standardı ile daha yüksek verim sınıfları içeren dört verimlilik sınıfına geçilmiştir [1-2].

Günümüzde elektrik motorlarında yüksek verim değerlerinin yanında hacimsel ve ağırlıksal kısıtlar da karşımıza çıkmaktadır. Kullanılan elektrik motoru sayısının artması ile birlikte işgal ettikleri alanların ve oluşturdukları ağırlıkların azalması istenmektedir. Bu isterlere ulaşılabilmek için çeşitli tasarımlar ve malzeme teknolojileri geliştirilmektedir. Gelişen malzeme teknolojileri; elektrik makinelerinde kullanılan; iletken malzemeler, rotor, stator çekirdeklerini oluşturan laminasyonlar, elektromıknatısları yerine kullanılan sürekli mıknatıslar ve motorların kontrolünde kullanılan güç elektroniği elemanları şeklinde özetlenebilir. Tasarım teknolojilerini

ise farklı konstrüksiyonda ve farklı malzemeler içeren yeni nesil olarak adlandırılabilen elektrik motorları oluşturmaktadır.

Verim, hacim ve ağırlık isterlerini karşılayabilen makineler olarak ön plana sürekli mıknatıslarla uyarılmış makineler çıkmaktadır. Bu makineler; en basit şekilde, kullanılması gereken elektromıknatıslar yerine kullanılan sürekli mıknatısların getirdiği, kayıpların ve ağırlığın azalması, güç yoğunluğunun (W/m^3) ve verimin artması gibi avantajlarla isterleri sağlayabilmektedirler. Sürekli mıknatıslı motorlardan olan ve üstün bazı avantajlarından dolayı günümüzde ön plana çıkan elektrik motorlarından birisi de sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım (FDAM) motorlarıdır. FDAM'lar motor içerisindeki akının izlediği yola bağlı olarak radyal ve eksenel motor olarak ayrılmaktadır. Bu çalışmada özellikle hacim ve ağırlık kısıtları altında istenilen tasarımlara uygun olması sebebiyle eksenel akılı FDAM çalışılmıştır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı; FDAM'larının incelenmesi ve seri üretimde olan radyal akılı FDAM yerine, radyal makinenin performans özelliklerini karşılayabilen ve bazı özellikleri ile üstün olan yeni bir eksenel akılı FDAM tasarlamak, analizlerini yapmak ve bu iki makineyi karşılaştırmaktır. Bu amacı gerçekleştirmede kullanılacak yöntem ise, üretici firmadan seri üretimde olan radyal akılı FDAM'nun tüm boyutsal ve elektriksel özelliklerinin bilgisinin alınması, motorun seçilen sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizlerinin yapılması ve daha sonra uygun özellikte bir eksenel akılı FDAM'ın analitik olarak tasarlanması, SEY ile analizlerinin yapılması ve bu iki makinenin analiz sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Bu iki motor kapladıkları hacim, ağırlıkları, maliyetleri, hacimsel güç yoğunlukları, moment yoğunlukları ve verimleri gibi bir çok açıdan karşılaştırılarak birbirlerine göre üstün oldukları durumların ortaya konulması, bu tezin kapsamı içerisinde yer almaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Elektrik makinelerinin tarihçesi incelendiğinde; en eski elektrik makinesinin eksenel akılı makine olduğu ve kısa bir süre içerisinde yerini radyal akılı makineye bıraktığı görülmektedir. 1831 yılında Faraday bir disk motoru icat etmiştir; ancak, 1837

yılında Davenport radyal akılı makine için ilk patenti almıştır ve bu makine modeli temel elektrik makinesi topolojisi olarak kabul edilmiştir. Sürekli mıknatısların elektrik makinelerinde kullanımının yaygınlaşması, güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak motor kontrol yöntemlerinin gelişmesi, eksenel akılı motorlara uygulanabilirliği ve eksenel akılı motorların bir takım yüksek özelliklerinden dolayı, eksenel akılı motorları tekrar gündeme getirmiştir [3].

Disk tipi motor olarak da adlandırılan eksenel akılı FDAM'ın bazı uygulamalarda radyal akılı motora göre çok daha fazla avantajı bulunmaktadır. Bu çok özel karakteristikler yassı şekli, tasarımı ve yüksek güç yoğunluğu şeklinde özetlenebilir. Bu tip motorlar özellikle elektrikli araçlar, pompa, fan, robot, uzay araçları ve endüstriyel ekipmanlar gibi alanlarda kullanılabilir. Yüksek sayıdaki kutup sayıları gerçekleştirilebildiğinden bu tip makineler; elektromekanik çekiş sistemlerinde ve rüzgar santrallerinde gibi düşük hız uygulamaları için idealdirler [4]. Üstün özelliklerinden ve günümüz malzeme teknolojisinin eksenel akılı FDAM'ın gerçekleştirilmesine imkan sağlamasından dolayı, eksenel motorun tasarımı, analizleri, çeşitlerinin karşılaştırılması ve radyal motor ile performans karşılaştırması gibi farklı konularda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir, bu çalışmaların bir kısmı devam eden kısımlarda özetlenmiştir.

Lipo ve diğerleri, elektrik makinelerinin karşılaştırılabilmesi için genel boyutlandırma denklemlerinin ve güç yoğunluğu denklemlerinin elde edilmelerinin gerektiğini savunmuşlardır. Yaptıkları çalışmalar ile elektrik makinelerinde genel kullanılabilecek boyutlandırma ve güç yoğunluğu denklemlerini elde etmişler ve farklı makinelerle ait zıt elektro motor kuvveti (E.M.K.) ve akım şekillerine uygun katsayıları ortaya koyarak bu denklemlerin her bir elektrik makinesine uyarlanabileceğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmalar ile bu denklemleri 1 stator-2 rotor (torus tip), 2 stator-1 rotor eksenel akılı FDAM'lara uyarlayarak güç yoğunluğu ifadelerini ve genel boyutlandırma denklemlerini elde etmişlerdir. Çıkarılan denklemlerde güç yoğunluğunun $\lambda = D_i/D_o$ parametresine bağlı olduğunu ortaya koyulmuştur. λ' 'ya bağlı güç yoğunluğu ve verim eğrileri çıkarılmış ve λ' 'nın güç yoğunluğu üzerinde büyük etkisi olduğu, verimin üzerinde ise çok az bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca güç yoğunluğu için en iyi λ ile kutup çifti arasındaki ilişki gösterilmiş ve en iyi λ' 'nın farklı kutup çiftleri için farklı olacağı ortaya konulmuştur. Ayrıca eksenel akılı çift statorlu makinelerde farklı kutup çifti sayıları

için en iyi λ değerinin nominal mekanik hıza bağılılığı ortaya konulmuştur. Bu çalışmaların sonucu olarak güç yoğunluğu çıkartılan torus tip ve çift statorlu eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineleri, asenkron makineler ile güç yoğunluğu açısından karşılaştırmışlardır. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinelerin asenkron makinelerden çok daha fazla güç yoğunluğuna sahip olduklarını gözlemlemişlerdir [5].

Krishnan ve Sitapati, yaptıkları çalışma ile radyal ve eksenel akılı sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım makinelerini karşılaştırmışlardır. Öncelikle, 0,25-1-3-5-10 kW güç kademeleri için radyal makine ile dört farklı eksenel makine tasarımları gerçekleştirilmiştir. Radyal makine klasik silindirik, eksenel makineler ise; tek tabakalı (1 stator-1 rotor), çift tabakalı (2 stator-1 rotor), tek tabakalı oluksuz ve çift tabakalı oluksuz olarak tasarlanmıştır. Tasarımlarda 0,25kW'lık düşük güçlü tasarımlarda 2000 min⁻¹'lik nominal hıza, diğer tüm güç kademelerinde 1000 min⁻¹ nominal hıza göre tasarımlar yapılmıştır; ayrıca tüm modellerde yüzey mıknatıslı, yüksek enerjili sinterlenmiş nadir toprak elementi NdFeB mıknatıslar kullanılmıştır. Tasarımlar, gerekli bakır iletken, çelik laminasyon ve mıknatıs ağırlıkları ile bakır, demir kayıpları, eylemsizlik momenti, moment/eylemsizlik momenti oranı, ağırlıksal ve hacimsel güç yoğunlukları kriterlerine göre beş ayrı güç kademesi için kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonunda tüm güç kademelerindeki eksenel tasarımlar daha düşük hacim gerektirdiğinden dolayı radyal motora göre güç yoğunlukları çok fazla olmaktadır. Karşılaştırmaların geneli itibari ile eksenel akılı makinelerin radyal makineye göre üstünlüğü ortaya konulmuştur [6].

Aydın ve diğerleri, genelleştirilmiş boyut denklemlerini çift rotorlu eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineye uygulayarak oluklu ve oluksuz yapıları için boyut denklemlerini türetmişlerdir. Türetilen bu denklemler ile en iyi makine tasarımı, güç yoğunluğunu ve verimi, makine iç çap dış çap oranı ile maksimum yapacak şekilde tanımlanmış ve bu en iyi tasarımlara ait manyetik alan analizleri yapılmıştır. Üç boyutlu (3B) SEY kullanılarak vuru momentini ve harmonik momentleri içeren titreşim momenti analizleri yapılmıştır. Sargı yapıları, mıknatıs açısı/kutup açısı oranı ve mıknatıs kaykılama açısı ile oluklu ve oluksuz makinelerin titreşim momentinin minimumu elde edilmiş ve 3B SEY ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak oluklu ve oluksuz torus topolojilerinin moment kalitesi bir karşılaştırma tablosu ile verilmiştir. Karşılaştırmalar göstermiştir ki, oluksuz eksenel akılı makine oluklu

yapıya göre çok küçük ve ihmal edilebilir düzeyde vuruğu momentine sahiptir; ayrıca titreşim momenti de oluksuz yapıda daha küçük olmaktadır [7].

Cavagnino ve diğlerleri; düşük hızlarda ve doğrudan tahrik sistemlerinde (dişlisiz rüzgar enerji sistemleri, elektrikli araçlar için tekerlek içi motor gibi) referans uygulamalarında kullanılmak üzere klasik radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) ve 2 stator 1 rotor eksenel akılı SMSM'un karşılaştırmasını yapmışlardır. Bu karşılaştırma termal kısıt temelli bir karşılaştırma yöntemidir. Klasik radyal akılı motor ile 2 statorlu eksenel akılı motorların elektromanyetik momentleri ve moment yoğunlukları; her iki motorun toplam motor hacimleri, birim yüzeydeki kayıpları ve hava aralığı manyetik akı yoğunlukları eşit tutularak yapılmıştır. Karşılaştırmalar göstermiştir ki; düşük hız-doğrudan tahrik uygulamalarında kutup sayısının 10 ve üzeri ve eksenel uzunluğun kısa olduğu durumlarda eksenel akılı SMSM daha cazip bir motor olmaktadır [8].

Qu ve diğlerleri, yüzey mıknatıslı çift rotorlu radyal akılı sürekli mıknatıslı makine ile eksenel akılı torus sürekli mıknatıslı makine tasarımlarını 3, 10, 25 ve 50 beygir gücü (HP) güç kademeleri için gerçekleştirmiş, karşılaştırmalarını ortaya koymuşlardır. Tasarımlar, 1800 min^{-1} sabit hız değeri için, hem ferrit hem de NdFeB mıknatıs türlerini için ayrı ayrı ve ayrıca 4, 8, 12, 16, 20, 24 ve 28 kutup sayısı konfigürasyonları için gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımlarda, radyal akılı makinede boy/en oranı, eksenel makinede ise iç yarıçap/dış yarıçap oranı dikkate alınarak, her bir makine tasarım değışiklikleri, moment/kütle, moment/hacim ve verim; performans ve tasarım kriterlerine göre kendi içlerinde analiz edilmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Daha sonra yapılan boy/en ve iç/dış yarıçap oranları eniyilemesi ile her bir tasarım için gerekli olan bakır iletken, demir laminasyon ve mıknatıs ağırlıkları hesaplanarak tasarımların maliyetleri çıkartılmıştır. Ayrıca her bir güç kademesindeki tasarım için kayıplar hesaplanarak verimler gösterilmiştir. Yapılan bu ayrıntılı çalışma göstermiştir ki; radyal akılı sürekli mıknatıslı makine eksenel akılı torus sürekli mıknatıslı makineye göre; daha fazla bakır iletken gerektirmekte ve demir ile bakır kayıpları daha fazla olmaktadır, gerekli olan mıknatıs malzeme miktarı ise daha az olmaktadır. Mıknatıs malzeme birim fiyatı diğler gerekli olan malzemelere göre çok daha fazla olmasından ötürü toplam malzeme maliyeti eksenel akılı torus sürekli mıknatıslı makinede daha yüksek çıktığı gösterilmiştir [9].

Bumby ve diğerleri, oluksuz eksenel akılı sürekli mıknatıslı generatörlerde mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik vektör potansiyeli ve manyetik alan hesabı için analitik bir yöntem önermişlerdir. 20kW ve 40kW güç kademelerinde prototipleri bulunan eksenel akılı 2 rotor ve 1 stator konstrüksiyonuna sahip generatörler için bu analitik yaklaşımı uygulamışlardır. Daha sonra iki boyutlu ve üç boyutlu SEY ile bu analitik yaklaşımı karşılaştırmışlardır. Analitik yaklaşımın sonuçları ile SEY sonuçları karşılaştırıldığında ise hata oranının %5'lik sınırlar içerisinde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca zıt E.M.K. ve sargı sonu endüktans ölçümleri generatör testlerinden elde edilerek analitik ve SEY sonuçları karşılaştırılmıştır. E.M.K. karşılaştırılmasında hatanın %5 sınırı içerisinde, sargı sonu endüktansı karşılaştırılmasının ise %10 hata sınırı içerisinde olduğu gözlenmiştir[10].

Aydın ve diğerleri, biri matematiksel diğeri SEY olmak üzere, eksenel akılı 1 rotor 2 stator ve 2 rotor 1 statorlu oluksuz ve oluklu yapıdaki sürekli mıknatıslı motorlarda, çıkış moment kalitesi ve çıkış momenti titreşimi için yaklaşımlar uygulamışlardır. Ayrıca çalışmada, titreşim momenti azaltma teknikleri üzerinde durulmuş ve bazı teknikler eksenel motorlara uygulanarak bu iki yaklaşım ile birlikte titreşim momenti analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Titreşim momenti azaltma teknikleri olarak mıknatısların belirli bir eğiklik açısına göre rotora yerleştirilmesi (kaykılama) ve mıknatıs açısı/kutup açısına oranının değiştirilmesi yöntemleri kullanılmıştır. En son yapılan karşılaştırmalar ve çıkarımlar göstermiştir ki; oluksuz sürekli mıknatıslı motorlar, oluklulara göre moment titreşim duyarlılığı olarak daha iyi motorlardır. Sürekli mıknatıslı motorlarda yüksek moment kalitesi için kaykılama açısının ve mıknatıs açısı/kutup açısı oranının çok hassas tasarlanması ve uygulanması gerektiği çıkarımı yapılmıştır [11].

Fei ve diğerleri, tekerlek içine yerleştirilebilen doğrudan sürüş uygulamaları için; yeni bir eksenel akılı 2 rotor ve parçalara ayrılmış (segmenli) 1 statorlu bir motor önermişlerdir. İlk olarak bu motorun bütünüyle analitik modeli geliştirmişlerdir. Analitik model ilk olarak oluksuz motor yapısı için ve iki boyutlu olarak çıkartılmış, daha sonra bu model oluklu motor yapısının 3B analitik modeline uyarlanmıştır. Daha sonra çıkartılan bu model, prototipi bulunan 6kW'lık motora uygulanmıştır. Analitik model ile tasarlanan 6kW'lık modelin 3B SEY ile modeli kurulup analizi yapılmıştır, ayrıca prototip motorun laboratuvar ortamında testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan analitik model sonuçları, SEY

sonuçları ve test sonuçları karşılaştırılmış ve analitik modelin hem SEY ile hem de prototip motorun test sonuçlarıyla tutarlı olduğu gösterilmiştir [12].

Chaker ve diğerleri, yüksek güç yoğunluğuna sahip ve küçük boyutlarda, otomotiv çekiş uygulamalarında kullanılmak üzere, tek tabakalı iki adet eksenel akılı motor tasarlamışlardır. Bu motorlar trapez ve sinüzoidal sürüslü olan sırasıyla FDAM ve fırçasız sürekli mıknatıslı senkron motorlardır (SMSM). İlk olarak tasarımda gerekli olan geometrik ve elektriksel parametreler analitik olarak tasarlanmıştır. Daha sonra SEY analizi yapılarak yapılan tasarımların doğruluğu onaylanmıştır. Son aşamada ise her iki motor için sürüş yöntemleriyle birlikte tüm çekiş sistemi MATLAB/Simulink® programında modellenmiş ve analizler yapılmıştır. FDAM ve SMSM'in elektromanyetik moment analizleri incelendiğinde ve karşılaştırıldığında görülmüştür ki; SMSM (sinüzoidal sürüslü motor), FDAM'a (trapez sürüslü motor) göre oldukça düşük moment titreşimlerine sahiptir. Bu sonuçla birlikte, otomotiv çekiş uygulamaları için SMSM'in, FDAM'a göre daha uygun bir motor olduğu ve radyal akılı sürekli mıknatıslı motora ciddi bir rakip olduğu çıkarımı yapılmıştır [13].

Darabi ve diğerleri, 5kW gücünde ve düşük hızlı 200 min^{-1} hızında bir eksenel akılı motor tasarımı için algoritma oluşturmuş ve başlangıç tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı yapılan motor oluksuz 1 stator 2 rotor içeren çift tabakalı torus tipi eksenel akılı sürekli mıknatıslı motordur. Yapılan analitik tasarım, SEY ile analiz edilerek algoritmanın uyumlu olduğu gösterilmiştir [14].

Wathage ve diğerleri, kullanılmakta olan bir otomobil markasının tekerleğinin içinde kalan boş alana, tek tabakalı eksenel akılı fırçasız doğru akım motoru tasarımını ve benzetim ortamında bu motorun tekerlek içine yerleşimini gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan motor rotorunda 32 adet NdFeB mıknatısı ve statorunda 24 elektromıknatıslı bir yapı barındırmaktadır. Tasarlanan bu eksenel akılı motor üç farklı kombinasyona sahiptir; bu kombinasyonlar stator yapısının %25 (6 elektromıknatıs), %50 (12 elektromıknatıs) ve %100 (24 elektromıknatıs) içeren yapılarıdır. Yapılan çalışma bu tasarımların hız, moment, faz akımı ve akı halkalanması karşılaştırmaları üzerinedir. Karşılaştırmalar göstermiştir ki; artan stator ile hızdaki bozunumlar azalmakta, maksimum ve ortalama moment değerleri azalırken moment titreşimleri ve faz akımlarındaki bozulmalar azalmaktadır [15].

Yang ve diğerleri, tek tabakalı eksenel akılı sürekli mıknatıslı makine için çoklu amaçlı tasarım eniyilemesi yapmışlardır. Hedeflenen makine halihazırda prototipi olan 22,8 Nm ve 2800 min^{-1} nominal özelliklerde melez (hybrid) araçlarda kullanılan bir başlatıcı alternatördür. Yaptıkları çalışma, moment yoğunluğu (Nm/kg) ve verimi maksimum yapan tasarım algoritmaları içermektedir. Eniyileme sonucu değişkenlik gösteren yedi adet eksenel makine boyut parametresi ve bu parametrelerin değişeceği aralık belirlenmiş ve ilk değer ataması olarak prototip makinenin değerleri atanarak moment yoğunluğu ve verim açısından en iyi durumları elde edecek programlar koşturulmuştur. Bu programlar 2B SEY ile MATLAB® programlarıdır. Atanan ilk değerlerden başlanarak, izin verilen boyut parametreleri aralığında 800 adet farklı makine tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu 800 adet içerisinde en iyi makine tasarımı ile ilk atanan değer yani prototip makine karşılaştırması yapılmıştır [16].

Yang ve diğerleri, diğer bir çalışmalarında ise 6,7 kW gücünde prototipi olan ve daha önce maksimum verim ve moment yoğunluğu için eniyileme tasarımları elde edilmiş, tek tabakalı eksenel akılı sürekli mıknatıslı makine için diferansiyel gelişim algoritması kullanarak, birim maliyet başına momenti ve verimi maksimum yapan yeni eniyileme hedefleriyle tasarımlar gerçekleştirmişlerdir. Tasarım amaçları için en iyi duruma ulaşmada bir önceki çalışmada da kullandıkları yedi adet konstrüktif parametreyi kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma göstermektedir ki stator boyunduruk kalınlığı ve rotor boyunduruk kalınlığının tasarım hedefleri üzerine çok az etkileri vardır, bundan dolayı bu parametreleri tasarım parametresi olarak kullanılmayıp, diğer beş konstrüktif parametre ile hedeflere ulaşılmıştır. Tasarım amaçlarının bu beş parametreye duyarlılığı analiz edilerek grafikler üzerinde değişimler gösterilmiştir. Yapılan en iyi tasarım ile birlikte, birim maliyet başına moment ile verim değerlerindeki artış gösterilmiştir [17].

Nakahara ve diğerleri, radyal akılı sürekli mıknatıslı konvansiyonel makine ile 1 stator 2 rotorlu eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineleri belirli bir alan kısıtlaması altında analitik eşitlikler ile tasarlayarak karşılaştırmışlardır. Radyal makine iki boyutlu, eksenel makine ise hem üç boyutlu hem de çift hava aralıklı iki boyutlu şekilde modellenerek SEY analizine tabi tutulmuştur. Eksenel makine için oluşturulan iki boyutlu çift aralıklı modelin sonuçlarının üç boyutlu model ile çok yakın çıktığı gösterilmiştir, bunun yanında üç boyutlu analizin iki boyutlu analiz süresinin yaklaşık 10 katı olduğu gösterilmiştir. SEY analizi sonuçları

karşılaştırıldığında eksenel akılı makinenin moment yoğunluğunun eksenel uzunluk ile arttığı ve belirli bir yerel maksimum noktasında, dişlerde meydana gelen doymadan dolayı, daha fazla artmadığı, radyal makinede ise değişmediği gösterilmiştir. En iyi eksenel uzunluğun eksenel makinenin elektriksel yüklenmesine bağlı olduğu gösterilmiştir. Stator sargılarının uygun bir oranda oluklara yerleştirilerek, oluk alanının arttırıldığı takdirde, eksenel akılı makinenin radyal akılı makineye oranla daha yüksek moment yoğunluğuna sahip olacağı savunulmuştur [18].

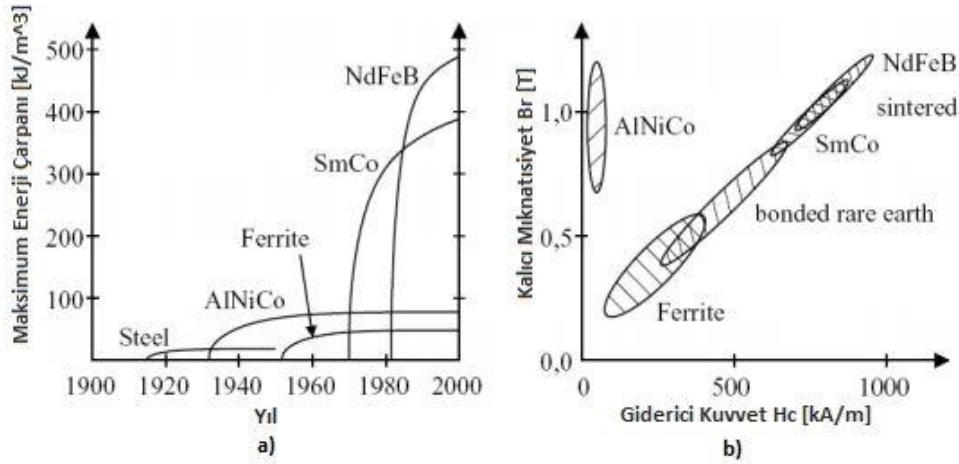
2. SÜREKLİ MİKNATISLAR VE FIRÇASIZ SÜREKLİ MİKNATISLI MOTORLAR

Sürekli mıknatısların elektrik makinelerinde kullanımı 100 yıldan uzun bir süredir devam etmektedir. Fakat 1900'li yıllarda mevcut bulunan sürekli mıknatıslar, elektrik motorları için gerekli olan enerji miktarlarını sağlayabilmekten çok uzaktaydılar. Gelişen sürekli mıknatıs teknolojisi ve bu mıknatısların elektrik motorlarında kullanılabilir yapıya ve şekle getirilebilmesi, elektrik motorlarında sürekli mıknatısların kullanımını arttırmış ve yeni nesil yüksek verimli motorların üretilmesine olanak sağlamıştır.

2.1 Sürekli Mıknatıslı Malzemeler

Sürekli mıknatıslı malzemelerdeki ve malzeme işleme teknolojisindeki gelişmeler, sürekli mıknatıslı yüksek enerji yoğunluklu ve verimli motorların gelişmesine imkan sağlamıştır. Şekil 2.1'de gösterilen sürekli mıknatısların yıllara bağlı maksimum enerji çarpanları incelendiğinde bu durum açıkça görülebilmektedir. Elektromekanik araçlarda kullanılabilen ilk sürekli mıknatıs 1930'lu yıllarda geliştirilen ve Alüminyum, Nikel, Kobalt alaşımı olan AlNiCo sürekli mıknatıslardır, günümüzde bazı uygulama sahası bulabilmesine rağmen, düşük giderici kuvvetlerinden dolayı düşük öneme sahiptirler. İkinci geliştirilen sürekli mıknatıs olarak 1950'li yıllarda geliştirilen, ucuz ve yüksek giderici kuvveti ile enerji çarpanından dolayı günümüz uygulamalarında birinci önceliğe sahip seramik mıknatıs olarak da adlandırılan ferrit mıknatıslar bulunmaktadır. Fiyat performans özelliğinden dolayı günümüz uygulamalarında sıkça tercih edilmektedirler. 1970'li yıllarda geliştirilen nadir toprak elementi mıknatıslarından Samaryum, Kobalt alaşımı (SmCo) sürekli mıknatıslar ise sürekli mıknatıs teknolojisinde yeni bir dönem başlatmıştır. Yüksek kalıcı mıknatısiyeti, yüksek giderici kuvveti ve sıcaklığa karşı çok düşük olan duyarlılığı ile birlikte daha önceki mıknatıs teknolojilerinden oldukça iyi performans özelliklerine sahiptir. Üstün özelliklerinden dolayı yüksek performanslı elektrik makinesi tasarımlarında kullanılmaktadırlar; ancak, ham madde fiyatlarının yüksek olması ve dolayısıyla mıknatıs maliyetlerinin yüksek olması kullanım alanlarını

kısıtlamıştır. SmCo mıknatısları ile benzer özellik gösterecek fakat daha ucuz ham madde içerecek mıknatıs malzeme arayışı 1983’lerde Neodimyum, Demir, Bor alaşımı olan NdFeB mıknatısların gelişmesine olanak sağlamıştır. Yüksek enerji çarpanı özelliğine rağmen, düşük termal kararlılık, düşük Curie noktası sıcaklığı ve korozyona sebep olan tepkimeye girme isteği gibi özellikleri bu mıknatısların kullanım alanları kısıtlamıştır [19,20]. Yüksek enerjili mıknatısların bulunmasına rağmen, özellikle seri üretim sürekli mıknatıslı elektrik motorlarında, mıknatıs seçiminde fiyat performansı belirleyici faktör olmakta ve ferrit mıknatıslar ön plana çıkmaktadırlar. Ancak kullanılacak elektrik motoru uygulamasının yüksek güç, moment yoğunluğu gerektirdiği uygulamalarda nadir toprak elementi SmCo ve NdFeB mıknatıslar kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında seri üretimde olan radyal akılı bir sürekli mıknatıslı motor incelenmiştir ve bu motorda kullanılan sürekli mıknatıs ferrit mıknatıstır. Çalışmanın devamında, radyal akılı motor performans özelliklerini karşılayan bir eksenel akılı motor tasarlandığından bu motorda kullanılan sürekli mıknatıs türü de ferrit mıknatıstır.



Şekil 2.1 : Sürekli mıknatıslı malzemelerdeki gelişmeler a) Maksimum enerji çarpanındaki gelişmeler b) Kalıcı mıknatısiyet ve giderici kuvvet karşılaştırmasındaki gelişmeler [19].

2.2 Fırçasız Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Genel ismiyle fırçasız sürekli mıknatıslı motorlar, klasik senkron motorların rotorlarında bulunan ve doğru akımla beslenen sargılarının sürekli mıknatıslarla değiştirilmesi sonucu elde edilen motorlardır. En genel avantajlarıyla bu motorlar rotorlarında sargıların yerine sürekli mıknatısların bulunmasından dolayı, rotor bakır

kaybının olmaması, rotor ağırlığının azalması gibi avantajlara sahiptir. Ancak, kuşkusuz en önemli avantajları komütasyon işleminin elektronik olarak evirici üzerinden yapılmasından dolayı fırça-kollektör düzeneğinin bulunmamasıdır. Böylece fırça-kollektör düzeneğinin getirdiği; bakım gerektirme, güvenilirliğin az olması, fırçalar üzerinde ark oluşumu gibi dezavantajlar da ortadan kaldırılmış olmaktadır [21-23]. Fırçasız sürekli mıknatıslı motorlar iki genel başlık altında incelenip sınıflandırılabilir; bunlar sürekli mıknatıslı senkron motorlar ve fırçasız doğru akım motorlarıdır.

2.2.1 Sürekli mıknatıslı senkron motorlar

Fırçasız sürekli mıknatıslı motorlar; endüklenen zıt E.M.K.'larına ve besleme akımının dalga şekline göre sınıflandırılmışlardır. Konstrüktif açıdan da, stator sargı modelleri gibi bazı özel tasarımları içerebilirler. Bu motorlar endüklenen zıt E.M.K.'sı yamuk biçimli olan ve düzgün moment üretebilmesi için kare dalga akım beslemesine ihtiyaç duyan sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları ve endüklenen zıt E.M.K.'sı sinüzoidal biçimli olan ve düzgün moment üretebilmek için sinüzoidal akım beslemesine ihtiyaç duyan, fırçasız sürekli mıknatıslı alternatif akım motorları olarak da adlandırılan fırçasız sürekli mıknatıslı senkron motorlarıdır. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda, vektör kontrol yöntemi ile birlikte ayırık olarak moment ve hız kontrol edilebilmekte ve moment titreşimi düşük, düzgün bir moment elde edilebilmektedir [21-24].

Bu tez çalışmasında beyaz eşya çamaşır makinesi uygulamasında kullanımda olan, sürekli mıknatıslı radyal akılı kare dalga akım beslemeli bir FDAM analiz edilmiş ve muadil bir eksenel akılı FDAM tasarlanmış ve karşılaştırması yapılmıştır. Bundan dolayı tezin devam eden kısımları radyal ve eksenel akılı FDAM ile ilgili içeriğe sahiptir.

2.2.2 Fırçasız doğru akım motorları

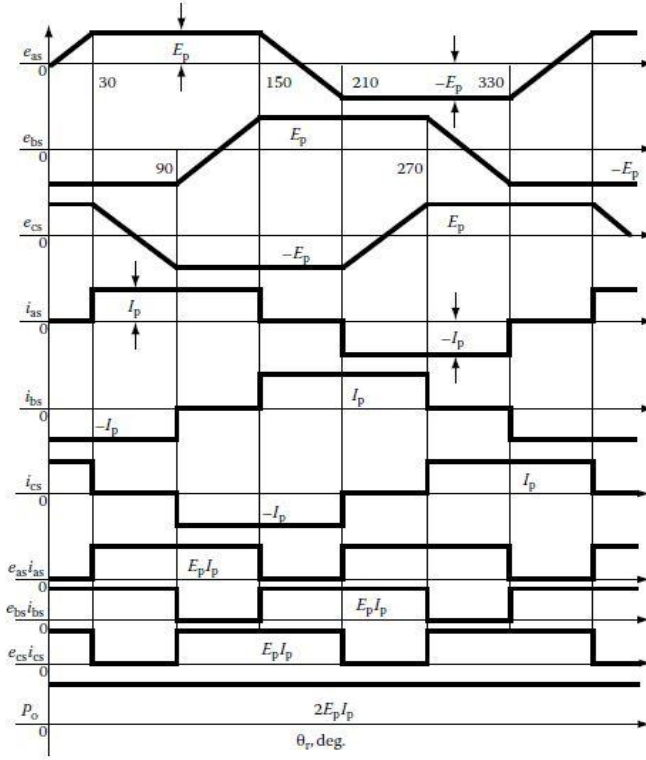
Fırçasız doğru akım motorları, rotorlarında uyarma sargıları yerine sürekli mıknatıslar içeren ve statorları kare dalga akım ile beslenen motorlardır. Statora yerleştirilen ve yaygın olarak üç fazlı olan sargılar aracılığıyla oluşturulan manyetik alan ile sürekli mıknatısların manyetik alanının etkileşimi sonucu endüklenen moment ile enerji dönüşümü gerçekleştiren elektrik motorlarıdır. Rotor manyetik alanı ile stator manyetik alanının uygun şekilde etkileşip düzgün bir moment elde

edilebilmesi için statordaki sargıların uygun olarak anahtarlanması gerekmektedir. FDAM, komütasyon işleminde kullanılan fırça-kollektör düzeneğinin mekanik kısıtlarını ortadan kaldırmak amacıyla tasarlanmış elektronik komütasyon işlemi gerçekleştiren bir doğru akım servo motoruna benzetilebilir.

Rotor tarafından oluşturulan manyetik alan ile stator alanının kenetlenip moment üretebilmesi için bir konum algılayıcı ile rotor pozisyonunun algılanıp uygun stator sargılarının anahtarlanması gerekmektedir. Şekil 2.2’de üç fazlı bir FDAM’ın stator sargılarında endüklenen zıt E.M.K. ile uygun sargıların anahtarlanması sonucu oluşan motor gücü görülmektedir. Bu model, çalışma prensibinin anlaşılması için $2p=2$ kutup sayısına sahip temel model için çıkartılmıştır, yani rotorda farklı polaritelerde iki adet sürekli mıknatıs bulunmaktadır. FDAM’da endüklenen gerilim Şekil 2.2’den de görülebildiği üzere yamuk biçimlidir. Düzgün ve yüksek bir güç ve dolayısıyla moment elde edebilmek için stator sargılarının endüklenen gerilimin sabit ve maksimum olduğu anlarda kare dalga akım ile beslenmesi gerekmektedir. Şekil 2.2 incelendiğinde görülmektedir ki her bir anda fazlardan sadece ikisi aktif durumdadır yani sadece iki faz aynı anda kare dalga akım ile beslenmiştir ve bu akım şekilleri de ters polaritededir. FDAM’unda teorik olarak gerilim değerinin, elektriksel olarak 120^0 sabit ve maksimum değerinde olduğu görülmektedir. Bundan dolayı da her bir sargı 120^0 sabit olarak kare dalga akım ile beslenmeli ve düzgün bir anahtarlama haritası ile aynı anda sadece iki faz aktif olmalıdır. Düzgün bir güç, moment değeri elde edebilmek için; sargılarda endüklenen gerilim polaritesi ile besleme akımı polaritesi aynı olmalıdır. Şekil 2.2’deki modelde tam bir devir için, sargıların aktif olacakları açılı aralıkları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Sargıların Çizelge 2.1’de gösterildiği şekilde anahtarlanması Şekil 2.3’de gösterilen anahtarlar yani evirici ile yapılmaktadır. Şekil 2.3’teki sürücü devre bir adet doğru gerilim kaynağı, altı adet anahtar olarak kullanılan, kapısı izole edilmiş bipolar transistör (IGBT), altı adet serbest geçiş diyodu ve bu sürücü devre ile beslenen üç fazlı yıldız bağlı FDAM stator sargı modelinden oluşmaktadır. Sürücü devre, uygun anahtarların kapılarına iletim sinyalleri verilmesiyle iletime geçerek, stator sargılarını doğru akım ile beslemektedir. Şekil 2.3’te FDAM a fazını pozitif doğru akım ile besleyecek anahtar T1 transistörü, negatif doğru akım ile besleyecek anahtar ise T4 transistörüdür. Benzer şekilde b fazı pozitif akım T3, negatif akım T6; c fazı için ise pozitif akım T5, negatif akım T2 transistörleriyle sağlanacaktır. Stator sargılarının

Çizelge 2.1'deki gibi anahtarlanabilmesi için tam bir devir için Çizelge 2.2'de gösterildiği şekilde anahtarların iletimde olması gerekmektedir. Bu ise uygun aralıklarda uygun anahtarların-transistörlerin kapılarına uygun anahtarlama işaretlerinin gönderilmesi, yani bir kontrol devresi yardımıyla yapılabilmektedir. Çizelge 2.2 incelendiğinde görülmektedir ki, bir anda aktif olan iki fazdan birinde komütasyon yani akımın yön değiştirme işlemi 60^0 'lik aralıklarla gerçekleşmektedir ve bu işlem fırça kollektör düzeneği yerine, anahtar olarak kullanılan transistörler ile birlikte elektronik olarak gerçekleşmektedir. Uygun sargıların 60^0 'lik aralıklarla anahtarlanabilmesi için rotor pozisyonun hangi konumda olduğunun bilinmesi ve buna göre anahtarlama yapılması gerekmektedir. Rotor pozisyonunun algılanması ise algılayıcı (sensor) aracılığı ile yapılmaktadır. FDAM'unda sadece rotor konumunun bilinmesi yeterli olmaktadır, bunun için de manyetik etkili algılayıcılar (Hall effect sensor) yeterli olmaktadır [21,23,25-27].

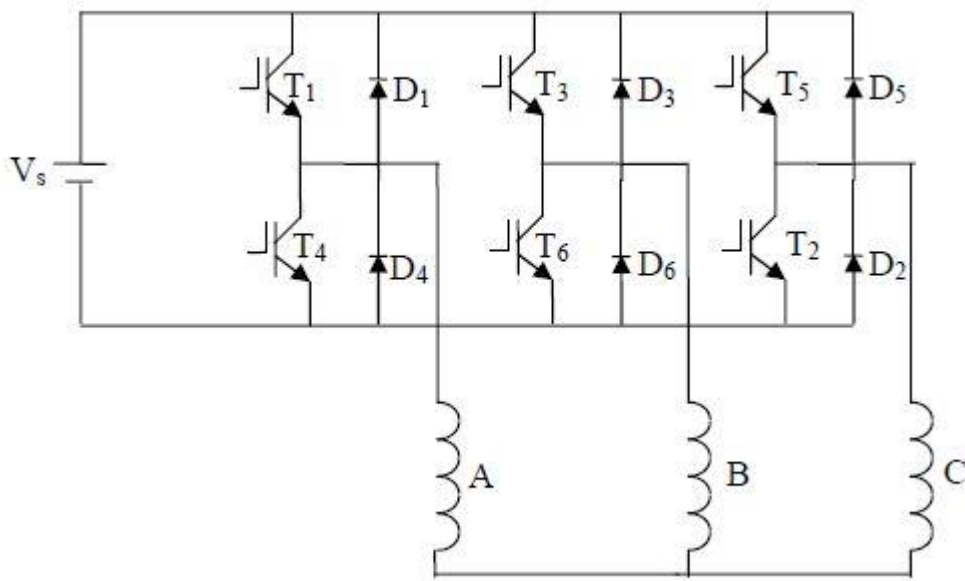
FDAM motor içerisindeki akımın radyal veya eksenel olarak devresini tamamlamasına göre radyal akılı FDAM ve eksenel FDAM olarak ikiye ayrılmaktadır. Çalışma prensibi ve gücün, momentin oluşumu her iki motor türünde de yukarı da anlatıldığı şekilde gerçekleşmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında ilk olarak ele alınan motor radyal akılı FDAM olduğundan ve muadil olarak tasarlanan motor ise eksenel akılı FDAM olduğundan her iki motor türünden de ilerleyen kısımda kısaca bahsedilmiştir.



Şekil 2.2 : FDAM endüklenen zıt E.M.K., faz besleme akımları ve güç üretimi [25].

Çizelge 2.1 : Şekil 2.2’deki durum için stator sargılarının aktif oldukları aralıklar.

	Pozitif Kare Dalga Akım Beslemesi[θ_r -Derece]	Negatif Kare Dalga Akım Beslemesi[θ_r -Derece]
Stator A Fazı	$30^\circ - 150^\circ$	$210^\circ - 330^\circ$
Stator B Fazı	$150^\circ - 270^\circ$	$330^\circ - 90^\circ$
Stator C Fazı	$270^\circ - 30^\circ$	$90^\circ - 210^\circ$



Şekil 2.3 : FDAM stator fazları ve sürücü devresi [23].

Çizelge 2.2 : Tam bir devirde anahtarların iletimde oldukları aralıklar.

Anahtarların Rotor Pozisyonu [Θ_r -Derece] Göre İletimde Oldukları Aralıklar						
0-30	30-90	90-150	150-210	210-270	270-330	330-360
T5-T6	T1-T6	T1-T2	T2-T3	T3-T4	T4-T5	T5-T6

Uygun sargıların anahtarlanması ile sürülen FDAM'ın endüklenen gerilim ve moment ifadelerinin analitik olarak çıkarımı kolay bir şekilde yapılabilmektedir [21]. Endüklenen zıt E.M.K. Faraday yasasına göre motor içerisindeki akı halkalanmasından denklem 2.1 ile elde edilebilmektedir. Burada e_{as} stator a fazına ait zıt E.M.K., λ akı halkalanmasını, Θ_e elektriksel açısal konumu, ω_e elektriksel açısal hızı, p çift kutup sayısını, ω_m mekanik rotor hızını, N faz başına sarım sayısını ve Φ_g hava aralığı kutup akısını ifade etmektedir.

$$e_{as} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\Theta_e}{dt} \frac{d\lambda}{d\Theta_e} = \omega_e \frac{d\lambda}{d\Theta_e} = p\omega_m \frac{d\lambda}{d\Theta_e} = p\omega_m \frac{2N\Phi_g}{\pi} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'deki hava aralığı manyetik kutup akısı denklem 2.2'deki gibi yazılabilmektedir. Burada, B_g hava aralığı akı yoğunluğunu, S_g hava aralığı kesit alanını, R_{ro} rotor dış yarıçapını, Θ_p açısal kutup adımını, L_{st} eksenel paket boyunu ifade etmektedir.

$$\Phi_g = B_g S_g = B_g R_{ro} \Theta_p L_{st} = \frac{2\pi}{2p} B_g L_{st} R_{ro} \quad (2.2)$$

Denklem 2.1 ile 2.2 kullanılarak stator 'a' fazına ait endüklenen zıt E.M.K. genliği denklem 2.3'teki gibi hesaplanabilmektedir. Burada K_e zıt E.M.K. sabitini ifade etmektedir. Denklem 2.3, genel denklem 2.4'e uymaktadır.

$$|e_{as}| = E_{as} = p\omega_m \frac{2N}{\pi} \left\{ \frac{2\pi}{2p} B_g L_{st} R_{ro} \right\} = 2NB_g L_{st} R_{ro} \omega_m = K_e \omega_m \quad (2.3)$$

$$e = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) dl \quad (2.4)$$

Motor içerisindeki iç güç, fazlardaki zıt E.M.K. ile bu fazlardan akan akımın çarpımı sonucu elde edilmektedir, çıkarım açısından kayıpsız sistem olarak düşünülürse, iç güç çıkış mil gücüne eşit alınabilir. Çıkış güç ifadesi ise çıkış momentinin mekanik

hız ile çarpımı sonucu oluşmaktadır. Böylece motorun çıkış momentinin genliği denklem 2.5'teki gibi elde edilir. Bu eşitlikteki K_t moment sabitini ifade etmektedir.

$$|T| = \frac{E_{as}i}{\omega_m} = 2NB_gL_{st}R_{ro}i = K_t i \quad (2.5)$$

2.4 ve 2.5 denklemleri incelendiğinde zıt E.M.K. ve moment sabitlerinin eşit ve 2.6'daki gibi oldukları ve bu zıt E.M.K. ile moment eşitliklerinin fırça-kollektör düzenekli doğru akım motorları ile aynı oldukları görülmektedir. Böylece, FDAM'lar, fırçalı doğru akım motorunun sahip olduğu ayırık moment ve gerilim kontrolü gibi üstün özellikleri sunabilmektedir.

$$K_e = K_t = 2NB_gL_{st}R_{ro} \quad (2.6)$$

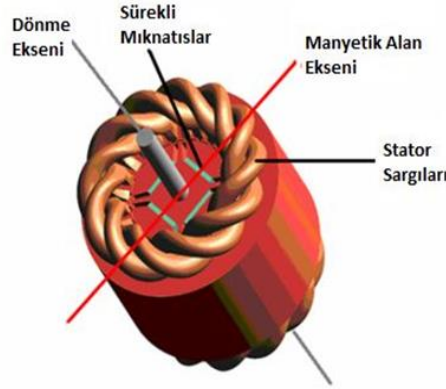
2.2.2.1 Radyal akılı fırçasız doğru akım motorları

Fırçasız doğru akım motorları birkaç şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar sürekli mıknatısların rotor üstünde konumlandırılma şekline göre, rotorun statorun içerisinde veya dışında olmasına göre ve motor içerisindeki akının takip ettiği yola göre şeklinde sıralanabilir. Sürekli mıknatısların rotor üzerindeki konumuna göre FDAM'lar yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı motorlar olmak üzere genel olarak ikiye ayrılırlar; fakat mıknatısların rotor içerisinde gömülü olduğu düzene göre de farklı isimlendirmeler ve sınıflandırmalar literatürde bulunmaktadır. Diğer bir sınıflandırma şekli ise, rotorun statorun içerisinde olduğu ve hareketli kısmın içeride olup hareketin sadece mil dönüşünden algılandığı iç rotorlu FDAM ve rotorun, statorun dışında olduğu ve sabit kısmın statorun sabitleme parçalarıyla birlikte içeride sabitlendiği, dönen bir mil yerine sabitlendiği yükü birlikte dönen dış rotorlu FDAM'lardır. Dış rotorlu FDAM'lar doğrudan tahrik sistemlerinde yükün içine monte edilerek doğrudan yükü birlikte hareket etmektedir, elektrikli bisikletler ve araçlar gibi uygulamalarda tekerlek içerisine gömülü motorlarda dış rotorlu yapı uygulama alanı bulmaktadır.

FDAM'ların bir başka sınıflandırılma şekli ise, motor içerisindeki manyetik akının takip ettiği yola göre yapılmaktadır. Bunlar akının motor miline dik olarak hareket

edip ve devresini tamamladığı radyal akılı motor ve akının motor miline paralel olarak hareket edip ve devresini tamamladığı eksenel akılı motordur. Şekil 2.4'te bir radyal akılı FDAM modeli, motor içerisindeki manyetik alan yönü ile birlikte gösterilmiştir. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi manyetik alan yönü, yani manyetik akı yolu motor miline dik olarak hareket eder ve devresini tamamlar. Radyal akılı motorda iletkenler eksenel sarıldığı için iletkenlerde dolaşacak akım paket boyu boyunca eksenel olarak akacaktır. Motorda oluşacak kuvvet ve dolayısıyla moment ve dönüş yönü sağ el kuralına göre belirlenir.

Radyal akılı motorlarda eksenel uzunluk, eksenel akılı motorlara göre daha büyük ve motor çapları daha küçüktür. Bu motorlarda hava aralığının, eksenel akılı motorlara göre küçük olmasından dolayı motor içerisinde gerekli akı yoğunlukları daha düşük enerjili mıknatıslarla veya daha düşük hacimli mıknatıs kullanımıyla gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzdeki uygulamalar motor hacimlerinin ve ağırlıklarının küçültülmesini, güç yoğunluklarının artırılmasını gerektirmektedir. Bu şartlarda radyal akılı motor, günümüzdeki uygulamalarda gerekli isterleri yerine getirebilmekte zorlanmaktadır. Bunun yanında, eksenel akılı motorun sunduğu daha az yer kaplayan disk tipi şekil, kısa paket boyu ve yüksek enerjili mıknatısların kullanımı, bu motoru öncelikli konuma getirmektedir.



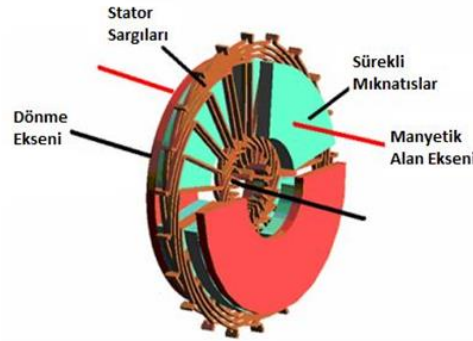
Şekil 2.4 : Radyal akılı FDAM modeli [28].

2.2.2.2 Eksenel akılı fırçasız doğru akım motorları

Disk tipi motor olarak da adlandırılan eksenel akılı FDAM yüksek güç yoğunluğu, yassı şekli, kısa boyu sayesinde daha az yer kaplayan yapısı, tasarımı ve rotorda ferromanyetik malzeme kullanımının az olması, rotorda bakır kayıplarının bulunmaması gibi üstün özelliklere sahiptir. Bunun yanında yüksek hızlarda yüksek

vantilasyon kayıpları ve karmaşık motor topolojisi gibi bazı dezavantajlara sahiptir [4].

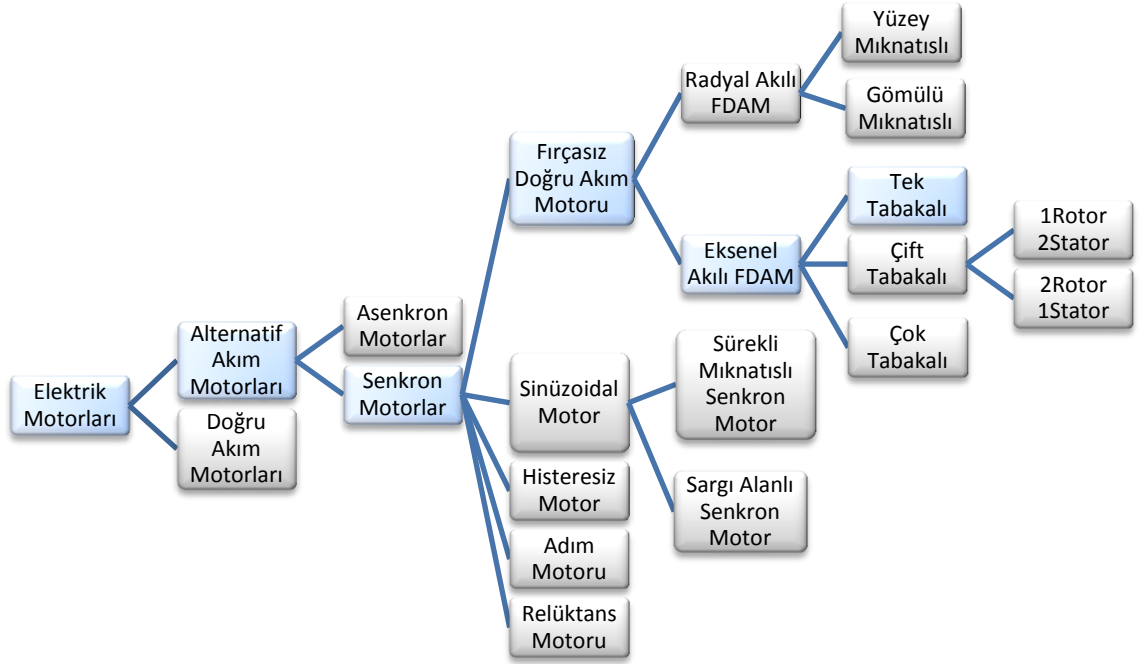
Eksenel akılı FDAM çalışma prensibi bölüm 2.2.2’de anlatıldığı şekildedir. Temel farklılık motor içerisindeki akı yoludur. Şekil 2.5’te bir eksenel akılı FDAM modeli gösterilmiştir, şekilden görülebileceği üzere motor içerisinde oluşan manyetik alan eksenine paraleldir ve manyetik akı motor miline paralel olarak hareket edip devresini tamamlar. Eksenel akılı motorda sargılar radyal olarak sarıldığından akım radyal olarak sargılar üzerinden akacaktır. Motorda oluşacak kuvvet ve dolayısıyla moment ve dönüş yönü sağ el kuralına göre belirlenir.



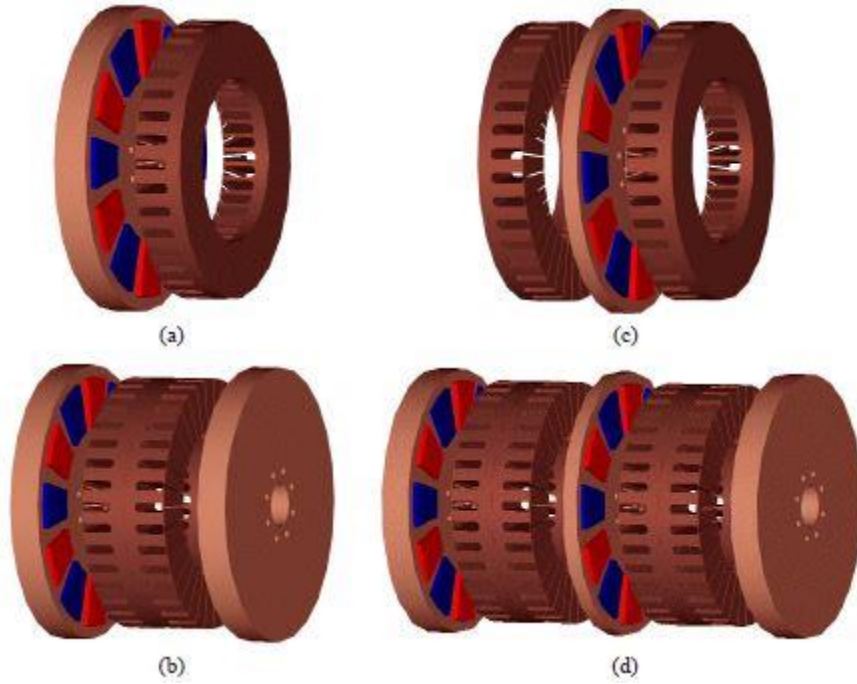
Şekil 2.5 : Eksenel akılı FDAM modeli [28].

Bu tez çalışmasının temel konusunu eksenel akılı FDAM’lar oluşturmaktadır. Bu motorların elektrik motorları ailesindeki yerleri Şekil 2.6’te gösterilmiştir. Şekil 2.6’te gösterildiği gibi eksenel akılı FDAM’lar alternatif akım motorlarından, senkron motorlar altında, sürekli mıknatıslı rotora sahip, kare dalga akım beslemeli ve motor içerisindeki akının eksenel yol izlediği motorlardır.

Şekil 2.6’da eksenel akılı FDAM’ları tasarımlarında kullanılan rotor ve stator sayılarına göre sınıflandırılmıştır. Bu dört motor modeli Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu dört motor modeli kendi içlerinde ayrıca mıknatısların rotordaki konumlarına göre; yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı şeklinde sınıflandırılabilir. Diğer bir sınıflandırma şekli ise statorda olukların olup olmamasına göre yapılabilmektedir. Oluksuz ve oluklu stator yapıları eksenel akılı FDAM’larda mevcuttur. Özellikle çok düşük vuruş momenti ve çok hafif tasarım gerektiren uygulamalarda oluksuz tasarımlar kullanılmaktadır.



Şekil 2.6 : Eksenel akıllı FDAM’ların elektrik motorları ailesindeki yerleri [4,21,23]



Şekil 2.7 : Eksenel akıllı FDAM stator rotor sayılarına göre sınıflandırılması, (a) Tek tabakalı (1 rotor-1 stator), (b) Çift tabakalı (2 rotor-1 stator), (c) Çift tabakalı (1 rotor-2 stator), (d) Çok tabakalı (3 rotor-2 stator) [29].

Şekil 2.7’deki eksenel akıllı FDAM’larının farklı özellikleri mevcuttur. Tek tabakalı motor, motor tasarımı, az miktarda mıknatıs, iletken ve ferromanyetik malzeme gerektirmesi, basit konstrüksiyonu bakımından en basit ve ucuz olan eksenel akıllı

FDAM modelidir. Ancak diğer çift ve çok tabakalı modellere göre üretilen moment daha düşüktür. Çift tabakalı motorlardan 2 statorlu modelde stator sargılarının rotor üzerinden bağlandığı sargı sonu bağlantılarından dolayı kullanılmayan sargı miktarı fazladır. Dolayısıyla oluşan bakır kayıpları ve motor ağırlığı fazladır, ayrıca motor içindeki akı statorlar arasında devresini tamamlarken diğer motor modellerine göre daha fazla demir kaybına sebep olmaktadır. Çift tabakalı 2 rotorlu modelde manyetik akı devresini rotorlar arasından tamamladığından oluşan demir ve bakır kayıpları azdır, statorun her iki tarafında dönen rotorların olması stator sargılarının soğutulmasında avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında çift rotorlu motorlarda, çift statorlu yapıya göre, özellikle yüksek hızlarda kendini gösteren, yüksek sürtünme ve vantilasyon kayıpları mevcuttur. Çok tabakalı motorlar ise yüksek güç gerektiren uygulamalarda gerçekleştirilebilmektedir; ancak tabaka sayısının artmasıyla birlikte artan maliyet ve kayıplardan dolayı bazı özel uygulamalar dışında pek tercih edilmemektedir [4].

Bu tez çalışmasında radyal akılı motorun yerine tasarlanan eksenel akılı motorun bazı özelliklerinin iyi olması hedeflenmektedir. Bu özellikler radyal akılı motorun sağladığı performans özelliklerini sağlayıp, eksenel akılı motorun daha ucuz, güç ve moment yoğunluğu daha fazla, daha hafif bir tasarım olması hedeflenmektedir. Bu sayılan özellikleri eksenel akılı motorda sağlayabilmenin en uygun yolu, bir tabakalı (1 rotor-1 stator) eksenel akılı FDAM tasarlamaktır. Çamaşır makinesi uygulaması gibi düşük güç gerektiren bir uygulamada tek tabakalı motor yeterli olmaktadır. Daha yüksek güç gerektiren; fakat, ağırlık ve ucuzluk gibi kısıtları olmayan tasarımlar için iki tabakalı veya çok tabakalı eksenel akılı FDAM uygundur. Ayrıca literatürde farklı güç kademeleri için radyal akılı motor ile karşılaştırılmak üzere tasarlanan farklı stator-rotor kombinasyonlarındaki eksenel akılı FDAM'lar arasında düşük güçlerde tek tabakalı motorun en uygun tasarım olduğu belirtilmiştir [6]. Tek tabakalı motorda ise üretim maliyetleri ve üretilebilirliği açısından daha verimli tasarım olan yüzey mıknatıslı motor topolojisi tercih edilmiştir. Tasarlanan motorun oluklu ve oluksuz olması durumu, oluksuz yapının daha fazla miktarda mıknatıs gerektirmesinden dolayı, maliyet kısıtı gözetilerek oluklu yapı tercih edilmiştir.

3. RADYAL VE EKSENEL AKILI MOTORLARIN KARŞILAŞTIRILMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu tezin kapsamında, eksenel akılı FDAM ile radyal akılı FDAM'ın karşılaştırılmasında kullanılan yöntemler analitik ve sonlu elemanlar yöntemleridir. Bu iki yöntemden bu bölümle kısaca bahsedilmiştir.

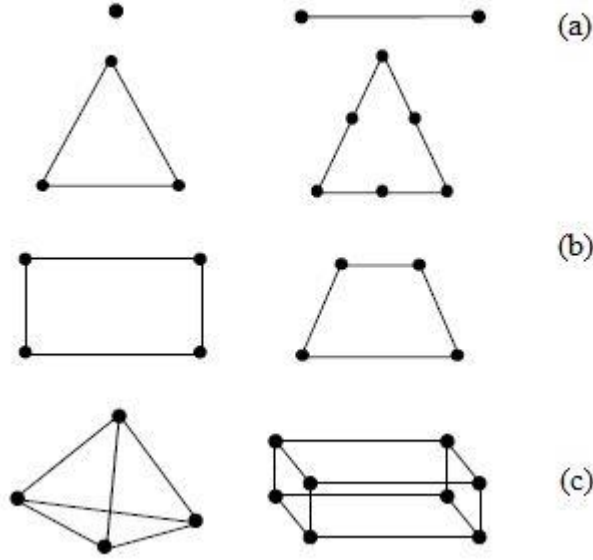
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, kompleks elektromanyetik alan problemleri, devre parametreleri gibi analitik çözümün yetersiz kaldığı, bir çok zorlu problemin çözümünde kullanılan bir sayısal yöntemdir. Elektrik motorlarındaki lineer olmayan malzeme özelliklerinden dolayı, motorlardaki manyetik alan problemleri çözümünde kullanılan uygun bir yöntemdir.

Geometrik çiziminin yapıldığı, malzeme ve sınır koşullarının tanımlandığı bir problemin SEY ile çözümünde aşağıdaki adımlar izlenir [30].

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması
- Her bir sonlu eleman için temel denklemlerin yazılması
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi
- Elde edilen denklem takımının çözümü

Elektrik motorlarında çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrıştırılması, çizgisel uzunlukların, kesit alanlarının veya hacimlerinin, noktasal, çizgisel parçalara, küçük alanlara veya hacimlere bölünmesiyle yani bir boyutlu, iki boyutlu ya da üç boyutlu Şekil 3.1'de gösterilen elemanlar kullanılarak yapılır.



Şekil 3.1 : Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan ayrıklaştırma elemanları (a) 1 Boyutlu, (b) 2 Boyutlu, (c) 3 Boyutlu

Ayrıklaştırma işleminden sonra her bir eleman için; sonlu elemanın içerdiği noktalar kullanılarak temel denklemler yazılır. Burada kullanılan temel denklemler Maxwell denklemleridir. Bu Maxwell denklemleri, Faraday, Amper, Elektriksel Gauss ve Manyetik Gauss yasalarını içeren ve sırasıyla denklem 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'te gösterilen denklemlerdir. Burada \mathbf{E} elektriksel alan şiddetini, \mathbf{B} manyetik akı yoğunluğunu, \mathbf{H} manyetik alan şiddetini, \mathbf{J} akım yoğunluğunu, \mathbf{D} elektriksel akı yoğunluğunu, ρ hacimsel yük yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

Bu denklemlerin yanında denklem 3.5, 3.6 ve 3.7'de gösterilen yardımcı malzeme denklemleri kullanılmaktadır. Burada ϵ elektriksel geçirgenlik, μ manyetik geçirgenlik ve σ öz iletkenlik sabitleridir.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.7)$$

Her bir sonlu eleman için Maxwell denklemleri kullanılarak yazılan diferansiyel denklemlerden sonra tüm ayrıklaştırılmış sonlu elemanlar ve denklemleri birleştirilir. Daha sonra elde edilen denklem takımı çözülür. Çözüm aşamasının kolaylaştırılması için hesaplarda alan büyüklükleri yerine denklem 3.8’de gösterilen manyetik vektör potansiyeli ile işlemler yapılır. İlk olarak manyetik vektör potansiyeli (A) hesaplanır ve buradan hareketle diğer manyetik ve elektriksel alan büyüklükleri hesaplanır.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.8)$$

Günümüzde SEY ile analiz gerçekleştiren birçok paket program bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan SEY paket programı CEDRAT/Flux2D3D programıdır. Flux ve diğer SEY paket programları üç ana mekanizmadan oluşur. Bu mekanizmalar ön işlem (pre-processor), alan çözümü, çözüm aşaması (field-solver), ve işlem sonrası adımı (post-processor)’dır. Yazılım programının ön işlem aşamasında model geometrik olarak çizilir, fiziksel özellikler, malzeme tanımlamaları, sınır koşul tanımlamaları yapılır ve geometrik sonlu elemanlar ile ayrıklaştırılarak SEY ağ yapısı elde edilir. Çözüm aşamasında SEY ağ yapısı için, tanımlanan hata yaklaşımı ile birlikte iterasyonlar yapılarak alan çözümü yapılır. Sonraki aşama olan işlem sonrası adımda istenilen büyüklükler, grafikler ve veriler şeklinde alınır [31,32].

SEY bu tezde radyal motorun analizlerinde ve analitik olarak tasarlanmış eksenel motorun analizlerinde kullanılmıştır. Flux programında yapılan SEY analizi sayesinde, hem eksenel akıli motor için analitik analiz ile SEY analizi karşılaştırılarak tasarımın doğruluğu irdelenmiş, hem de, radyal akıli motor ile eksenel akıli motor karşılaştırmaları yapılarak, eksenel akıli motorun, radyal akıli motor yerine kullanılabilirliği sınanmıştır.

3.2 Analitik Yöntem

Bu çalışmada kullanılan diğer bir yöntem ise analitik yöntemdir. Analitik yöntem ile radyal akılı motor yerine önerilen eksenel akılı motor tasarlanmıştır. Bu yöntemde kurulan bir algoritma ile birlikte, radyal akılı motorun çıkış moment değerini nominal hızda sağlayan ve farklı kutup sayılarında güç yoğunluğunu maksimum yapacak şekilde tasarım eniyilemesi yapılan eksenel akılı FDAM tasarlanmıştır. Tasarlanan bu algoritma MATLAB® programı üzerinde parametrik olarak yazılmıştır ve eksenel akılı motorun temel boyut büyüklüklerini çıktı olarak vermektedir.

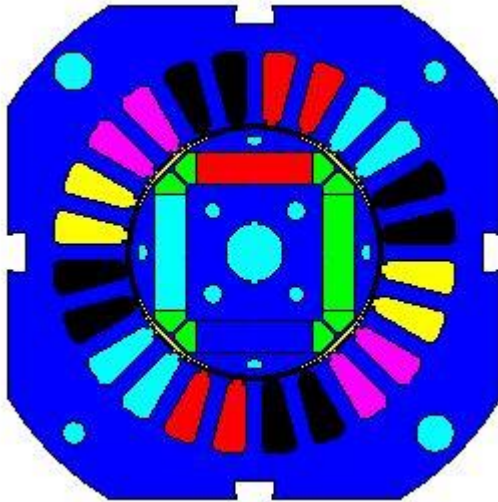
Farklı kutup sayılarında, güç yoğunluğunu maksimum yapan eniyileme yapılmış tasarımlar arasından uygun kutup sayısı seçilmiş ve motorun temel boyutlandırması yapılmıştır. Eksenel akılı FDAM'nun tasarımı ayrıntılı olarak ilerleyen kısımda bulunan Bölüm 5'te anlatılmıştır.

4. RADYAL AKILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU ANALİZİ

Endüstride çamaşır makinesi uygulamasında kullanılan, ve tezin temel konusu olan eksenel akılı FDAM tasarımında referans makine olarak alınan radyal akılı FDAM bu bölümde incelenmiştir. İlk kısımda motor özellikleri, malzeme özellikleri verilmiştir. Devam eden ikinci kısımda motorun Flux programında oluşturulan geometrik modeli ile birlikte SEY ağ yapısı verilmiştir. Üçüncü kısımda ise motorun analizleri yapılarak, endüklenen zıt E.M.K., motor momenti ve faz akımları gibi grafikleri alınmış ve bu grafikler, plaka değerleri ve zıt E.M.K. test sonucuyla karşılaştırılmıştır. Son kısımda radyal akılı FDAM’da kullanılan malzeme hacimleri, ağırlıkları, maliyetleri ile birlikte oluşan kayıplar ve verim analitik olarak hesaplanmıştır.

4.1 Radyal Akılı FDAM Özellikleri

Referans olarak alınan radyal akılı FDAM çamaşır makinelerinde tamburu döndürmek amacıyla kullanılmaktadır. Motorun kesit görüntüsü Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Radyal akılı FDAM kesit görüntüsü.

Tasarlanan eksenel akılı FDAM, çamaşır makinelerinde bu radyal akılı motorun yerine kullanılmak amacıyla tasarlanmıştır. Dolayısıyla radyal akılı motorun

özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve analizlerinin yapılması gerekmektedir. Radyal motorun nominal çalışma değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Radyal akılı FDAM plaka değerleri.

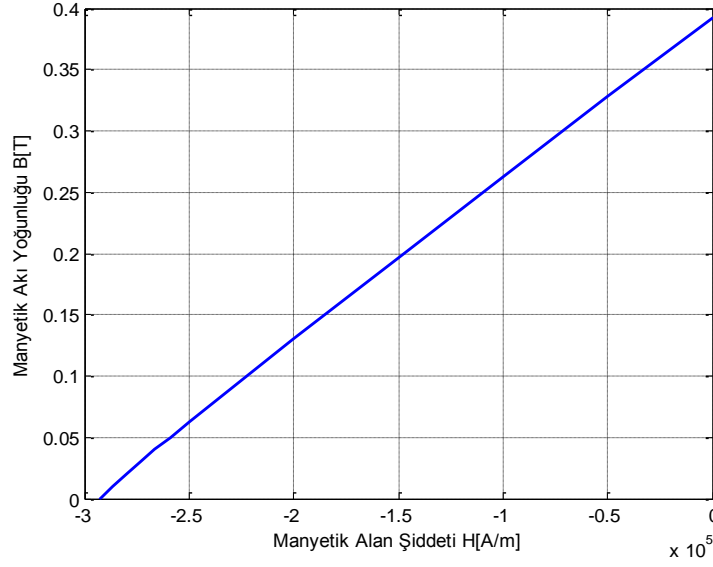
Motor Özellikleri	
Besleme Gerilimi	220/240 VAC
Çalışma Frekansı	50/60 Hz
Nominal Çıkış Gücü	66,6 W
Nominal Akım	2,4 A
Çıkış Momenti (Yıkama/Sıkma)	1,2/0,4 Nm
Hız (Yıkama/Sıkma)	530/15000 min ⁻¹
Kayış/Kasnak Oranı	1/12

Çizelge 4.1 incelendiğinde radyal motorun yıkama aşamasında 530 min⁻¹ hızında 1,2 Nm’lik bir moment üretmesi gerektiği görülmektedir. Sıkma aşamasında motor devri yapılan kontrol tekniğiyle birlikte 15000 min⁻¹ çıkmaktadır. Tasarlanan eksenel motor, radyal motorun nominal çalışma durumu olan 1,2 Nm ve 530 min⁻¹ hızına göre yapılmıştır. Motorun SEY modelinin kurulabilmesi ve analizlerinin yapılabilmesi için mekanik boyutlarının bilinmesi gerekmektedir. Çizelge 4.2’de radyal motor temel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Radyal akılı FDAM’nun özellikleri.

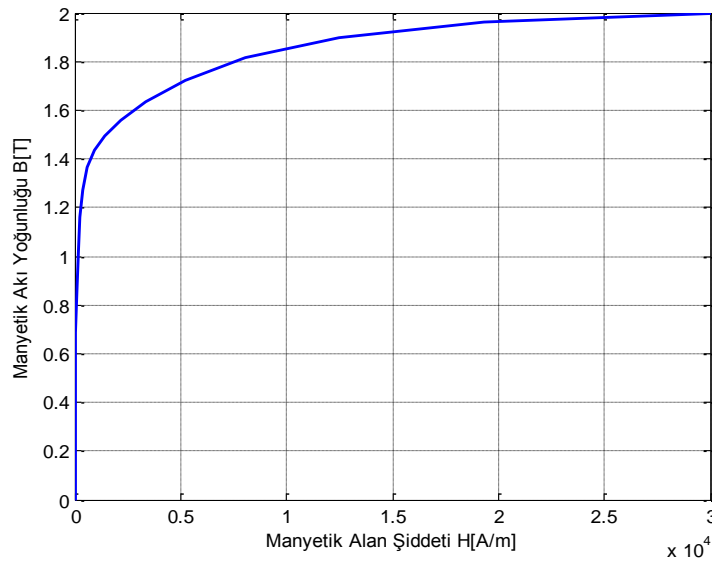
Motor Özellikleri	
Faz Sayısı	3 Fazlı
Stator Oluk Sayısı	24
Kutup Sayısı	2p=4
Mıknatıs Yerleşim Türü	Gömülü Mıknatıs
Sürekli Mıknatıs Tipi	Ferrit
Motor Ağırlığı	6,5 kg

Üretilen ve kullanılan radyal akılı motorda kullanılan sürekli mıknatıs türü maliyet performans özelliği düşünülerek ferrit mıknatıs seçilmiştir. Düşük enerjili olmalarına rağmen düşük güçlü uygulama olan çamaşır makinesi uygulamaları için gerekli enerjiyi sağlayabilmektedir. Tasarlanan eksenel akılı motor, aynı şekilde çamaşır makinesi uygulamasında kullanılacağından ve radyal akılı motorla güç yoğunluğu, ağırlık gibi özelliklerin karşılaştırılacağından aynı malzemeler kullanılmış ve tasarım yapılmıştır. Kullanılan ferrit sürekli mıknatıs karakteristiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan ferrit sürekli mıknatıs karakteristiği.

Radyal ve eksenel motorların stator ve rotor laminasyonları da aynı özellikteki malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan alaşım ferromanyetik malzemede doyma akısı 2T civarındadır. Kullanılan ferromanyetik malzemeden maksimum faydanın sağlanabilmesi için malzemenin dirsek bölgesinde çalıştırılması gerekmektedir. Eksenel makine tasarımında da ferromanyetik malzemeden yüksek fayda elde edilmesine dikkat edilerek tasarım yapılmıştır. Her iki motor türünde de kullanılan laminasyon malzemesinin B-H karakteristiği Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

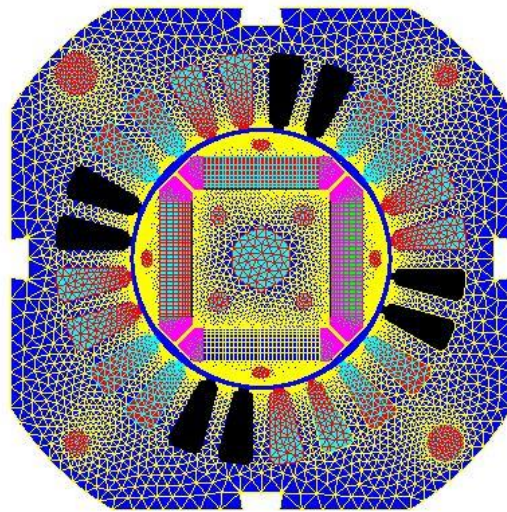


Şekil 4.3 : Radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan ferromanyetik malzeme karakteristiği.

4.2 Radyal Akılı FDAM SEY Modeli ve Ağ Yapısı

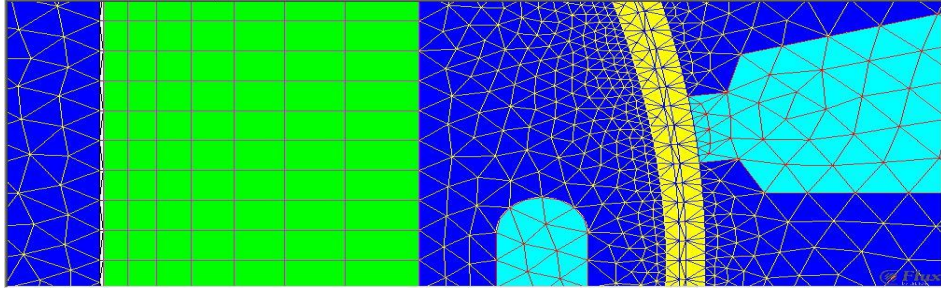
Sonlu elemanlar yöntemi, radyal ve eksenel akılı motorda kullanılan malzemelerin Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilen lineer olmayan karakteristikleri ve motorların karmaşık topolojisinden dolayı, alan problemlerinde gerekli kolay ve gerçekçi çözümleri üretemeyen analitik yöntemin yerine çok elverişli bir yöntemdir. Radyal akılı motorların paket programlardaki SEY analizinde, paket boyu boyunca topolojinin sabit kalmasından dolayı iki boyutlu olarak yapılabilmektedir. Ancak, eksenel akılı motorlar için aynı durum geçerli değildir, eksenel akılı motorlarda eksen boyunca değişimin çok olmasından ötürü üç boyutlu modeller ve analizler zorunlu hale gelmektedir. Yapılan eksenel akılı motor analizlerinde üç boyutlu SEY analizleri yapılmıştır.

Programda oluşturulan radyal akılı motor iki boyutlu model ve oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, oluşacak hata yığılmalarını azaltmak, analizlerdeki bellek kullanımını iyileştirmek ve benzetim sürelerini kısa tutabilmek için motor geometrisinin farklı yerlerinde farklı boyutlarda ve şekillerde, Şekil 3.1 (a)'da gösterilen farklı sonlu elemanlar kullanılmıştır. Düzgün dikdörtgen yapıya sahip sürekli mıknatıslar üzerinde dörtgen elemanlar kullanılırken, motor geometrisinin diğer yerlerinde, değişim miktarıyla orantılı farklı sıklıklarda üçgen sonlu elemanlar kullanılmıştır [33]. Şekil 4.4'te 18450 adet civarında çizgisel ve 20000 adet civarında yüzeysel sonlu eleman kullanılmıştır.



Şekil 4.4 : Radyal akılı FDAM sonlu elemanlara ayrıklaştırılmış modeli.

Şekil 4.4'te görülebildiği gibi motor geometrinin çok değişmediği ve düzgün olduğu stator oluk sonlarından dış çevresine doğru sonlu elemanlar seyrekleşmiş ve boyutları büyümüştür. Stator dış çevresine yaklaştıkça manyetik alan azalmakta ve sınır manyetik alan koşulu sıfır olarak tanımlanarak dış çerçevede çözüm alanı bitmektedir. Bunun yanında hem rotordan hem de statordan hava aralığına yaklaştıkça hem geometri bozulmakta hem de manyetik alan artmaktadır. Dar bir alan olan hava aralığında ise malzemede sınır koşullarının değişmesinden dolayı değişim çok fazla olmaktadır. Stator ve rotor arasındaki hava aralığında, rotorun dönmesiyle birlikte dişler ve oluklardaki süreksizlikten dolayı büyük değişimler oluşmakta ve doğru bir çözüm için hava aralığı bölgesinde daha sık sonlu elemanlar ile birlikte işlemler yapılması gerekmektedir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi hava aralığındaki sonlu eleman boyutları çok küçülmemekte ve sıklaşmaktadır.



Şekil 4.5 : Hava aralığındaki yüksek yoğunluktaki sonlu elemanlar.

Radyal akılı FDAM'ın geometrik şeklinin oluşturulması, malzeme, sargı ve fiziksel tanımlamalarından sonra yapılan sonlu elemanlar ayrıklaştırılması ile birlikte çözüme hazır hale gelmiştir. Bir sonraki kısımda deney sonucuyla karşılaştırılan zıt E.M.K. ve eksenel motor tasarımında kullanılan moment, faz akımları analizleri SEY ile yapılmıştır.

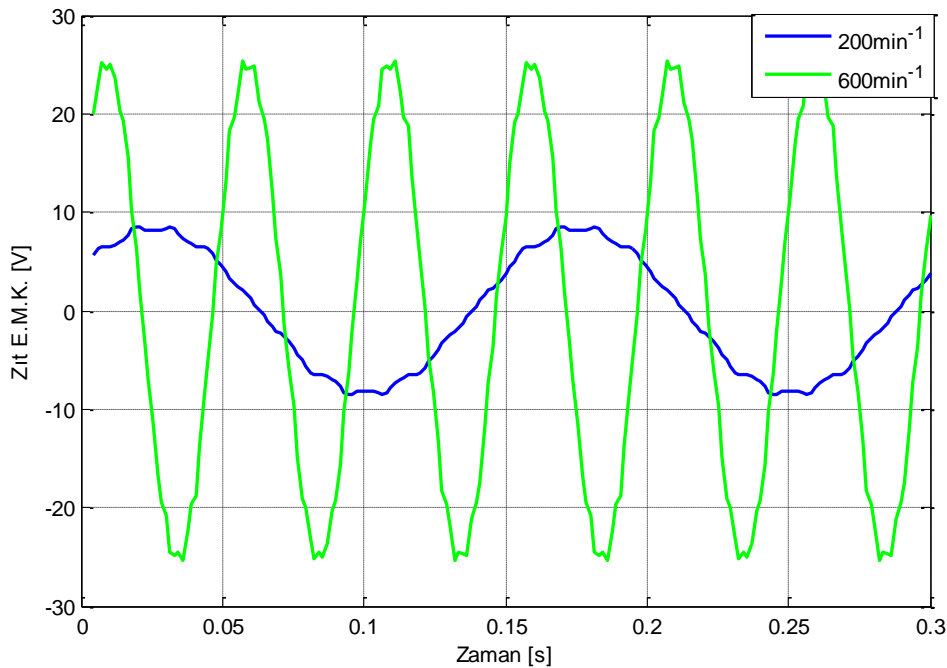
4.3 Radyal Akılı FDAM SEY Analizleri

Radyal akılı motorun SEY analizleri farklı hızlardaki zıt E.M.K. ve motor nominal 1,2 Nm'lik yükü için yapılmıştır. Zıt E.M.K analizlerinden 1000 min⁻¹ için yapılan analiz deney sonucuyla karşılaştırmak, diğer analizler ise nominal hızında sargılarda endüklenen gerilimin bulunması ve hıza bağlı zıt E.M.K. değerlerinin tutarlılığı için yapılmıştır. Nominal yükteki analiz ise eksenel motor tasarımında kullanılacak faz akımlarının ve yük momenti değişiminin incelenmesi için yapılmıştır.

4.3.1 Zıt E.M.K. analizleri

Stator sargıları açık devre iken yani stator sargılarından akım geçmiyor iken, radyal akılı motorun rotoru hareket ettirildiğinde, rotorda bulunan sürekli mıknatısların kalıcı mıknatısiyetlerinden dolayı hava aralığında manyetik akı oluşur, oluşan bu manyetik akı, halkalanma akısına eşittir. Çünkü stator sargılarından akım akmamakta ve dolayısıyla stator tarafından oluşturulan bir manyetik alan bulunmamaktadır. Sürekli mıknatıslar tarafından oluşturulan bu halkalanma akısı bölüm 2’de denklem 2.1 ve 2.3’te belirtildiği gibi mıknatıslar tarafından oluşturulan hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, rotorun döndüğü mekanik hız, sarım sayısı ve eksenel uzunluk ile rotor dış yarıçapına bağlıdır.

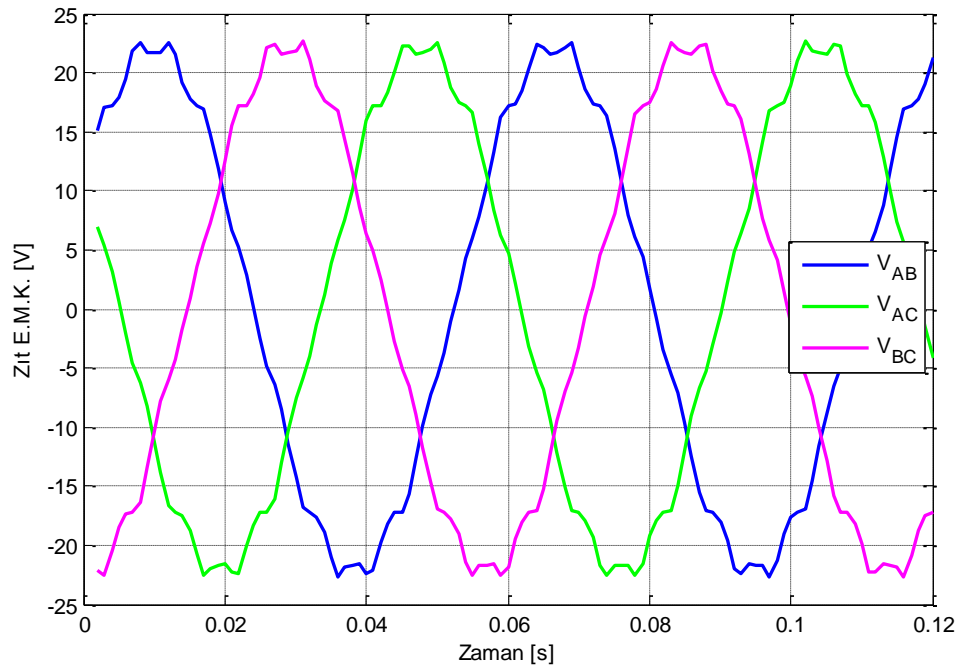
Yapılan ilk analizlerde motor 200 min^{-1} ve 600 min^{-1} hızlarında döndürülerek alınan zıt E.M.K.’lar Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motor fazlarında endüklenen gerilimler artan hızla birlikte artmakta ve artan hızla birlikte denklem 4.1 uyarınca endüklenen gerilimlerin frekansı artmaktadır. Bu denklemde p kutup çifti sayısı, n_m mekanik dönüş hızı, f ise frekanstır.



Şekil 4.6 : 200 min^{-1} ve 600 min^{-1} mekanik hızlarında endüklenen zıt E.M.K.’lar.

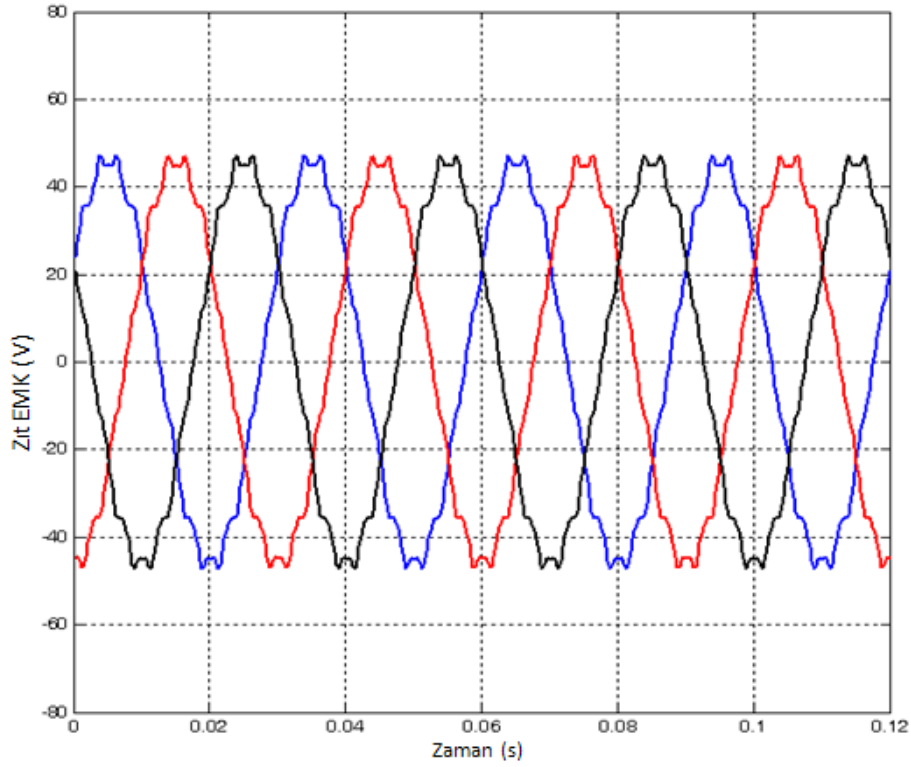
$$f = \frac{pn_m}{60} \quad (4.1)$$

Yapılan diğ er bir analiz ise dönüş hızının nominal çalışma şartlarındaki dönüş hızı olan 530 min^{-1} değeridir. Bu analiz ise eksenel motor tasarımında kullanılmıştır. Endüklenen gerilim dikkate alınarak aynı hızlarda benzer gerilimlerin end uklenerek, statordan benzer akım akıtılması sağlanmıştır. Böylece yeni eksenel akılı motor tasarımında aynı iletken kesitlerinin kullanılarak karşılaştırmanın daha anlamlı olması sağlanmıştır. şekil 4.7’de dönüş hızı 530 min^{-1} ’da stator sargılarında endüklenen gerilim faz-faz arası olarak gösterilmiştir.

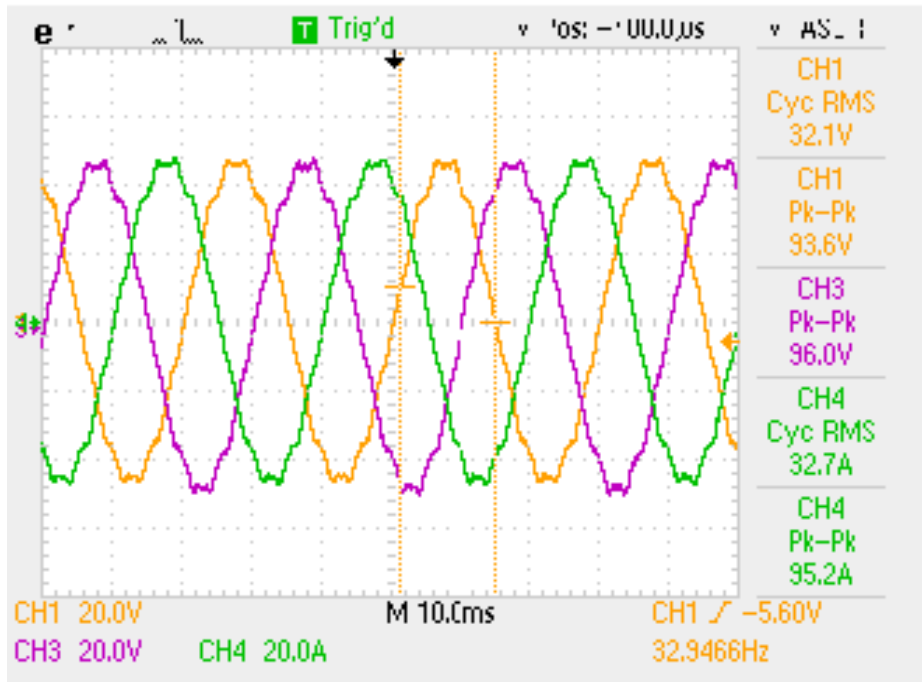


şekil 4.7 : 530 min^{-1} mekanik hızında endüklenen zıt E.M.K.

Diğ er yapılan analiz ise 1000 min^{-1} hızında ve şekil 4.8’de gösterilen analizdir. Bu analiz, motorun üretici firma tarafından yapılan ve şekil 4.9’da gösterilen test sonucu ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.8 : 1000 min^{-1} hızında SEY analizi sonucu oluşan zıt E.M.K.



Şekil 4.9 : 1000 min^{-1} hızında yapılan test sonucu zıt E.M.K.

Şekil 4.8 ile Şekil 4.9 yapılan SEY analizlerinin tutarlılığını göstermektedir. Tepeden tepeye fazlarda endüklenen gerilimlerin karşılaştırılması Çizelge 4.3'de

gösterilmiştir. SEY analizi ve deney sonucu arasındaki fark %2,23'lük bir hata ile yüksek benzerlik göstermektedir.

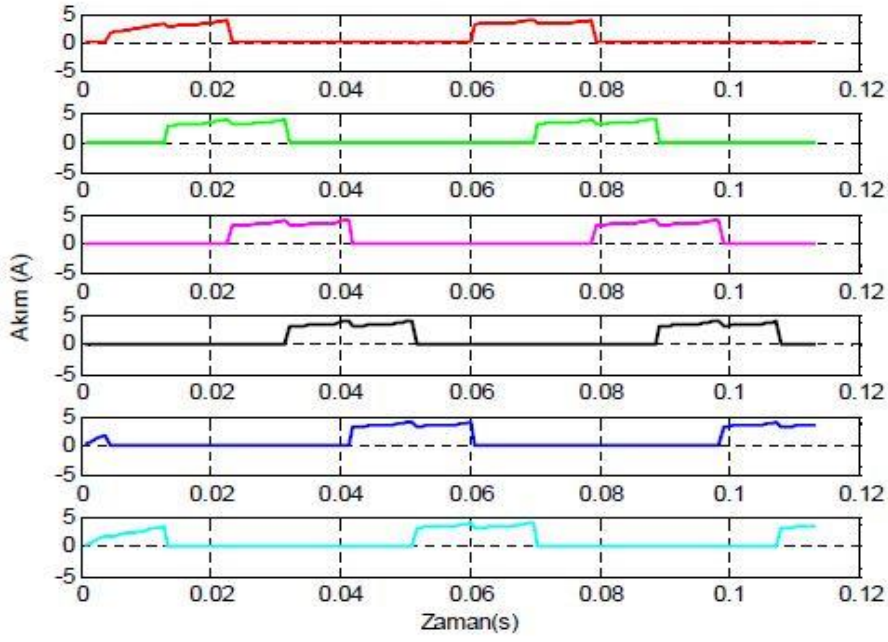
Çizelge 4.3 : 1000 min⁻¹ hızında deney ve SEY sonucunun karşılaştırılması.

	Zıt E.M.K. [V_{t-t}]	Bağıl Hata [%]
Deney Sonucu	96	2,23
SEY Sonucu	93,86	

4.3.2 Nominal yükte analizler

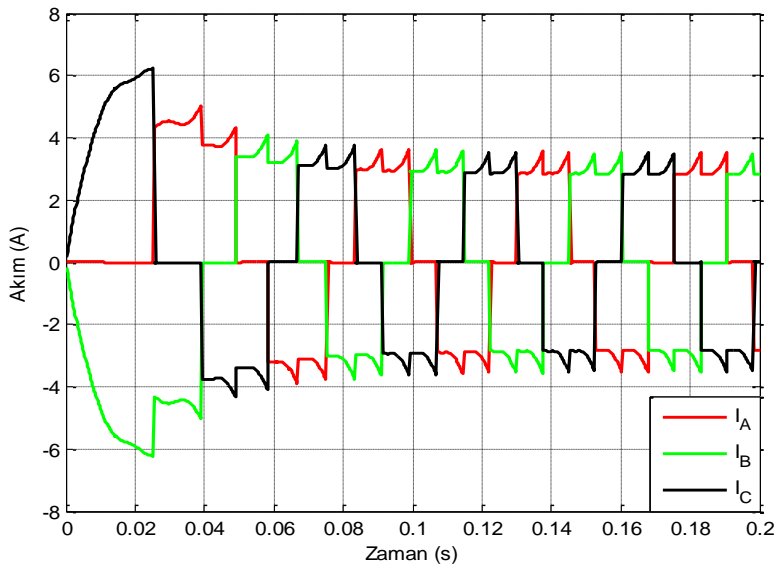
Radyal akıllı motor 1,2 Nm'lik nominal yükünde yüklenerek, analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analiz sonucunda motorun fazlarından akan akım ile birlikte motor çıkış momentinin nominal plaka değerleri ile uyumluluk gösterip göstermediği sınınanarak SEY analizlerinin tutarlılığı ölçülmüştür.

Yükte analizde bölüm 2.2.2'de anlatıldığı gibi rotor tarafından oluşturulan manyetik alan ile stator sargıları tarafından oluşturulan manyetik alanın kenetlenip moment üretebilmesi için stator sargılarının uygun bir şekilde anahtarlanması gerekmektedir. Bölüm 2.2.2'de verilen zıt E.M.K. şekilleri ile anahtarlama açıları ideal durum için geçerlidir. Yani endüklenen gerilim Şekil 4.7'de gösterildiği gibi ideal yamuk biçimli şekil ile birebir aynı olmamakta ve endüklenen gerilimin yaklaşık sabit kalmaya başladığı aralıklar değişmektedir. Dolayısıyla bu aralıklarda anahtarlama yapıp kare dalga akım ile sargıların beslenmesi için gerekli açılar değişmektedir. Fakat ideal durum ile aynı olacak şekilde anahtarların açık kalma dereceleri ve komütasyon dereceleri aynı olmakta ve elektriksel olarak 120° ve 60° değerlerini almaktadır. Motorun uygun anahtarlama ile sürülebilmesi için kullanılan sürücü devre Şekil 2.3'de gösterilen devredir. Şekil 4.10'da stator uygun sargılarının anahtarlanmasını sağlayacak şekilde sürülen anahtarların akımları gösterilmektedir. Şekilden görülebildiği gibi elektriksel olarak 120° anahtarlar açık kalmakta ve 60°'de bir komütasyon gerçekleşmektedir.



Şekil 4.10 : Sırasıyla T1, T2, T3, T4, T5 ve T6 transistörlerine ait sürücü devre anahtar akımları.

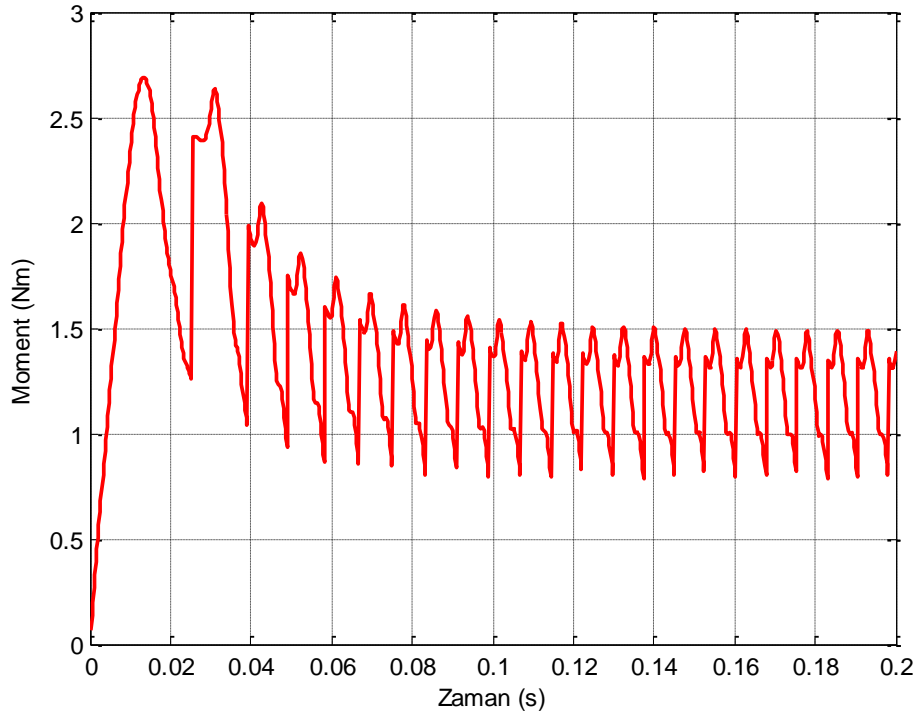
Uygun anahtarlama sonucu stator sargılarından akan akımlar Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde görülmektedir ki motor başlangıç-yol alma aşamasında yüksek akım çekmekte ve 0,08s sonrasında sürekli hal durumuna gelmektedir. Motor faz akımları incelendiğinde görülmektedir ki, 2,4A etkin değerinde bir akım akmaktadır. Bu sonuç, Çizelge 4.1’de verilen motor nominal faz akım değeri ile uyum içerisinde.



Şekil 4.11 : Stator faz akımları.

Yükte yapılan SEY analizi sonucu motor milinden alınan moment Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Elde edilen mil momenti ortalama değeri 1,26 Nm olmaktadır ve Çizelge 4.1 motor plaka değerlerinde gösterilen değer ile uyum içerisinde. Motor mil momenti Şekil 4.12’de görülebildiği üzere büyük dalgalılığa sahiptir, bu özellik ise FDAM’larının dezavantajı olan mil momentindeki titreşim özelliğini ortaya koymaktadır. FDAM mil momentini, faydalı moment ve titreşim momenti oluşturmaktadır. Şekil 4.12’deki dalgalı yapıya titreşim momenti sebep olmaktadır. Motorda meydana gelen bu titreşim momenti, çıkış mil momentinin ortalama değerini düşürmektedir. FDAM’da meydana gelen titreşim momentinin sebepleri ise; motorda kullanılan sürekli mıknatıslar sebebiyle oluşan vuruş momenti, stator faz sargılarının yerleşiminden kaynaklanan sargı uzay harmoniklerinin oluşturduğu harmonik momentler ve sürücü devre akım harmoniklerinden oluşan momentlerdir [33,34].

Yapılan SEY analiz sonucu ile motorun plaka değerinin karşılaştırılması sonucu elde edilen bağıl hata %5 olmakta Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

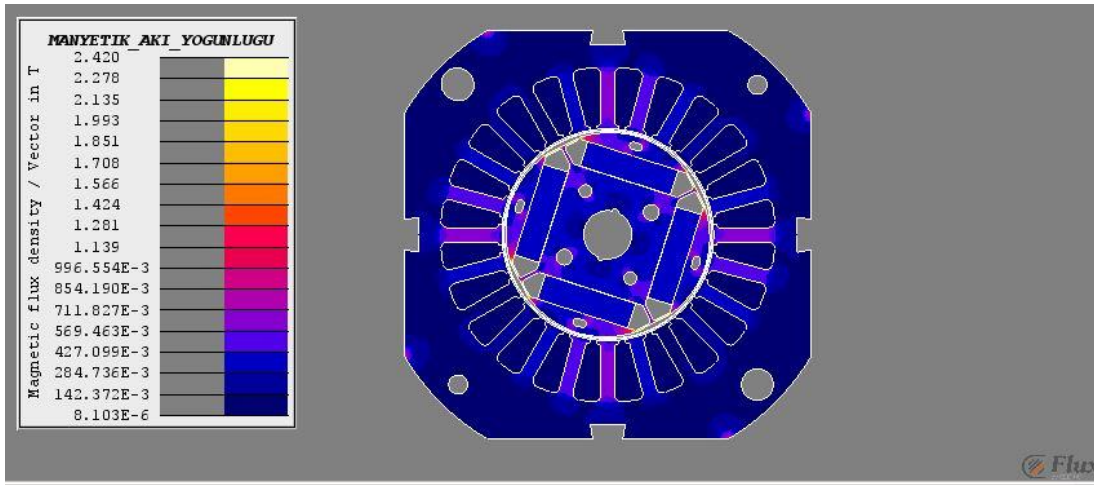


Şekil 4.12 : SEY analizi sonucu motor milinden elde edilen moment.

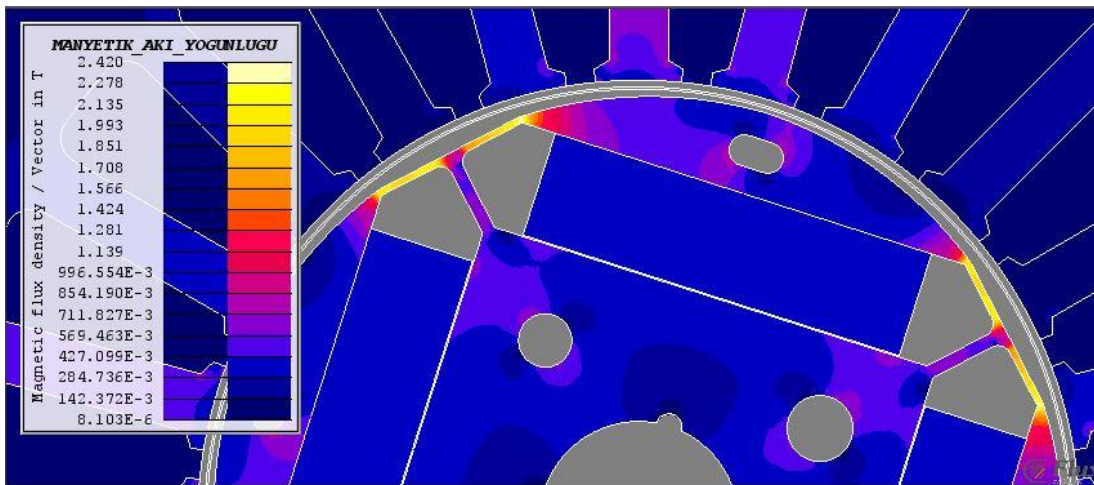
Çizelge 4.4 : Motor mil momentinin karşılaştırılması.

	Moment [Nm]	Bağıl Hata [%]
Nominal Moment Değeri	1,2	5
SEY Sonucu	1,26	

Radyal akılı motor nominal yüküyle yüklüken motorun ferromanyetik malzemesinde oluşan manyetik akı yoğunluğu Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Ferromanyetik malzemenin Şekil 4.3’te verilen karakteristiğine göre malzemenin doyma bölgesi 2T civarlarında başlamaktadır. Şekil 4.13’de rotor ve stator genelinde bu sınıra ulaşılmamaktadır. Ancak Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 birlikte incelendiğinde, rotorda bulunan mıknatıs oluklarının yüzeye yakın oldukları dar bölgede, bu sınırın aşıldığı ve 2,42T akı yoğunluklarına ulaştığı görülmektedir. Bölgenin çok dar olması ve mıknatısların akı çizgilerinin yoğunlaşmasından dolayı bu bölgede ferromanyetik malzemede doymalar meydana gelmektedir. Ancak çok küçük dar bir bölge olmasından dolayı ve genel ferromanyetik malzemede sınırın korunmasından dolayı kabul edilebilir bir durumdur.



Şekil 4.13 : Radyal akılı motorun manyetik akı yoğunluğu tayfi.



Şekil 4.14 : Radyal akılı motorun manyetik akı yoğunluğunun maksimum olduğu bölgeler.

Bu bölümde radyal akılı FDAM'ın boşta ve nominal yükte çalışma durumları için analizleri yapılmıştır. Elde edilen değerler deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu oldukları ortaya konulmuştur. Bu bölümde elde edilen analiz sonuçları ışığında bir sonraki Bölüm 5'te eksenel akılı FDAM analitik tasarımı ve Bölüm 6'da ise SEY analizleri yapılmıştır.

4.4 Radyal Motor Ağırlık, Hacim ve Verim Hesabı

Radyal motorun yapılan SEY analizleri ile birlikte nominal değerlerinin uyumluluğu ortaya konulduktan sonra, eksenel akılı motor ile anlamlı bir karşılaştırma yapılabilmesi için motorun hacim, ağırlık ve verim gibi önem teşkil eden özelliklerinin ortaya konulması gerekmektedir. Radyal motorun Çizelge 4.2'de verilen ağırlık değeri toplam motor ağırlığıdır. Bu değer motor milini ve bazı birleştirme ekipmanlarını da içermektedir. Anlamlı bir karşılaştırma yapabilmek için burada sadece rotor, stator laminasyon malzemesi ağırlığı, mıknatıs ağırlığı ve kullanılan bakır iletken ağırlığı ile ilgilenilmiştir.

Eksenel ve radyal motorda kullanılacak malzemeler aynı olacaktır. Radyal motor için bu malzemelerin ağırlıkları, daha önce oluşturulan SEY motor modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Öncelikle motorda kullanılan malzemelerin hacimleri hesaplanmış daha sonra Çizelge 4.5'te verilen malzeme yoğunluklarıyla çarpılarak malzeme ağırlıkları ve toplam motor ağırlığı bulunmuştur. Daha sonra, Çizelge 4.5'te ayrıca verilen ve değişik kaynaklardan [9,17,35-38] elde edilen kilogram başına malzeme birim fiyatları ile motor maliyeti belirlenmiştir. Malzeme birim fiyatları, kaynaklarda bulunan değerlerden ortalama bir değer çıkartılarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.5 : Eksenel ve radyal akılı motorlarda kullanılan malzeme yoğunlukları ve birim fiyatları.

	Malzeme Yoğunluğu [kg/m ³]	Malzeme Birim Fiyatı [BirimPara/kg]
Ferrit Sürekli Mıknatıs	5000	55,325
Bakır İletken	8960	44,26
Rotor Stator Laminasyon	7800	5,808

Motor geometrisi ve Çizelge 4.5'teki veriler kullanılarak elde edilen malzeme ağırlıkları ve hacmi, toplam motor ağırlığı, hacmi ve maliyeti Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : Radyal akılı motorda kullanılan malzeme ağırlık, hacim ve maliyetleri.

	Ağırlık [kg]	Hacim [cm ³]	Maliyet [BirimPara]
Bakır İletken	0,589	65,74	26,1
Stator Laminasyon	3,31	424,441	19,2
Rotor Laminasyon	0,65	83,941	3,8
Ferrit Mıknatıs	0,24	48	13,3
Motor Toplam	4,79	781,25	62,4

Motor verimi hesaplanabilmesi için kayıpların hesaplanması gerekmektedir. Bu kayıpları ise statorda bulunan bakır iletkenlerde oluşan bakır kayıpları ile rotor ve stator laminasyonlarında oluşan histeresiz kayıplarının ve girdap akımlarının sebep olduğu demir kayıplarıdır. Rotorda bulunan sürekli mıknatıslarda oluşan kayıplar hesaba katılmamıştır. Statordaki bakır kayıpları denklem 4.2 ile hesaplanabilmektedir. Denklem 4.2’de görülen faz akımı Şekil 4.11’de analiz sonucu verilen, ve etkin değeri 2,4A olan stator faz akımıdır. R_s ise stator faz sargılarının direncidir. Bu direnç değeri motor konstrüksiyonundan yararlanarak, denklem 4.3 ile verilen ifade ile hesaplanmıştır. Burada ρ bakır malzemesinin öz direnci [Ωm], l bir faza ait toplam sarım uzunluğu [m] ve S kullanılan iletkenin kesit alanıdır.

$$P_{BAKIR} = 3R_s I_s^2 \quad (4.2)$$

$$R_s = \rho \frac{l}{S} \quad (4.3)$$

Denklem 4.2 ile birlikte stator sargılarında oluşan toplam bakır kaybı ise $P_{BAKIR}=59,1456W$ olarak hesaplanmıştır.

Motorda oluşan, verim hesabında dikkate alınan diğer bir kayıp ise stator ve rotor laminasyonlarında oluşan demir kaybıdır. Literatürde bu kaybın hesabı için çeşitli ampirik formüller bulunmaktadır. Denklem 4.4 bu ampirik formüllerden biridir [19]. Bu ampirik formüldeki $A_1=2,15*10^{-2}$ ve $C_1=6,9*10^{-4}$ değerlerindeki katsayılar, B hesaplanan ferromanyetik bölgenin manyetik akı yoğunluğu [T], f denklem 4.1 ile hesaplanan nominal hızdaki frekans (17,667 Hz), G ise hesap bölgesinin ağırlığıdır [kg].

$$P_{DEMİR} = [(A_1 B^2 f) + (C_1 B^2 f^2)]G \quad (4.4)$$

Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Çizelge 4.6 yardımıyla, stator demir kaybı $P_{\text{DEMİR-STATOR}}=0,5\text{W}$, rotor demir kaybı ise $P_{\text{DEMİR-ROTOR}}=0,2\text{W}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam demir kaybı $P_{\text{DEMİR}}=0,7\text{W}$ olmaktadır.

Hesaplanan kayıp bilgileri ve denklem 4.5 ile radyal akılı motorun toplam verimi $\eta=\%52,67$ olarak hesaplanmıştır.

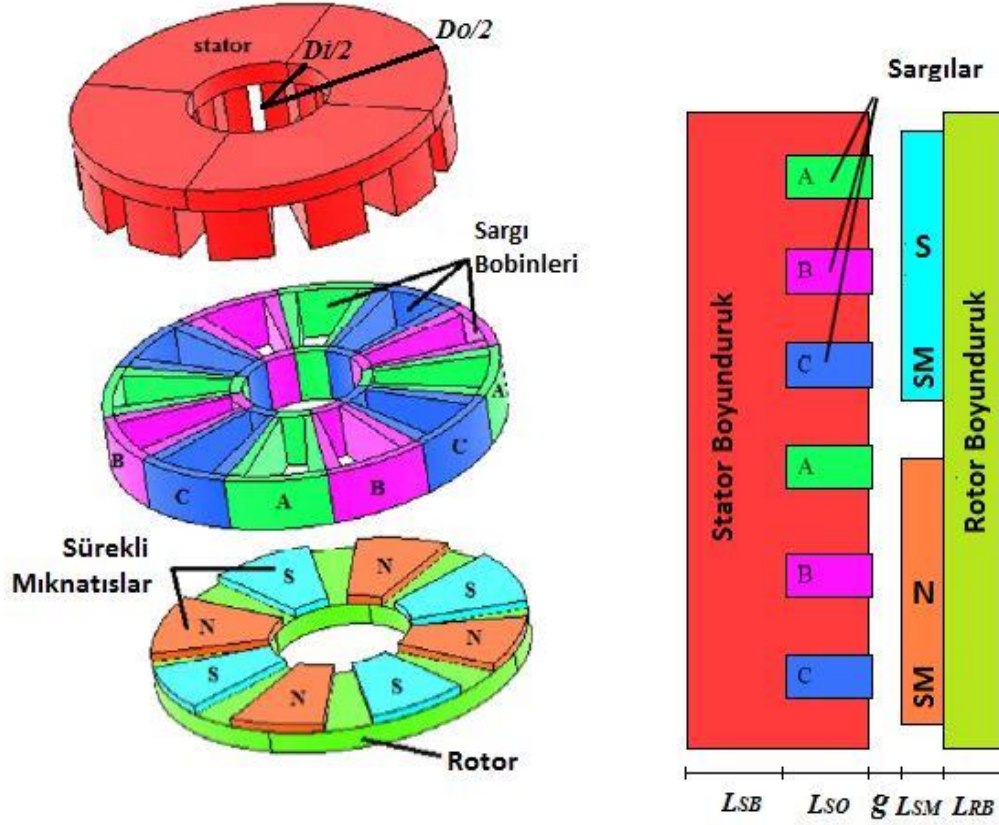
$$\eta = \frac{P_{\text{ÇIKIŞ}}}{P_{\text{ÇIKIŞ}} + P_{\text{DEMİR}} + P_{\text{BAKIR}}} \quad (4.5)$$

5. EKSENEL AKILI FDAM TASARIMI

Bu bölüm; tezin temel konusu olan, çamaşır makinelerinde kullanılabilir eksenel akılı FDAM tasarımını içermektedir. Tasarlanan eksenel akılı motorun güç, moment yoğunluğu fazla, maliyeti ve ağırlığı radyal motora göre daha düşük olması gibi bazı üstün özelliklere sahip olması hedeflenmiştir. Bölüm 2’de anlatıldığı gibi eksenel motorlar tasarımlarında kullanılan rotor ve stator sayılarına göre farklı tiplerde mevcuttur. Yapılan literatür araştırmasından ve çıkarımlardan görülmüştür ki, çamaşır makinesi uygulamaları gibi düşük güçlü uygulamalarda, üretim maliyetlerinin düşüklüğü ve üretilebilirliğinin kolaylığı, gerektirdiği sürekli mıknatıs, bakır iletken ve laminasyon malzemesinin miktarının az olması gibi özelliklerinden dolayı en uygun tasarım tek tabakalı (1rotor-1stator), yüzey mıknatıslı ve oluklu eksenel akılı FDAM’dır. Bu bölümün ilk kısmında, maksimum hacimsel güç yoğunluğunun sağlanması hedefi doğrultusunda, motor temel boyutlarını üreten algoritma kurulmuştur. Daha sonra motorun konstrüksiyon ve elektriksel özellikleri belirlenmiş ve eksenel akılı motoru ön tasarımı tamamlanmıştır. Bölüm 6’da ise eksenel akılı motorun SEY modeli üç boyutlu olarak kurulmuş ve analizler yapılmıştır. Motor performans özelliklerini belirleyen veriler alınarak, analitik analiz sonucu elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve iyileştirmeler yapılmıştır. Bölüm 6’da ayrıca radyal motor ile karşılaştırmada gerekli olan veriler, moment titreşim miktarı, verim gibi değerler hesaplanmış ve bu veriler bölüm 7’de kullanılmıştır.

Eksenel akılı motor tipi olarak, tek tabakalı motor tasarımına karar verildikten sonra, literatürde analitik olarak tasarımı yapılmış eksenel motor denklemleri incelenerek [3-5,7] tek tabakalı eksenel akılı FDAM’ın analitik denklemleri çıkartılmış ve bu denklemler MATLAB® programına aktarılarak bir algoritma kurulmuştur. Kurulan algoritma; farklı kutup sayıları için hacimsel güç yoğunluğunu maksimum yapan iç çap/dış çap oranını belirleyerek, eksenel motor için en iyi boyutları ortaya koymaktadır. Algoritmada bazı parametreler malzeme bilgisi içermektedir, dolayısıyla kullanılacak malzeme belirlenip, özelliklerinin bu formülasyona aktarılması gerekmektedir. Bölüm 4.1’de anlatıldığı gibi, eksenel akılı motor tasarımında kullanılan malzemeler radyal motorda kullanılan malzemeler ile aynıdır.

Malzemelerin aynı olarak alınması; tasarım sonucu, radyal ve eksenel akılı motor karşılaştırmalarının mantıklı bir şekilde, malzeme özellikleri eşit alınarak, eşit şartlarda, birbirlerine göre üstünlüklerinin düzgün bir şekilde belirlenebilmesi adına önemlidir. Şekil 5.1’de tasarımı yapılan; tek tabakalı, yüzey mıknatıslı, oluklu, eksenel akılı FDAM üzerinde geometrik uzunluklarıyla birlikte gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Eksenel akılı FDAM temel ölçülerini gösteren modeli [39].

Şekil 5.1’de gösterilen temel boyutları, kurulan algoritma hesaplamakta ve güç yoğunluğunu maksimum yapan en iyi iç çap/dış çap oranına göre çıktı olarak vermektedir. Kurulan algoritmanın bir kısmı denklem 5.1’den 5.16’ya kadar olan denklemleri içermektedir [3-5,7]. Bu denklemlerde bulunan, P_C çıkış gücünü [W], T çıkış momentini [Nm], n çıkış mekanik hızını [min^{-1}], D_o eksenel motorun dış çapını [m], p çift kutup sayısını, K_e zıt E.M.K. faktörünü [V/s], K_i akım katsayısını, K_p güç katsayısını, η verimi, A_s stator çizgisel akım yoğunluğunu [A/m], λ iç çapın dış çapa oranını ($\lambda=D_i/D_o$), D_i iç çapı [m], D_g ortalama hava aralığı çapını [m], L_{cu} statora radyal olarak sarılan bakır iletkenlerin stator laminasyonlarından çıkıntı yaptığı radyal uzunluğu [m], B_g hava aralığı akı yoğunluğunu [T], B_u mıknatıs yüzeyinden elde edilebilir akı yoğunluğunu [T], K_f hava aralığının, mıknatıs yüzeyinden elde

edilebilir akı yoğunluğuna oranını, K_d kaçık akı faktörünü, L_{SM} rotor yüzeyindeki mıknatısın eksenel kalınlığını [m], B_r sürekli mıknatısın kalıcı mıknatısıyetini [T], L_{RB} rotor boyunduruğunun uzunluğunu [m], B_{RB} rotor boyunduruk manyetik akı yoğunluğunu [T], L_R rotorun toplam eksenel uzunluğunu [m], L_{SB} stator boyunduruğunun uzunluğunu [m], B_{SB} stator boyunduruk manyetik akı yoğunluğunu [T], L_{SO} stator oluklarının eksenel uzunluğunu (derinliği) [m], J_s akım yoğunluğunu [A/m^2], K_{cu} stator oluklarının doluluk faktörünü, L_s statorun toplam eksenel uzunluğunu [m], $L_{ETKİN}$ motor etkin eksenel uzunluğunu [m], $D_{ETKİN}$ motorun etkin radyal uzunluğunu (çapını) [m], N_{faz} faz başına sarım sayısını, I_{RMS} fazlardan akacak akımın değerini, ifade etmektedirler.

$$P_{\zeta} = T \frac{2\pi n}{60} \quad (5.1)$$

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{4pP_{\zeta}}{\pi K_e K_i K_p \eta B_g A_s \frac{pn}{60} (1 - \lambda^2)(1 + \lambda)}} \quad (5.2)$$

$$D_i = \lambda D_o \quad (5.3)$$

$$D_g = \frac{D_o(1 + \lambda)}{2} \quad (5.4)$$

$$L_{cu} = \frac{\pi D_o \lambda}{8p} \quad (5.5)$$

$$K_f = \frac{B_g}{B_u} \quad (5.6)$$

$$K_d = 1 - \frac{p}{30} \quad (5.7)$$

$$L_{SM} = \frac{\mu_r B_g g}{(B_r - B_g)} \frac{K_f}{K_d} \quad (5.8)$$

$$L_{RB} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{RB} 8p} \quad (5.9)$$

$$L_R = L_{SM} + L_{RB} \quad (5.10)$$

$$L_{SB} = \frac{B_u \pi D_o K_f (1 + \lambda)}{B_{SB} 8p} \quad (5.11)$$

$$L_{SO} = \frac{A(1 + \lambda)}{J_S K_{cu} \lambda} \quad (5.12)$$

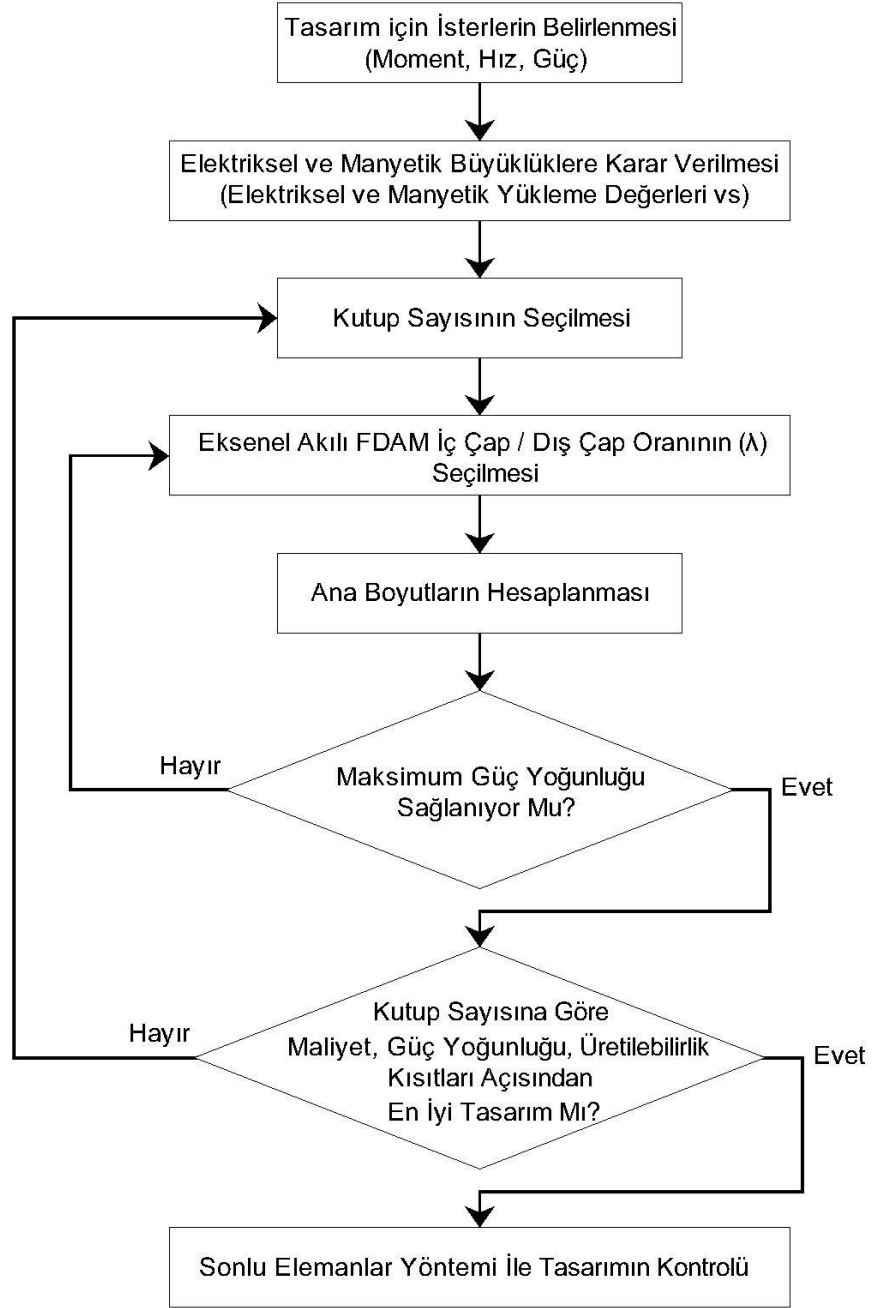
$$L_S = L_{SO} + L_{SB} \quad (5.13)$$

$$L_{ETKİN} = L_S + L_R + g \quad (5.14)$$

$$D_{ETKİN} = D_o + 2L_{cu} \quad (5.15)$$

$$N_{faz} = \frac{A_S \pi D_g}{2m I_{RMS}} \quad (5.16)$$

Tasarıma literatürdeki [3-5,7] çalışmalardan elde edilen katsayı değerleri ile, radyal makinede kullanılan malzeme özellikleri, faz akımı değeri, elektriksel yüklenme değeri ve bazı kabuller yapılarak başlanmıştır. Kurulan tasarım algoritmasının akış diyagramı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. MATLAB® programında kurulan ve denklem 5.1’den 5.20’a kadar olan algoritma kutup sayısının 2, 4, 6, 8, 10, 12 değerleri için ayrı ayrı hesap yapmakta ve iç çap/dış çap oranını değiştirerek hacimsel güç yoğunluğunu maksimum yapan en iyi λ değerini her bir kutup sayısı için hesaplamaktadır. Böylece farklı kutup sayıları için güç yoğunluğuna göre eniyilemesi yapılmış farklı motor tasarımları oluşturabilmektedir. Güç yoğunluğu hesaplanırken görüldüğü gibi güç yoğunluğunun bağlı olduğu tek parametre etkin hacim üzerinden λ ’dır. Motor çıkışından elde edilmek istenen güç, radyal motorun nominal verileri, nominal moment 1,2 Nm ve nominal hız 530 min⁻¹ göz önünde tutularak denklem 5.1 ile hesaplanmakta ve sabit tutulmaktadır.

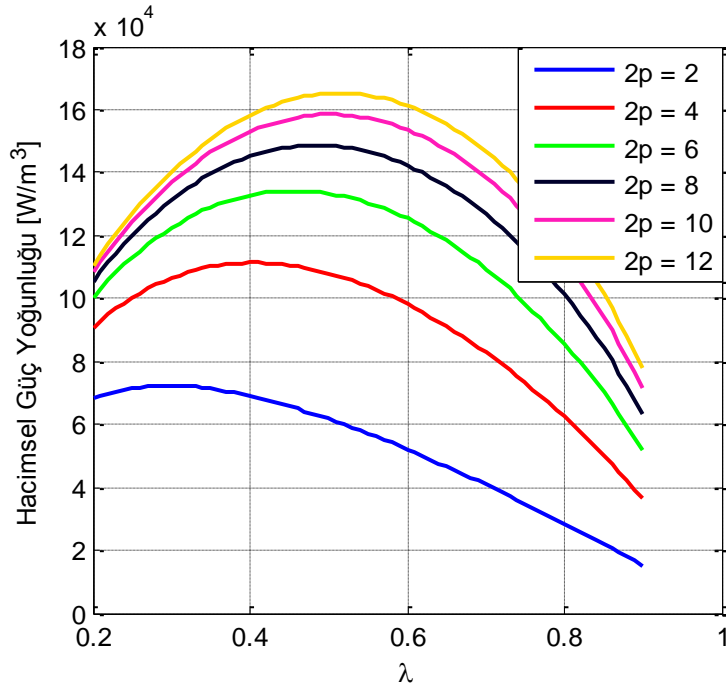


Şekil 5.2 : Kurulan tasarım algoritması akış diyagramı.

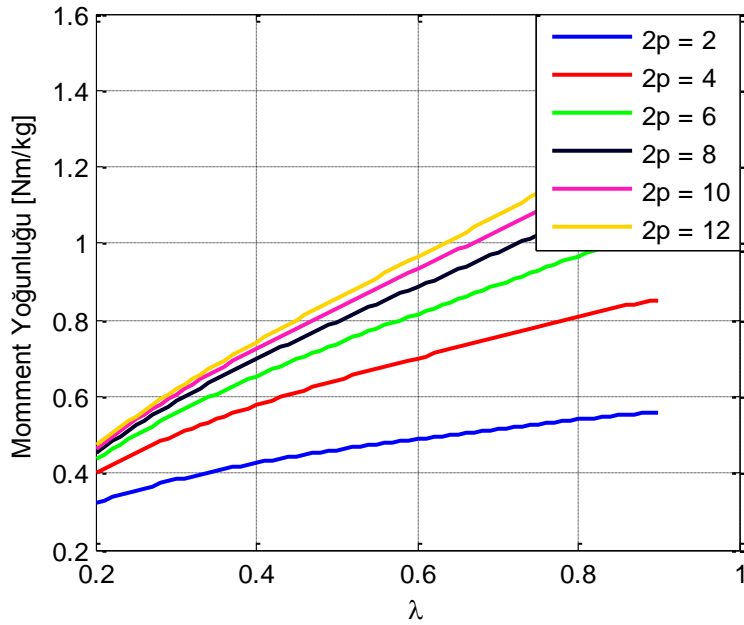
Kurulan algoritma ayrıca hacim hesabı yaparak daha sonra eklenen malzeme yoğunluklarıyla birlikte her bir motor bölgesi için ağırlık hesabı yapmakta ve daha sonra değişik kaynaklardan alınan ve Çizelge 4.5 ile verilen malzeme kilogram başına ortalama maliyet (birimpara) ile çarpılarak toplam motor maliyeti hesaplatılmaktadır.

1,2 Nm moment ve 530 min^{-1} için kurulan algoritma ile farklı kutup sayıları için analitik analizler yapıldığında λ 'ya bağlı oluşan hacimsel güç yoğunluğu, moment

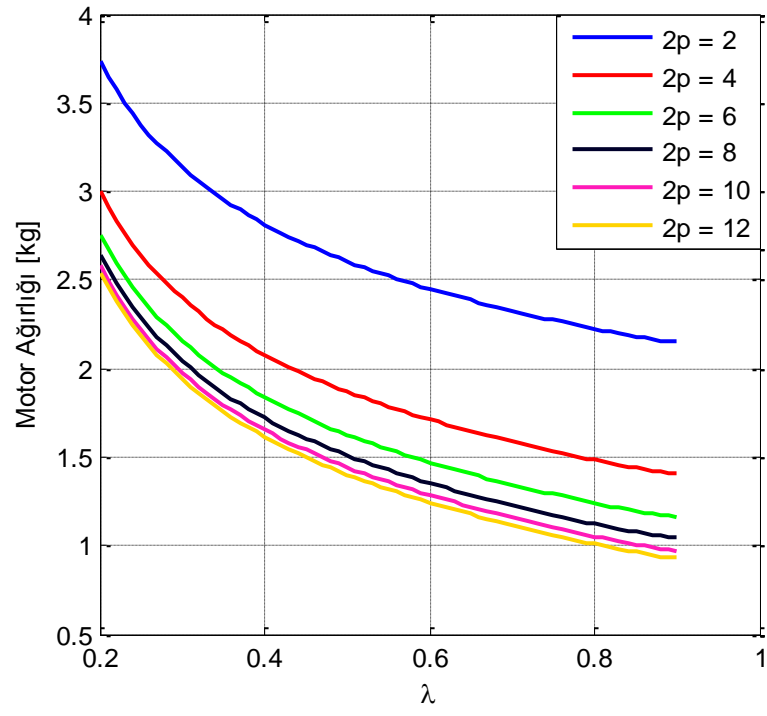
yoğunluğu, motor ağırlığı, motor hacmi ve motor ağırlıkları sırasıyla Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’te gösterilmiştir.



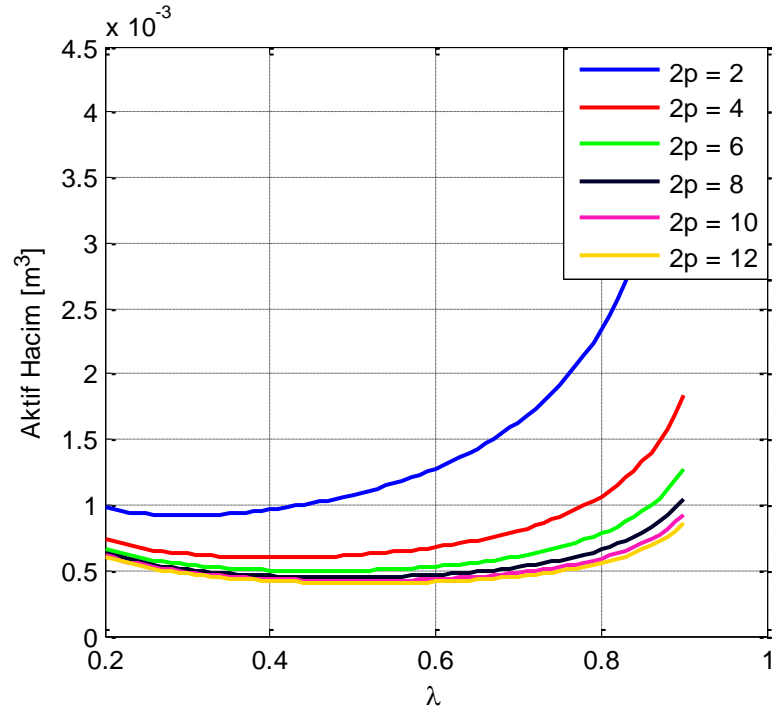
Şekil 5.3 : Farklı kutup sayıları için λ 'ya bağlı hacimsel güç yoğunluğu değişimi.



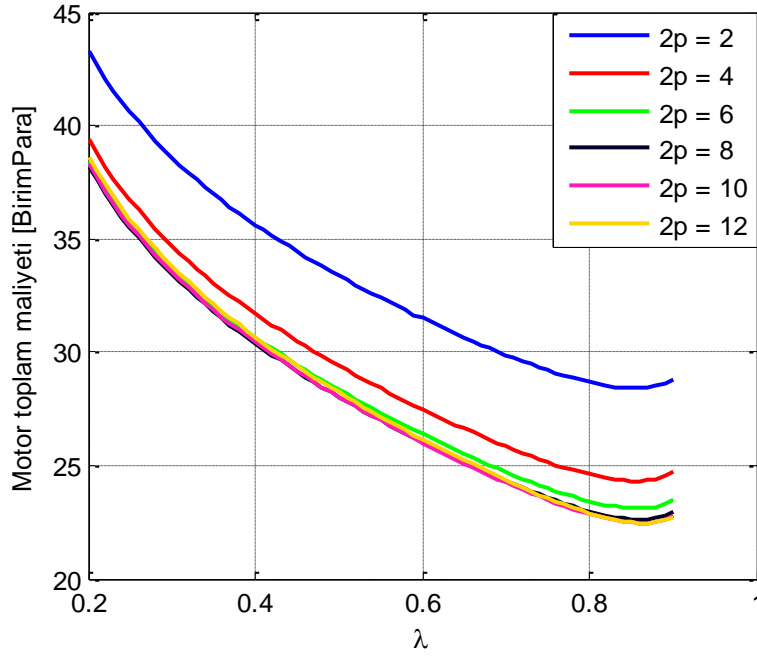
Şekil 5.4 : Farklı kutup sayıları için λ 'ya bağlı moment yoğunluğu değişimi.



Şekil 5.5 : Farklı kutup sayıları için λ 'ya bağlı motor ağırlığı değişimi.



Şekil 5.6 : Farklı kutup sayıları için λ 'ya bağlı motor aktif hacim değişimi.



Şekil 5.7 : Farklı kutup sayıları için λ 'ya bağlı motor toplam maliyeti değişimi.

Şekil 5.3'den Şekil 5.7'ye kadar olan eğrilerdeki her bir nokta farklı bir eksenel akıllı motor tasarımını ifade etmektedir. Farklı kutup sayıları için, güç yoğunluğunu maksimum yapacak şekilde $\lambda_{EN-İYİ}$ değeri seçildikten sonra oluşan motor tasarımlarının güç yoğunluğu, moment yoğunluğu, ağırlık, hacim ve maliyet gibi özellikleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Farklı kutup sayılarında algoritma sonucu oluşan tasarımların özellikleri.

	Güç Yoğunluğu [kW/m ³]	Moment Yoğunluğu [Nm/kg]	Hacim [cm ³]	Ağırlık [kg]	Maliyet [BirimPara]	En İyi Lamda [$\lambda=D_i/D_o$]
2p=2	72,274	0,3828	921,52	3,14	38,6	0,3
2p=4	111,309	0,577	598,35	2,08	31,7	0,4
2p=6	134,164	0,705	496,42	1,7	29,2	0,46
2p=8	148,702	0,776	447,89	1,55	28,5	0,48
2p=10	158,451	0,832	420,33	1,44	28,04	0,5
2p=12	165,161	0,867	403,25	1,38	28	0,51

Kutup sayısının 8 değerinden sonra motor toplam maliyetinde hatırı sayılır bir değişiklik olmadığı Çizelge 5.1 incelendiğinde açıkça görülmektedir. Nominal çalışma koşulları için tasarlanan ve analiz edilen motorun üretilebilirliği göz önünde bulundurulduğunda, nominal çalışma noktasından sonra sıkma aşamasında motorda yüksek devir hızlarına çıkılacaktır (15000 min⁻¹). Yüksek devir hızlarına çıkılırken

yüksek anahtarlama frekansları gerekmektedir ve bu anahtarlama frekansı denklem 4.1 göz önünde bulundurulduğunda kutup sayısı ile artmaktadır. Artan anahtarlama frekansı beraberinde anahtarlama kayıplarını, zaman harmoniklerinin etkilerini, kullanılacak anahtarlama ekipmalarının fiyatını arttıracaktır. Tüm bu üretilebilirlik ve performans boyutları düşünüldüğünde en iyi kutup sayısı olarak 8 seçilmiştir.

Kutup sayısı seçiminden sonra, uygun stator oluk sayısı seçimi gerekmektedir. Hava aralığı uzay harmoniklerini ve vuruğu momenti etkileşimini düşünülmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan ayrıntılı çalışma göstermektedir ki, küçük güçlerde en uygun tasarım 12 oluk ve 8 kutuplu tasarımdır [6]. Bu oluk kutup kombinasyonu, fırçasız sürekli mıknatıslı motorlar için yazılmış yayınlardan [23] kaynağındaki, minimum vuruğu momenti ve uygun oluk kutup seçimi tablolarına uymaktadır.

Ayrıca 12 oluk 8 kutup sayısına sahip motor konstrüksiyonu çeyrek motor simetresine uymaktadır, bu açıdan da uygun bir tasarımdır. Çünkü eksenel akıllı motorların üç boyutlu SEY analizi yapılacağından çok fazla sayıda sonlu eleman bulunmaktadır ve bu fazla sayı benzetim süresini çok fazla arttırmaktadır. Motor simetrisinden yararlanıldığı durumlarda tam motor modeli yerine çeyrek motor modeli kullanıldığında hesaba katılacak sonlu elemanların sayısı da azalacağından hesaplama süresi de azalacaktır. Seçilen 12 oluk sayısı ve 8 kutup sayısı, çeyrek modelde 3 oluk ve 2 kutup bulunacak şekilde simetri sağlamaktadır.

Seçilen kutup sayısı ile birlikte sargı tasarımı düşünüldüğünde faz/kutup başına düşen oluk sayısı 0,5 olup kesirli olmaktadır. Kare dalga akım ile beslenen motorlarda konsantrik sargı kullanılmaktadır. Yapılan eksenel akıllı FDAM'da kullanılan sargı kesirli oluklu konsantrik çift tabakalı sargıdır. Tasarımda kullanılan mıknatıs şekli iç ve dış yarıçap boyunca ve Şekil 5.1'de gösterildiği gibidir.

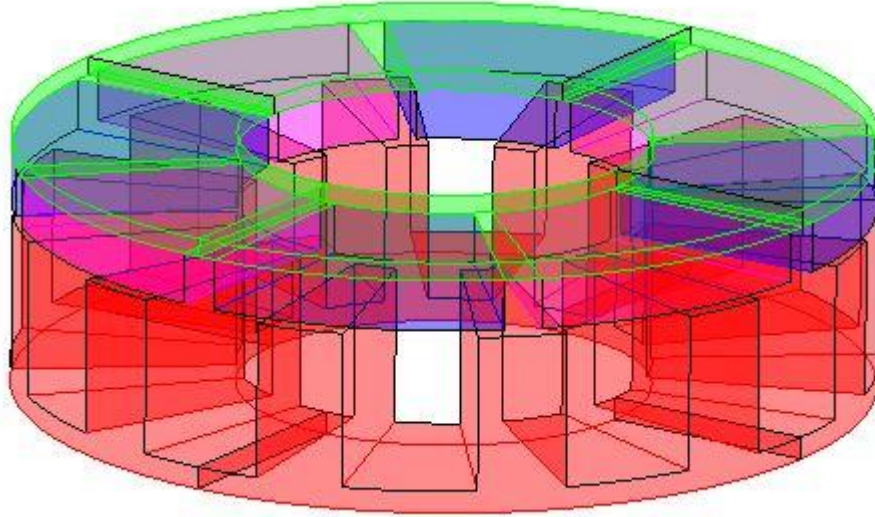
Seçilen kutup sayısından sonra maksimum güç yoğunluğu için $\lambda_{EN-|Y|}=0,48$ ile tasarlanan eksenel akıllı FDAM özellikleri Çizelge 5.2'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : Radyal akıllı FDAM yerine tasarlanan eksenel akıllı FDAM ön tasarım özellikleri.

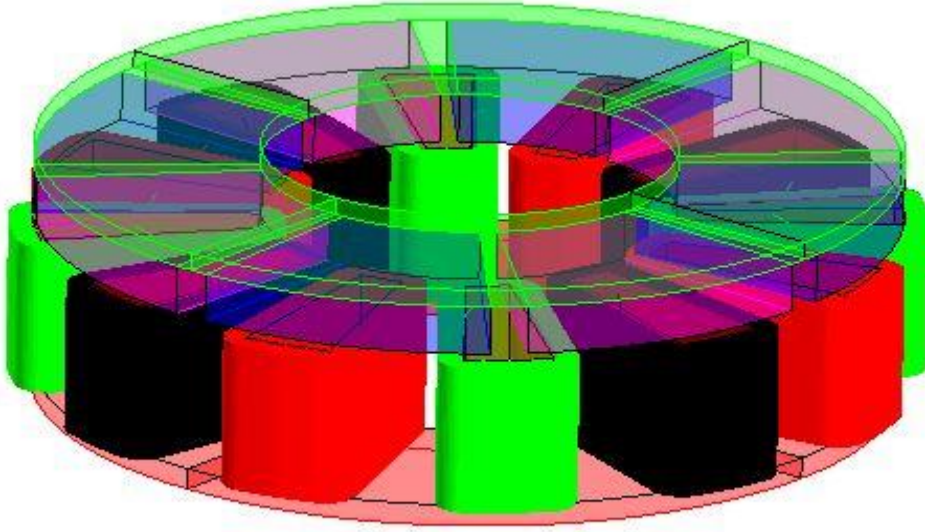
Motor Özellikleri	
Zıt E.M.K. Tepe Değeri	15,7475 V
Faz Akımı Değeri	2,4 A
$\lambda_{EN-İYİ}$	0,48
Stator Faz Sarım Sayısı	344
Stator Oluk Sayısı	12
Kutup Sayısı	2p=8
Faz Sayısı	3 Faz
Kullanılan İletken Tipi	Yuvarlak İletken
İletken Çapı	0,65 mm
Akım Yoğunluğu	7,233 A/mm ²

6. EKSENEL AKILI FDAM ANALİZLERİ

Çizelge 5.2 ile verilen motor özellikleri ile birlikte SEY paket programı olan Flux programında üç boyutlu olarak oluşturulan motor modeli Şekil 6.1’de tam model olarak gösterilmiştir. Analizlerde kullanılan model ise 3 oluk, 2 kutup içeren çeyrek model olacaktır. Şekil 6.1’de tasarlanan motorun geometrinin düzgün bir şekilde görülebilmesi için sargılar gösterilmemiştir. Sargıları içeren eksenel akılı FDAM modeli Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi, motorda kullanılan sargı tipi konsantrik sargıdır.

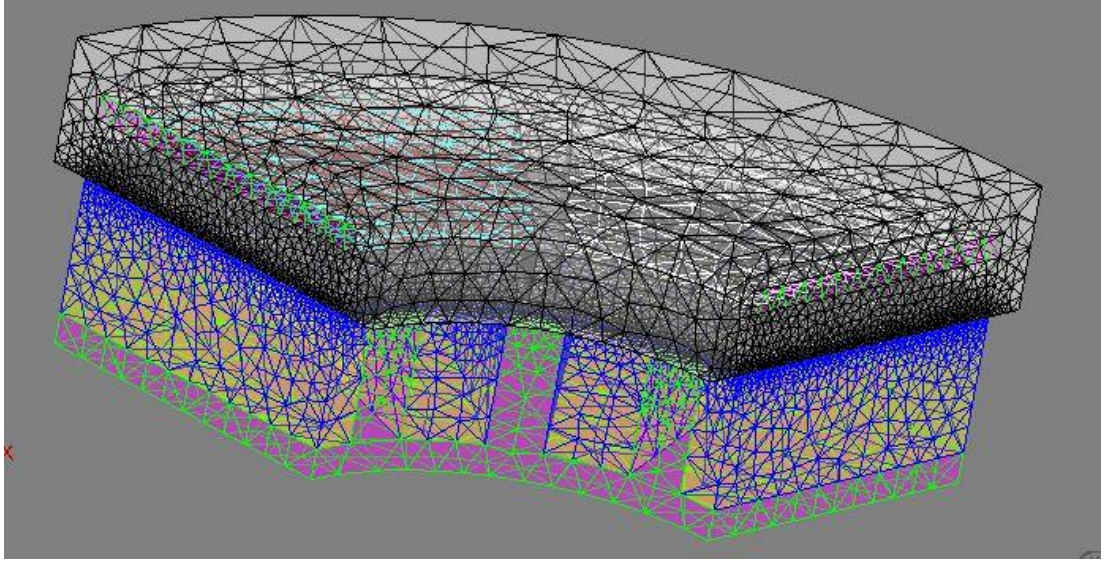


Şekil 6.1 : Tasarımı yapılan eksenel akılı FDAM üç boyutlu modeli.



Şekil 6.2 : Konsantrik sargıların yerleştirilmesi ile oluşan üç boyutlu eksenel akılı FDAM modeli.

Model kurulduktan, sargılar modele yerleştirildikten sonra, malzeme tanımlamaları radyal akılı motordakiler ile aynı olacak şekilde yapılmış ve gerekli elektriksel devre modelleri tanımlanmıştır. Bu aşamadan sonra, SEY analizine geçmeden önce çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrıştırılması, ağ yapısının elde edilmesi gerekmektedir. Üç boyutlu ağ yapısı oluşturulurken kullanılan sonlu elemanlar bölüm 3’te bahsedilen ve Şekil 3.1 (c)’de gösterilen geometrik elemanlardır. Şekil 3.1 (c)’in ilk elemanı olan üçgen prizma kullanılarak üç boyutlu oluşturulan eksenel akılı FDAM sonlu elemanlara ayrılıp ağ yapısı elde edilmiştir. Sistem çözümünde kullanılacak model motorun çeyrek modeli olduğundan, ağ yapısı çeyrek model üzerinde oluşturulmuştur. Elde edilen ağ yapılı üç boyutlu çeyrek dilim eksenel akılı FDAM modeli Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : Ağ yapısı ile birlikte eksenel akılı FDAM çeyrek dilim modeli.

6.1 Eksenel Akılı FDAM SEY Analizleri

Ağ yapısı elde edildikten sonraki aşama motorun SEY analizi aşamasıdır. Eksenel akılı motorun iki farklı analizi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki motorun nominal 530 min^{-1} hızında çalıştırılarak stator sargılarında endüklenen zıt E.M.K. değerinin elde edilmesidir. İkincisi ise, nominal yükünde yüklenerek nominal çalışma koşullarındaki ($1,2 \text{ Nm}$, 530 min^{-1}) performansının analiz edilmesidir.

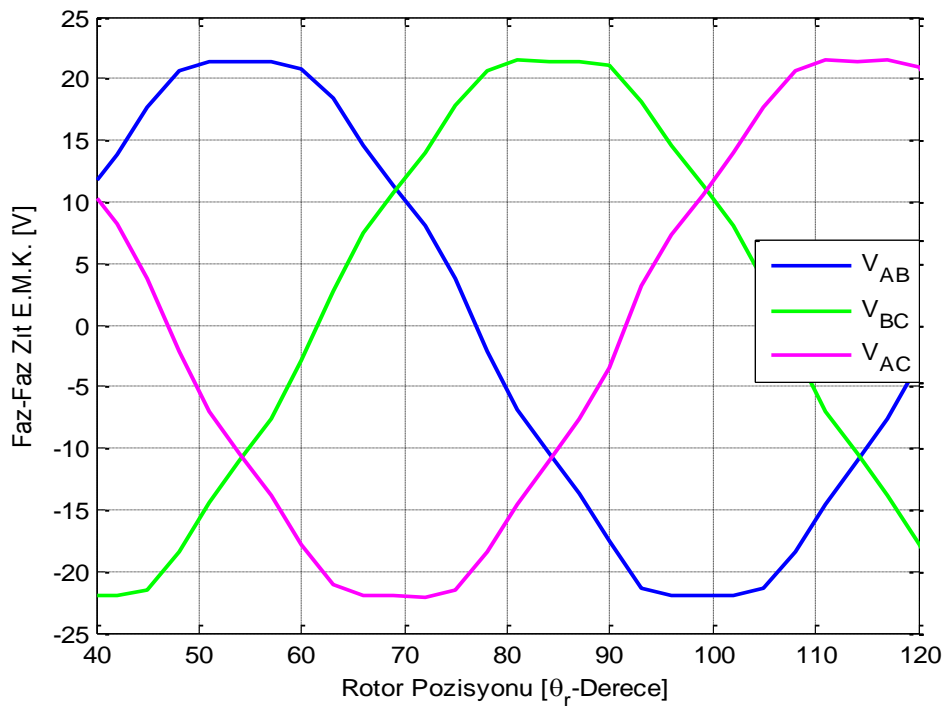
6.1.1 Zıt E.M.K. analizi

Zıt E.M.K., stator sargılarından akım akıyorken motorun döndürülmesi ile, mıknatıslar tarafından oluşturulan akı halkalanmasının stator sargıları ile etkişime girerek, Faraday yasası uyarınca, sargıların üzerinde gerilim endükleme prensibine dayanır. Eksenel akılı motordaki analizi ise bölüm 4.3.1’de anlatılan şekilde yapılmıştır. Motor nominal hızında 530 min^{-1} döndürülerek, stator sargılarının faz-nötr ve faz-faz arası gerilim değerlerinin maksimum değerleri okunmuştur. Elde edilen faz-nötr geriliminin tepe değeri, Çizelge 5.2’te verilen analitik tasarım sonucu ile karşılaştırıldığında SEY analiz sonucunu, analitik analiz sonucu ile %5,76’lık bir hata payı ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu karşılaştırma Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 : 530 min⁻¹ hızında zıt E.M.K. analitik sonucu ile SEY sonucunun karşılaştırılması.

	Zıt E.M.K. [V_{Tepe}]	Bağıl Hata [%]
Analitik Sonuç	15,7475	5,76
SEY Sonucu	14,84	

Ayrıca eksenel motorun tasarımına performans özelliklerinin radyal motorunkileri karşılayabilmesi için, elektriksel yüklenme (çizgisel akım yoğunluğu) benzer alınarak başlanmıştır, böylece zıt E.M.K. değerlerinin benzer çıkması beklenmektedir. Şekil 6.4'te eksenel motorun fazlar arası zıt E.M.K.'sı gösterilmiştir.



Şekil 6.4 : Eksenel akılı motorda 530 min⁻¹ hızında endüklenen zıt E.M.K.

Eksenel ve radyal akılı motorların nominal hızlarındaki fazlar arası zıt E.M.K değerinin karşılaştırılması Çizelge 6.2'de verilmiştir ve bu çizelge ile tasarlanan eksenel motorun zıt E.M.K. faz arası geriliminin %4,7'lik bir hata payı ile radyal akılı motorunkine benzer olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

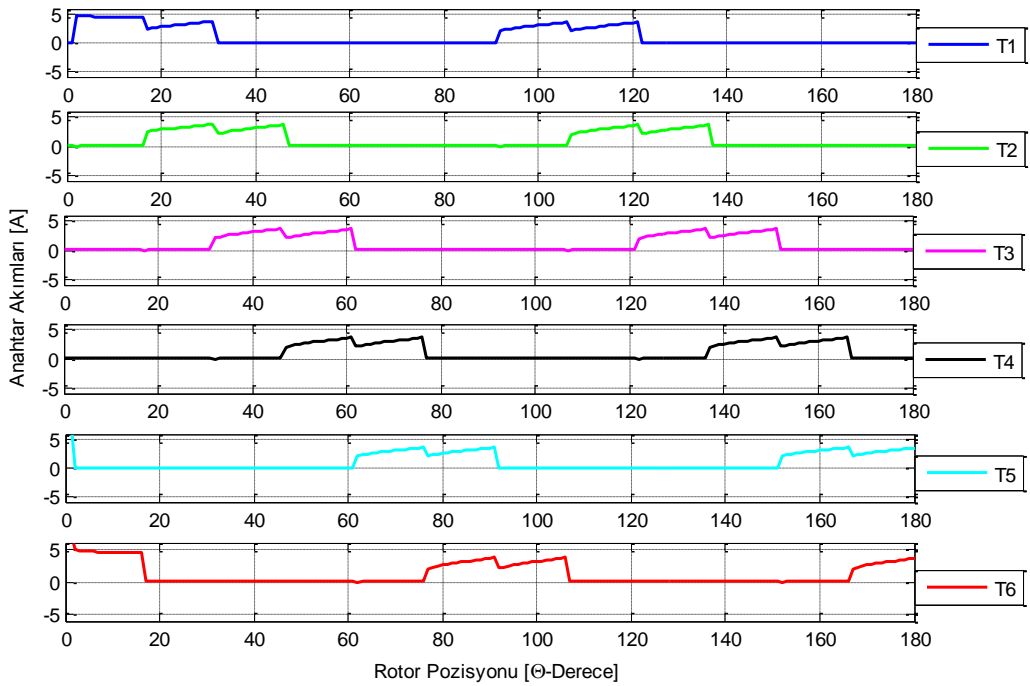
Çizelge 6.2 : 530 min⁻¹ hızında radyal ve eksenel akılı motorların zıt E.M.K. değerlerinin karşılaştırılması.

	Faz-Faz Zıt E.M.K. [V_{Tepe}]	Bağıl Hata [%]
Radyal Motor	22,46	4,7
Eksenel Motor	21,4	

6.1.2 Nominal yük analizi

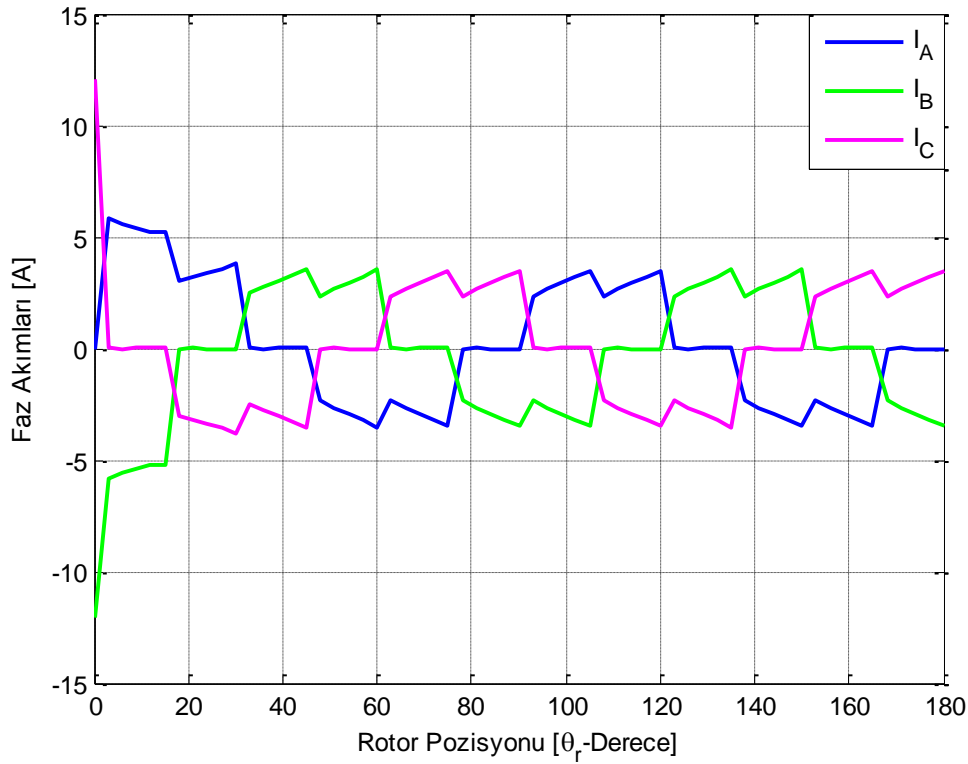
Eksenel akılı motor, radyal akılı motorun 530 min^{-1} hızında, $1,2 \text{ Nm}$ 'lik nominal yüküne göre tasarlanmıştır ve tasarıma başlanırken fazlardan $2,4 \text{ A}$ akımın geçmesi varsayımı ile başlanmıştır. Yani eksenel motorun nominal hızda, $2,4 \text{ A}$ 'lık akım ile $1,2 \text{ Nm}$ 'lik çıkış momenti vermesi hedeflenmektedir. Motorun sürülmesi bölüm 2'de anlatıldığı, gibi 6 adet IGBT anahtar içeren bir sürücü devre ile gerçekleştirilmektedir. Bu sürücü devrenin anahtarlarının uygun şekilde anahtarlanması ile, fazlara kare dalga akım verilmekte ve her anda iki faz aktif olarak, düzgün bir moment elde edilmektedir.

Eksenel motorun yük analizi için kurulan motor modeli $1,2 \text{ Nm}$ 'lik nominal yükü ile yüklenmiş ve sürücü devre ile sürülmüştür. Sürücü devrenin anahtarlarına ait akımlar Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Her bir faz anahtarlandığı andan itibaren elektriksel 120° iletimde olması gerektiği ve elektriksel 60° 'de bir komütasyon işleminin gerçekleşmesi gerektiği bölüm 2'de anlatılmıştı. Tasarımı yapılan eksenel motor $2p=8$ kutuplu olduğundan, elektriksel 120° , geometrik olarak 30° 'ye denk gelmektedir. Aynı şekilde komütasyon işlemi geometrik olarak 15° denk gelmektedir ve bu durumlar Şekil 6.5'te görülebilmektedir.



Şekil 6.5 : Eksenel akılı FDAM'ın nominal yükünde anahtar akımları.

Anahtarlama düzgün bir şekilde yapılan motorun stator sargılarından geçen akımlar Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi stator sargıları uygun anahtarlama ile kare dalga akım ile beslenmiştir. Motor, kalkış anında yüksek bir akım çekmiş ve daha sonra sürekli hal durumuna geçmiştir. Faz akımlarının teorik olarak sabit ve elektriksel 120° devam etmesi gerekmektedir; ancak, Şekil 6.6’da görülen akımın 120° akım beslemesinde, önce arttığı, sonra aniden azaldığı ve tekrar artarak elektriksel 120° ’yi tamamladığı görülmektedir. Bu artmalar sistemin dinamik özelliğinden, ani azalmalar ise farklı fazlarda yapılan akım değiştirme komütasyon işleminin sonuçlarıdır.



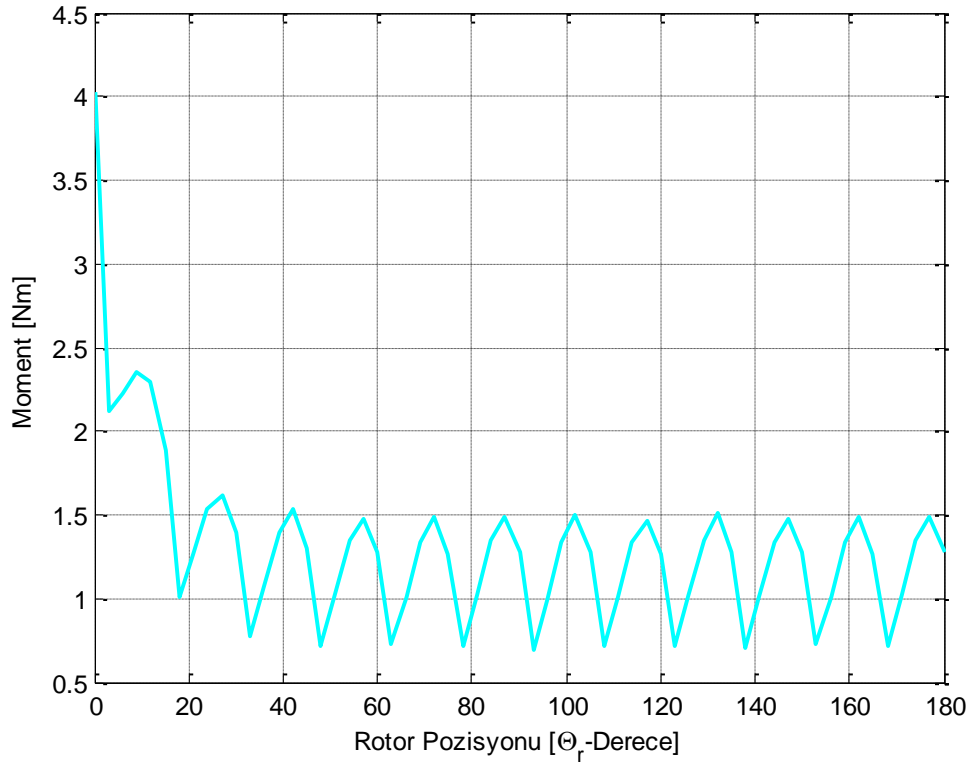
Şekil 6.6 : Nominal yükte stator faz akımları.

Analitik tasarıma başlanırken, eksenel akılı motorun faz akımının radyal akılı motorunki ile aynı olması sağlanmıştır. Böylece, her iki motorda kullanılan iletken kesitleri, aynı akım yoğunluğu değerleri için aynı olabilecekti, bu şekilde eksenel akılı motorun radyal akılı motor yerine üretilebilirliğinin hızlandırılması ve entegrasyonunun kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Şekil 6.6’da görülen faz akımı değeri, analitik tasarımdaki faz akımı sonucu ile Çizelge 6.3’te karşılaştırılmıştır. %3,96’lık bağıl hata yapılan SEY analizinin analitik tasarım sonuçlarıyla uyumluğu olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.3 : Eksenel akılı motorun nominal yükünde faz akımlarının karşılaştırılması.

	Stator Faz Akımı [A]	Bağlı Hata [%]
Analitik Sonuc	2,4	3,96
SEY Sonucu	2,305	

Eksenel akılı motorda oluşan moment Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Şekil 6.7’den görülebileceği gibi motor başlangıçta, Şekil 6.6’da gösterildiği üzere yüksek akım çekerek, yüksek bir moment ile yol almaktadır. Geçici olan bu durum kısa sürmekte ve motor sürekli hal durumuna geometrik olarak 50^0 , zaman olarak ise 15,7 ms sonra oturmaktadır. Motor sürekli hal durumuna oturduktan sonra ortalama 1,173 Nm moment üretmektedir. SEY analizi sonucu oluşan moment değeri ile analitik hesaplanan moment değeri karşılaştırması Çizelge 6.4’te gösterilmiştir. Yapılan karşılaştırma sonucu oluşan %2,25’lik hata analitik tasarım ile SEY analizinin tutarlılığını ortaya koymaktadır. Çıkış momentinde oluşan yüksek titreşim ise FDAM’ların en önemli dezavantajlarını oluşturmaktadır. Şekil 6.7’de de bu durum açıkça görülebilmektedir, ön tasarımı yapılan eksenel motorda iyileştirmeler yapılarak bu moment titreşimi azaltılabilir.



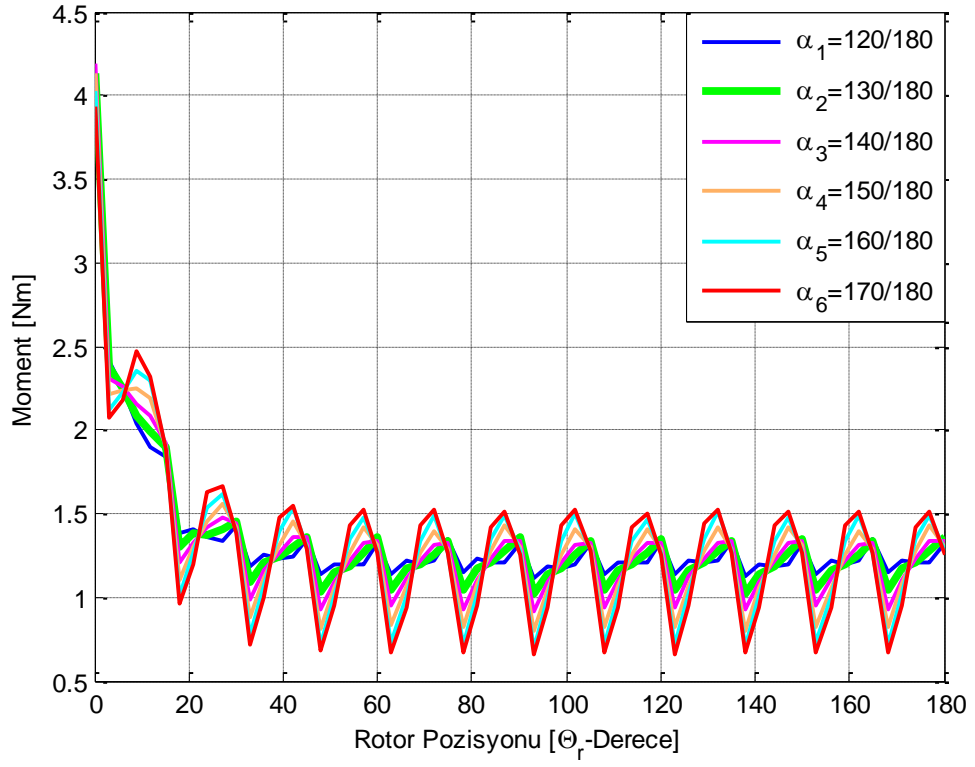
Şekil 6.7 : Eksenel akılı motorun nominal yükünde çıkış momentini.

Çizelge 6.4 : Eksenel akılı motorun nominal yükünde moment değerlerinin karşılaştırılması.

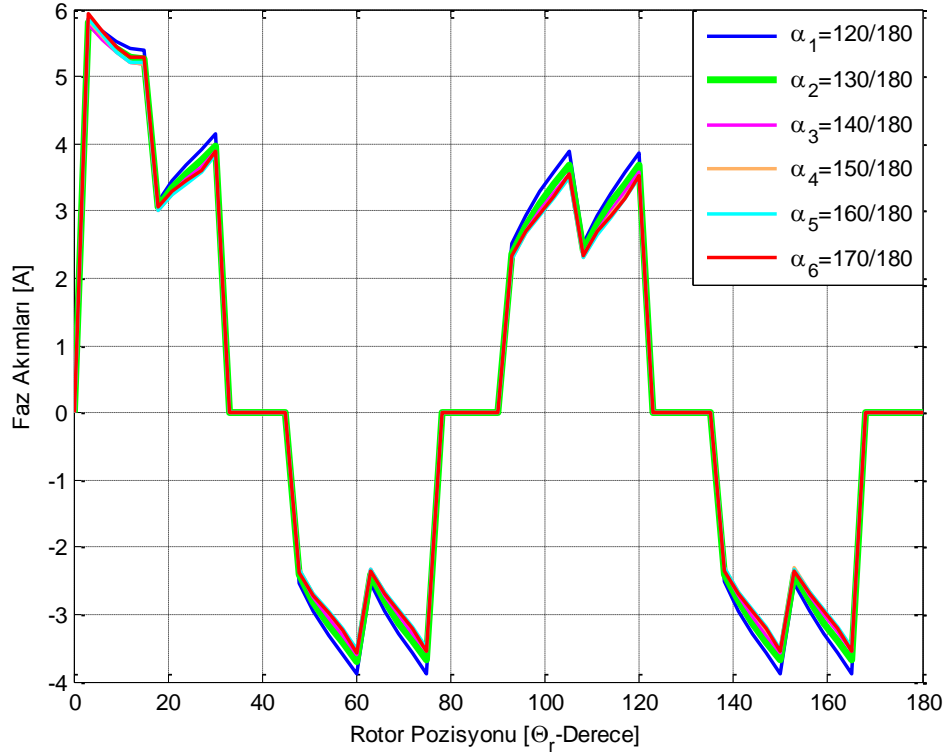
	Motor Çıkış Momenti [Nm]	Bağıl Hata [%]
Nominal Değer	1,2	2,25
SEY Sonucu	1,173	

6.2 Eksenel Akılı FDAM'nun Moment Dalgalılığının Azaltılması

Şekil 6.7'de görülebildiği gibi tasarlanan eksenel akılı FDAM'da yüksek miktarda moment titreşimi mevcuttur ve bu değer ortalama 1,173 Nm'lik moment değerine göre, %72 değerindedir. Moment titreşimi FDAM'ın en önemli dezavantajını oluşturmaktadır. Moment titreşimini azaltmanın birçok yöntemi mevcuttur, bu yöntemlerden etkili ve tasarım aşamasında uygulanabilirliği kolay olan biri, mıknatıs açısı/kutup açısı oranının (α_i) değiştirilmesidir. Şekil 6.7'da verilen moment sonucu, $\alpha_i=160/180$ olan eksenel akılı motor tasarımına aittir. Eksenel akılı motor ön tasarımı 160/180 mıknatıs açısı/kutup açısı oranında yapılmıştır. Bu oranın yüksek olması, yüksek moment dalgalılığına sebep olmakta ve çıkış momentinin ortalama değerini düşürmektedir. Bu değer uygun bir değer seçilerek hem moment titreşimi azaltılabilir hem de istenilen 1,2 Nm'lik moment değeri sağlanabilir. Mıknatıs açısı/kutup açısı oranının 120/180, 130/180, 140/180, 150/180, 160/180 ve 170/180 değerleri için kullanılan mıknatıs hacmi sabit kalacak şekilde, yapılan SEY analizi sonucu elde edilen moment değerleri Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Her bir mıknatıs açısı durumu için fazlardan geçen akımlar birlikte Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Yapılan analizler, ortalama moment, 1.2 Nm'lik tasarım momentine göre oluşan hata, moment dalgalılığı, fazlardan geçen akım ve tasarıma başlanan 2,4 A'lık faz akımına göre oluşan hata açısından karşılaştırmalı olarak Çizelge 6,5'te verilmiştir.



Şekil 6.8 : Farklı mıknatıs açısı/kutup açısı oranları için moment eğrileri.



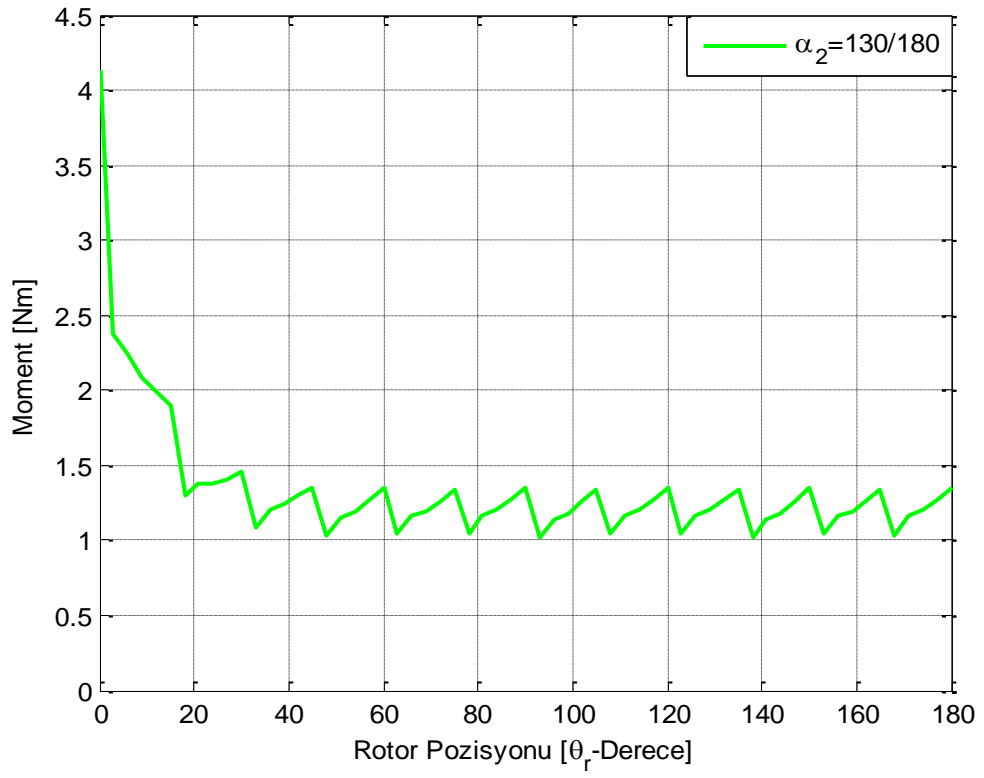
Şekil 6.9 : Farklı mıknatıs açısı/kutup açısı oranları için faz akımları.

Çizelge 6.5 : Farklı α_i değerleri için tasarımların performans karşılaştırması.

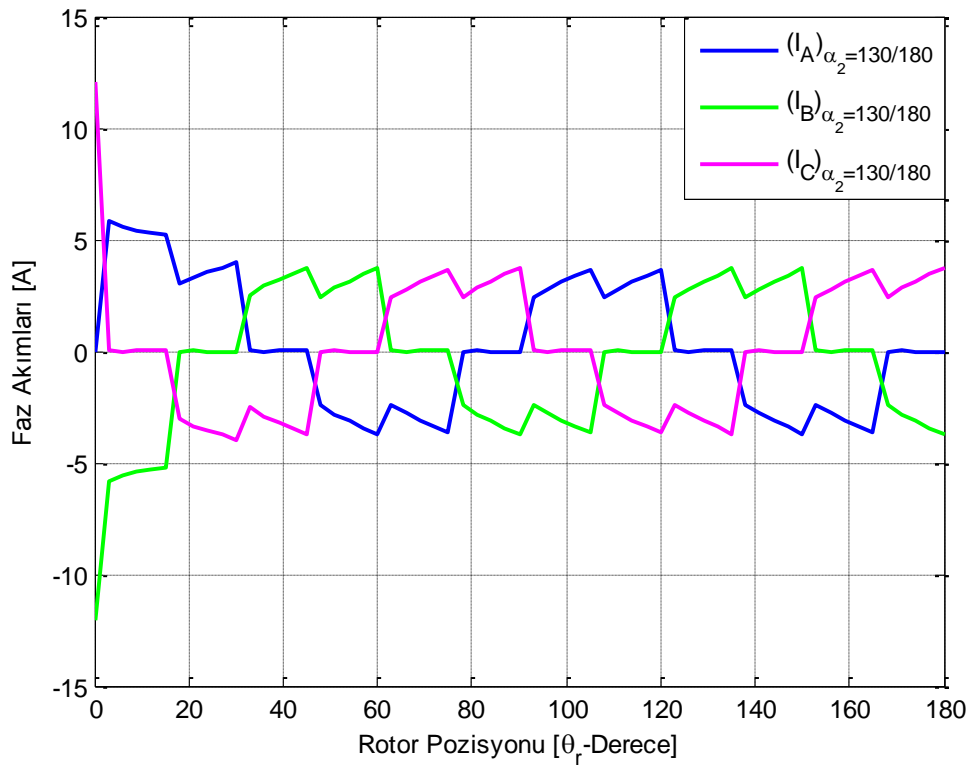
α_i	$T_{ORTALAMA}$ [Nm]	T_{HATA} [%]	$T_{DALGALILIK}$ [%]	$I_{ETKİN}$ [A]	I_{HATA} [%]
120/180	1,221	1,75	17,4	2,56	6,7
130/180	1,204	0,33	27,5	2,44	1,67
140/180	1,189	0,92	37	2,36	1,67
150/180	1,176	2	55,87	2,32	3,33
160/180	1,173	2,25	72	2,305	4
170/180	1,172	2,33	76,6	2,33	2,9

Şekil 6.8 ve Çizelge 6.5'ten görülebildiği gibi azalan α_i değeriyle birlikte momentte meydana gelen titreşim azalmaktadır. Moment titreşimi mıknatıs açısı/kutup açısı oranının 120/180 değerinde minimum değerini almıştır. Ancak faz akımında da bir artış olmuştur. Eksenel akılı motorun ortalama 1,2 Nm'lik radyal akılı motor momentini karşılayabilmesi gerekmektedir. Bu değer mıknatıs açısı/kutup açısı oranının 120/180 ve 130/180 değerleri için gerçekleştirilebilmektedir. Bu iki değer arasından ise moment ve faz akımında yapılan hatalara dikkat edildiğinde 130/180 değerinin daha uygun bir tasarım olduğu sonucuna varılmaktadır. 120/180 mıknatıs açısı/kutup açısı oranında daha yüksek bir ortalama moment elde edilmektedir ancak faz akımı da artmıştır. Artan faz akımı beraberinde bakır kaybı artışını getirmekte ve eksenel akılı motor verimi düşmektedir. Tüm bu değerlendirmeler göstermektedir ki eksenel akılı FDAM için en iyi mıknatıs açısı/kutup açısı oranı 130/180'dir. Ayrıca bu değerle birlikte moment titreşimi radyal akılı motora göre düşürülmüş ve daha üstün bir motor tasarımına ulaşılmıştır.

Tasarıma 130/180 mıknatıs açısı kutup açısı oranı ile devam edildiğinde eksenel akılı motor momenti ve faz akımı sırasıyla Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de gösterildiği karakteristikleri almaktadır. Böylece mıknatıs açısı/kutup açısı oranında değişiklik yapılarak, eksenel akılı motor ortalama momentinde ve moment titreşiminde iyileştirme yapılmıştır.

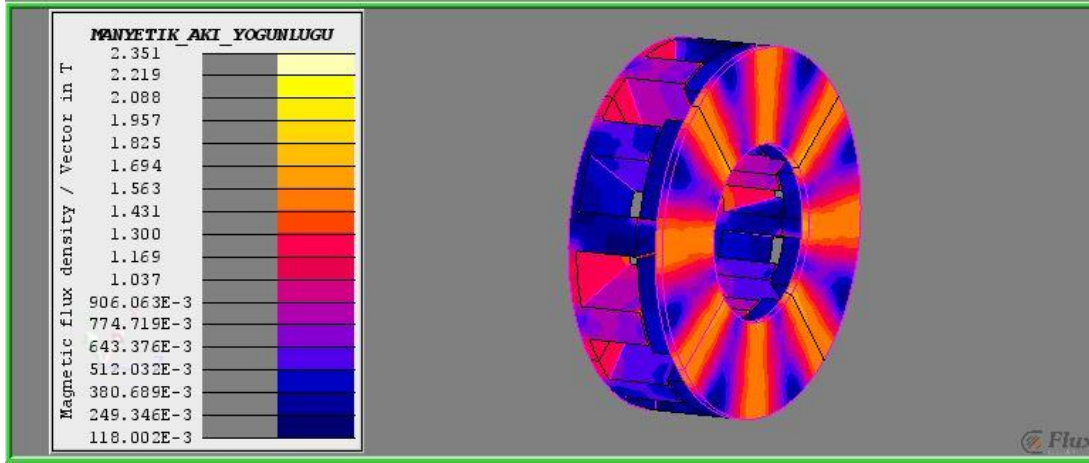


Şekil 6.10 : $\alpha_2=130/180$ değeri için eksenel akılı motor momenti.

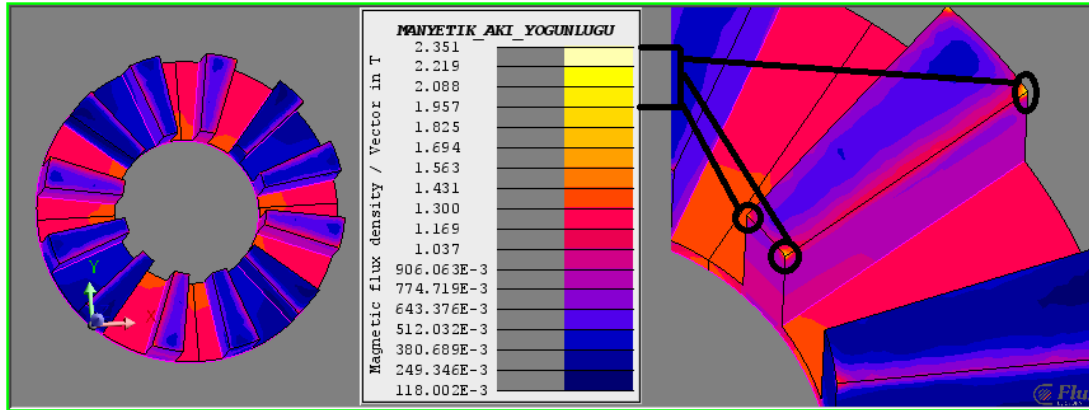


Şekil 6.11 : $\alpha_2=130/180$ değeri için eksenel akılı motor faz akımları.

Mıknatıs açısı/kutup açısı oranı değiştirilerek eksenel akılı motor moment titreşimi azaltıldıktan sonra, yapılan analizlerde ferromanyetik malzemede oluşan zorlanmalar Şekil 6.12 ve 6.13’de birlikte gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde, 2T civarı olan ferromanyetik doyma sınırı, stator dişlerinin çok küçük bazı bölgelerinde aşılmaktadır. Fakat çok küçük dar bölgelerde olmasında dolayı çok önem teşkil etmemektedir, rotor ve stator geometrilerinin genelinde büyük zorlanmalar olmamaktadır.



Şekil 6.12 : Eksenel akılı motorun manyetik akı yoğunluğu tayfı.



Şekil 6.13 : Statorun manyetik akı yoğunluğu tayfı.

6.3 Eksenel Akılı FDAM Kayıp ve Verim Analizi

Bölüm 4’te, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 ile verilen denlemlerden eksenel akılı motorun kayıpları ve verimi analitik olarak çıkartılabilir. Motor geometrisi yardımıyla ve denklem 4.3 yardımıyla, eksenel motor faz direnci hesaplanmıştır. Denklem 4.2 ve Şekil 6.11’deki 2,44 A’lık etkin faz akımıyla birlikte eksenel akılı motorun toplam bakır kaybı $P_{BAKIR}=26,52W$ olarak hesaplanmıştır.

Eksenel motorda ilgilenilen diğerk bir kayıp ise rotor ve stator laminasyonlarında oluşan demir kaybıdır. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 yardımıyla elde edilen stator ve rotor ortalama manyetik akı yoğunlukları, denklem 4.4'e uyarlanarak; stator demir kaybı $P_{\text{DEMİR-STATOR}}=1,86\text{W}$, rotor demir kaybı $P_{\text{DEMİR-ROTOR}}=0,91\text{W}$ olacak şekilde toplam demir kaybı $P_{\text{DEMİR}}=2,77\text{W}$ olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan rotor, stator demir kayıpları ve bakır kaybı, $1,204\text{ Nm}$, 530 min^{-1} nominal yükteki çıkış gücü ile birlikte denklem 4.5'e uyarlanarak eksenel akılı FDAM'nun verimi $\eta=\%69,5$ olarak hesaplanmıştır.

Bu bölümde özet olarak, eksenel akılı motor ön tasarımı analitik olarak yapılmış ve SEY paket programında analitik tasarım sonucu oluşan verilerle modeli kurulup analizi yapılmıştır. Ön tasarım sonucu oluşan verilerle yapılan analizlerden görülmüştür ki motor momentinde yüksek titreşim bulunmaktadır. Bu titreşim mıknatıs açısı/kutup açısı oranı değiştirilerek azaltılmıştır. Daha sonra eksenel motor verimi hesaplanmıştır. Analiz sonuçları eksenel akılı FDAM'ın radyal akılı FDAM yerine kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Radyal ve eksenel akılı motorun ayrıntılı karşılaştırması ve yapılan çıkarımlar bir sonraki bölüm 7'de verilmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, çamaşır makinesi uygulaması için üretilen ve kullanılan bir radyal akılı FDAM yerine, eksenel akılı tek tabakalı FDAM tasarlanmıştır. İlk olarak radyal akılı makine iki boyutlu SEY modeli kurulup analizleri yapılmış ve üretici firmanın nominal değerleri ile yapılan SEY analizlerinin tutarlılığı ortaya konulmuştur. Daha sonra farklı kutup sayıları için maksimum güç yoğunluğuna göre eniyileme yapan bir eksenel akılı motor temel boyutlandırma algoritması MATLAB® programı üzerinde geliştirilmiş ve farklı kutup sayıları için radyal akılı makinenin 2,4A'lık faz akımında 1,2 Nm'lik çıkış momenti sağlayacak, eksenel akılı FDAM tasarımları yapılmıştır. Daha sonra motorun üretilebilirliği düşünülerek uygun kutup sayısı seçilmiş ve diğer motor parametreleri belirlenip tasarım sonuçlandırılmıştır. Yapılan analitik tasarımın doğruluğunun sınanması SEY ile yapılmıştır. Analitik tasarım sonucu elde edilen büyüklükler ile üç boyutlu olarak eksenel akılı motor sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Motor konstrüksiyonunun çeyrek motor simetrisine uygun olmasından ötürü SEY analizlerinde çeyrek motor ile çalışmalar yapılmış ve simetriden faydalanılmıştır. Çünkü üç boyutlu SEY çok fazla sayıda sonlu eleman içermekte ve bellek kullanımı arttırarak benzetim sürelerini uzatmaktadır. Çeyrek motor modeli ile sonlu eleman sayısı azaltılmış ve benzetim süreleri kısaltılmıştır. SEY analiz sonuçları, hem analitik hem de radyal motor sonuçları ile karşılaştırılmış ve eksenel akılı motorun performans açısından kötü olduğu durumlarda iyileştirmeler yapılmıştır.

Bölüm 4'te radyal akılı motorda kullanılan malzeme ağırlıkları, fiyatlarıyla birlikte çıkartılmıştır. Ayrıca motor toplam hacmi kurulan model yardımıyla belirlenmiş ve son olarak da kayıplar hesaplanarak verim hesaplanmıştır. Bölüm 5'te eksenel akılı motorun toplam motor ağırlığı, hacmi, maliyeti, hacimsel güç yoğunluğu, moment yoğunluğu gibi özellikleri hesaplanmıştır. Bölüm 6'nın ilk kısmında motorun SEY analizi yapılmış ve motorun ön tasarım sonucuyla yapılan SEY analizlerinde moment titreşiminin yüksek olduğu ve kısıt olan radyal akılı motor 1,2 Nm'lik momenti karşılayamadığı görülmüştür. Eksenel akılı motorun, istenilen moment değerini daha

düzgün, titreşimi daha düşük bir şekilde karşılayabilmesi için; ikinci kısımda, moment titreşimi azaltma yöntemlerinden biri olan mıknatıs açısı/kutup açısı oranının değiştirilmesi yöntemi uygulanmıştır ve motor momentinde iyileştirme yapılmıştır. Son kısımda ise analitik olarak verimi çıkartılmıştır. Bölüm 4, 5 ve 6'da hesaplanan ve çıkartılan bu değerlere, radyal akılı motorun hacimsel güç yoğunluğu, moment yoğunluğu gibi özellikleri ve mıknatıs açısının değiştirilmesi sonucu eksenel akılı motorun değişen güç yoğunluğu ve hacim gibi özellikleri de eklenerek, eksenel akılı motor ile radyal akılı motor özellikleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 7.1 verilmiştir. Görüldüğü gibi karşılaştırma parametresi olarak verilen güç-moment yoğunluğu, hacim, ağırlık, maliyet ve verim parametrelerinden hepsinde eksenel akılı motor üstün çıkmaktadır.

Çizelge 7.1 : Radyal ve eksenel akılı FDAM'ların karşılaştırılması.

	Güç Yoğunluğu [kW/m ³]	Moment Yoğunluğu [Nm/kg]	Hacim [cm ³]	Ağırlık [kg]	Maliyet [BirimPara]	Motor Verimi [%]
Radyal Akılı FDAM	85,25	0,251	781,25	4,79	62,4	52,67
Eksenel Akılı FDAM	143,9	0,777	464,22	1,55	28,5	69,5

Eksenel akılı motorun, güç yoğunluğu, moment yoğunluğu, hacim, ağırlık ve maliyet gibi kıstaslarda radyal akılı motordan üstün olmasının sebebi daha az miktarda malzeme kullanılmasıdır. Çizelge 7.2'de radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan malzemelerin miktarları gösterilmiştir. Çizelge 7.2 incelendiğinde radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan sürekli mıknatıs miktarlarının birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Motorlarda kullanılan malzemelerden, toplam malzeme miktarındaki temel ve büyük farkı rotor ve stator laminasyonlarında kullanılan ferromanyetik malzeme ve bakır iletken oluşturmaktadır. Kullanılan ferromanyetik malzeme açısından bu farkın oluşmasının sebebi motorlarda bulunan ferromanyetik malzemedan elde edilen faydanın; bir başka deyişle malzeme kullanım performanslarının farklı olmasıdır. Daha az miktarda laminasyon malzemesinin kullanımı, motorda kullanılan ferromanyetik malzemedan daha fazla faydalandığını aynı zamanda malzemenin daha fazla zorlandığının göstergesidir. Radyal akılı motorun analizindeki Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde görülmektedir ki, 2T civarında doyma sınırı olan ferromanyetik malzeme, çok düşük seviyelerde kullanılmakta ve malzemedan maksimum fayda elde edilmemektedir. Aynı şekilde

eksenel akılı motor analizinde çıkartılan Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 incelendiğinde ise aynı ferromanyetik malzemeden daha fazla yararlanıldığı görülmektedir. Bu fazla faydalanma, eksenel akılı motordaki daha az yer kaplayan yapı; yani, motorda kullanılan malzemenin miktarının azaltılması ile birlikte elde edilmektedir. Kullanılan bakır iletkenler arasındaki farkın sebebi yine eksenel motorun daha düşük hacimli yapısıdır. Daha düşük hacimli yapısı sayesinde sarım uzunluğu daha düşük çıkmış ve kullanılan malzeme ağırlığı azalmıştır. Böylece eksenel akılı motor toplam ağırlığı ve hacmi, radyal akılı motora göre azalmış, hacimsel güç yoğunluğu ve moment yoğunluğu ise artmıştır. Eksenel akılı motorda ferromanyetik malzemeden daha fazla faydalanma, stator ve rotor laminasyonlarında oluşan demir kayıplarının artışı beraberinde getirmektedir. Bu da eksenel akılı motorun veriminin azalmasına sebep olmaktadır.

Eksenel ve radyal akılı motorların benzer faz akımlarında aynı çıkış gücünü vermeleri sağlanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu eksenel akılı motorda bulunan faz sarım sayısı, radyal akılı motora göre daha fazla olmaktadır. Eksenel akılı motorun daha küçük hacimli yapısından dolayı sarım uzunluğu radyal akılı motora göre oldukça kısadır; bundan dolayı eksenel akılı motorda artan faz sarım sayısına rağmen sargı direnci radyal akılı motordan düşük olmaktadır. Fazlardan akan akımlar ise yaklaşık eşit ve 2,4A değerlidir. Direnç değerleri arasındaki bu farklılık, radyal akılı motora göre eksenel akılı motorda daha az bakır kaybının olmasına sebep olmaktadır. Böylece, eksenel akılı motorda demir kaybı radyal akılı motora göre daha fazla ve bakır kaybı ise daha azdır. Verim üzerinde ise bakır kaybı büyük değerinden dolayı demir kaybına göre daha etkilidir. Bundan dolayı eksenel akılı motor verimi radyal akılı motor verimine göre daha yüksek çıkmaktadır.

Çizelge 7.2 : Radyal ve eksenel akılı motorlarda kullanılan malzeme ağırlıkları.

	Radyal Akılı FDAM	Eksenel Akılı FDAM
Bakır İletken [kg]	0,59	0,25
Stator Laminasyon [kg]	3,31	0,93
Rotor Laminasyon [kg]	0,65	0,17
Ferit Mıknatıs [kg]	0,24	0,20

Eksenel ve radyal akılı motorların karşılaştırılması gereken bir başka konu ise elde edilen çıkış momentlerinin karakteristiğidir. Tasarlanan eksenel akılı motorda ön tasarım sonucu oluşan moment grafiği Şekil 6.7’de görüldüğü gibi %72’lik bir

moment titreşimine sahiptir, ayrıca bu tasarım istenilen 1,2Nm'lik moment değerini sağlayamamaktadır. Daha sonra farklı mıknatıs açısı/kutup açısı oranı ile yapılan analizler sonucu oluşan eksenel akılı motor momentleri ve bu momentler elde edilirken fazlardan akan akımlar sırasıyla Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterildiği gibidir. 6 farklı mıknatıs açısı/kutup açısı oranı ile yapılan SEY analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.5'de gösterilmiştir. Çizelge 6.5 incelendiğinde mıknatıs açısı/kutup açısının 130/180 olduğu değer, oluşturduğu moment ve akım hatalarından ve istenilen 1,2Nm'lik moment değerini karşılayabildiği için en iyi durum olarak seçilmiştir. Seçilen mıknatıs açısı/kutup açısı oranından sonra oluşan eksenel akılı motor momenti Şekil 6.10'da gösterildiği şekli almıştır ve moment titreşimi %27,5 değerine kadar düşürülmüştür. Motor momentindeki değişim aralığının radyal ve eksenel akılı motorlar için sırasıyla Şekil 4.12 ile Şekil 6.10'nun incelenip, ortalama yük momentine göre moment titreşimlerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması Çizelge 7.3'te gösterilmiştir. Çizelge 7.3'ten görüldüğü gibi her iki motor moment titreşimleri hatırı sayılır seviyelerde mevcuttur, bu FDAM'ların temel dezavantajlarından biri olarak literatürde halihazırda yer almaktadır. Karşılaştırma radyal ve eksenel akılı motorlar için yapıldığında Çizelge 7.3'te görüldüğü gibi moment titreşimleri açısından tasarlanan eksenel akılı motor yine üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Çizelge 7.3 : Radyal ve eksenel akılı motorların moment titreşimleri.

	Çıkış Momenti Değişim Aralığı [Nm]	Moment Titreşim Miktarı [%]
Radyal Akılı FDAM	0,85-1,51	55
Eksenel Akılı FDAM	1,354-1,023	27,5

Sonuç olarak, çamaşır makinesi uygulamasında kullanılan radyal akılı bir FDAM'ın yerine güç yoğunluğu ve moment yoğunluğu yüksek, kapladığı hacim, toplam ağırlığı ve maliyeti daha düşük, gibi üstün özelliklere sahip eksenel akılı bir FDAM tasarlanmıştır. Bunun yanında; tasarlanan eksenel akılı motor, verim ve moment titreşimleri bakımından da radyal akılı motora göre daha iyi bir tasarım olduğunu göstermiştir. Tüm bu karşılaştırma sonuçları açıkça göstermektedir ki, tasarlanan eksenel akılı FDAM, çamaşır makineleri uygulamalarında kullanılmak üzere uygun bir tasarımdır ve radyal akılı motorun yerini alabilecek performans özelliklerini daha daha düşük bir hacimle sağlamaktadır.

8. KAYNAKLAR

- [1] **Commission of The European Communities.** (2009). *Commission Staff Working Document*, Erişim: 15 Kasım, 2015. Alıntı Yeri: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/sec_2009_1013.pdf.
- [2] **Ercan, A. A.** (2014). Elektrik Motorlarının Verimlilik Standartları, *Journal of ETA Maritime Science*, Cilt 2, Sayı 1, Sf. 31-40.
- [3] **Honsinger, V. B.** (1987). Sizing Equations for Electrical Machinery, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Cilt EC-2, Sayı 2, Sf. 116-121.
- [4] **Gieras, J. F., Wang, R. J. & Kamper, M. J.** (2008). *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Springer. 2.Baskı, Sf. 1-11.
- [5] **Huang, S., Luo, J., Leonardi, F. & Lipo, T. A.** (1999). A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*. Cilt 14, Sayı 2, Sf. 185-192.
- [6] **Sitapati, K. & Krishnan, R.** (2001). Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines, *Industry Applications, IEEE Transactions on*. Cilt 37, Sayı 5, Sf. 1219-1226.
- [7] **Aydin, M., Huang, S. & Lipo, T. A.** (2001). Design and 3D Electromagnetic Field Analysis of Non-Slotted and Slotted TORUS Type Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Machines, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'01*, (Sf. 645 – 651). Cambridge, Jun 17-20.
- [8] **Cavagnino, A., Lazzari, M., Profumo, F. & Tenconi, A.** (2002). A Comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM Synchronous Motors, *Industry Applications, IEEE Transactions on*. Cilt 38, Sayı 6, Sf. 1517-1524.
- [9] **Qu, R., Aydın, M. & Lipo, T. A.,** (2003). Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*, Cilt 3, (Sf. 1948 – 1954). Madison, USA, Jun 1-4.
- [10] **Bumby, J. R., Martin, R., Mueller, M. A., Spooner, E., Brown, N. L. & Chalmers, B. J.** (2004). Electromagnetic Design of Axial-Flux Permanent Magnet Machines, *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, Cilt 151, Sayı 2, Sf. 151-160.
- [11] **Aydın, M., Huang, S. & Lipo, T. A.** (2006). Torque Quality and Comparison of Internal and External Rotor Axial Flux Surface-Magnet Disc

Machines, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. Cilt 53, Sayı 3, Sf. 822-830.

- [12] **Fei, W., Luk, P. C. K. & Jinupun, K.** (2008). A New Axial Flux Permanent Magnet Segmented-Armature-Torus Machine for in-Wheel Direct Drive Applications, *Power Electronics Specialists Conference (PESC'08)*, (Sf. 2197-2202).
- [13] **Chaker, N., Salah, I. B. & Tounsi, S.** (2009). Design of Axial-Flux Motor for Traction Application, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Cilt 2, Sf. 73-83.
- [14] **Darabi, A., Moradi, H. & Azarinfar, H.** (2011). Design and Simulation of Low Speed Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Machine, *World Academy of Science, Engineering Technology*, Sf. 692-695.
- [15] **Waththage, S. C., Chen, C. & Perry, C. H.** (2012). Analysis of Single Side Axial Flux Brushless DC Motor with Different Number of Stator Electromagnetic Poles, *Proceedings of IEEE*, Sf. 1-6.
- [16] **Yang, Y., Patterson, D. & Hudgins, J.** (2013). Multi-Objective Design Optimization of a Single-Sided Axial Flux Permanent Magnet Machine, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2013)*, (Sf. 822-825).
- [17] **Yang, Y., Patterson, D. & Hudgins, J.** (2014). Design Optimization of Single-Sided Axial Flux Permanent Magnet Machines by Differential Evolution, *International Conference on Electrical Machines (ICEM 2014)*, (Sf. 1090-1095).
- [18] **Nakahara, A., Deguchi, K., Kikuchi, S. & Enomoto, Y.** (2014). Comparative Electrical Design of Radial-and Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Machines under Space Limitation, *International Conference on Electrical Machines (ICEM 2014)*, (Sf. 422-428).
- [19] **Chaithongsuk, S.** (2006). *Design and Construction of A Permanent Magnet Synchronous Motor*. (Yüksek Lisans Tezi). King Mongkut's Institute of Technology, North Bangkok.
- [20] **Strnat, K.** (1990). Modern Permanent Magnets for Application in Electro-Technology. *Proceedings of the IEEE*, Cilt 78, Sayı 6, Sf. 923-946.
- [21] **Hanselman D.** (2006). *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Magna Physics Publishing, 2.Baskı, Ohio, ABD.
- [22] **Pillay, P. & Krishnan, R.** (1988). Modelling Of Permanent Magnet Motor Drives, *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Cilt 35, Sayı 4, Sf. 537-541.
- [23] **Hendershot, J. R. & Miller T. J. E.** (1994). *Design of Brushless-Permanent Magnet Motors*, Magna Physics Publishing ve Clarendon Press, Michigan, ABD.
- [24] **Yesilbag, E. & Ergene, L. T.,** (2014). Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motors used in Washers. *In Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International*, Sf. 1259-1264.

- [25] **Krishnan, R.** (2010). *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, Michigan, Virginia, ABD.
- [26] **Üstün, Ö.** (2014). *Brushless Servomotors and Their Applications*, (Ders Notları). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [27] **Tuncay, R. N., Üstün, Ö. & Yılmaz, M.** (2004). Fırçasız Doğru Akım Makinesinin (BLDC) MATLAB/Simulink Ortamında Modellenmesi ve Algılayıcısız Kontrolü, *Conference for Computer-Aided Engineering and System Modeling with Exhibition*, İstanbul.
- [28] **Infolytica Corporation**, (2009). *3D model of Axial Flux Motor, 3D Model of a Brushless DC Motor*, Erişim: 18 Kasım, 2015. Alıntı Yeri: http://encyclopedia-magnetica.com/doku.php/infolytica_corporation.
- [29] **Parviainen, A.** (2005). *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial Flux Machines*, (Doktora Tezi). Lappeenranta University of Technolog, Lappeenranta, Finlandiya.
- [30] **Kalenderli, Ö.** (2014). Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, *Ders Notları*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [31] **Aydın, M.** (2015). *Brushless Permanent Magnet Servomotors*, Erişim Tarihi: 15 Eylül, 2015. Alıntı Yeri: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/34404.pdf>.
- [32] **Flux User Guide, 2015.**
- [33] **Dönmezer, Y.** (2009). *Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment Titreşimlerinin Azaltılması*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul/Türkiye.
- [34] **Dönmezer, Y. & Ergene, L. T.,** (2010). Skewing Effect of Interior Type BLDC Motors. In *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, Sf. 1-5.
- [35] **Price Comparison of NdFeB, SmCo, SrFe & BaFe**, Erişim : 12 Kasım, 2015. Alıntı Yeri: www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=317882.
- [36] **Wolf, R.,** (2013). *Recent History, Current Events and The Future of Rare Earth and Ferrite Magnets*, Erişim Tarihi: 12 Kasım, 2015. Alıntı Yeri: http://www.allianceorg.com/pdfs/Magnet_Material_Cost_Criteria.pdf.
- [37] **Chen, M., Yu, Y. J., Xiao, L. Y., Wang, Q. L., Chung, W., Kim, K., Baang, S.** (2003). *The Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials used for HTS Transformers at 77K, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, Cilt 13, Sayı 2, Sf. 2313-2316.
- [38] **Bakır iletken fiyatları.** Erişim 12 Kasım 2015, Alıntı Yeri: www.bobinajonline.com/urun/emaye-bobin-teli-fiyat-listesi/111
- [39] **Mahmoudi, A., Rahim N. A., & Hew, W. P.** (2011). *Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Modeling, Design, Simulation and Alaysis*, Erişim Tarihi: 16 Kasım, 2015. Alıntı Yeri: http://researchgate.net/publication/228847506_Axial-flux_permanent-magnet_machine_modeling_design_simulation_and_anaylsis.

