

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOROİDAL SARGILI AÇIK OLUKLU EKSENEL
AKILI SABİT MIKNATISLI NN TİP MOTOR
TASARIMI VE UYGULAMASI

Engin HÜNER

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK EĞİTİMİ PROGRAMI

DANIŞMAN
Doç. Dr. M. Caner AKÜNER

İSTANBUL 2012

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOROİDAL SARGILI AÇIK OLUKLU EKSENEL
AKILI SABİT MIKNATISLI NN TİP MOTOR
TASARIMI VE UYGULAMASI

Engin HÜNER
(141201220070513)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK EĞİTİMİ PROGRAMI

DANIŞMAN
Doç. Dr. M. Caner AKÜNER

İSTANBUL 2012

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, destek ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım danışman hocam Sayın, Doç. Dr. Caner AKÜNER'e teşekkür ederim. Ayrıca başta eşim Tülay ve oğlum Çınar'a daha sonra Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde görev yapan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Komisyon Başkanlığı tarafından FEN-C-DRP-181208-0292 proje numarası ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
TEŞEKKÜR.....	İ
ÖZET.....	V
ABSTRACT	Vi
YENİLİK BEYANI.....	vii
SEMBOLLER	viii
KISALTMALAR.....	xi
ŞEKİLLER	xii
TABLolar	xv
BÖLÜM I	1
I.1. GİRİŞ	1
I.2. ÇALIŞMANIN AMACI.....	3
I.3. LİTERATÜR.....	4
BÖLÜM II EKSENEL AKILI MAKİNELER	17
II.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	17
II.1.1. Domenler.....	19
II.1.2. Yumuşak Manyetik Malzemeler	19
II.1.3. Sert Manyetik Malzemeler	20
II.1.4. Ferrit Mıknatıslar	20
II.1.5. Alnico Mıknatıslar	21
II.1.6. Samaryum Kobalt(SmCo) Mıknatıslar	22
II.1.7. Neodyum Demir Bor Mıknatıslar	22
II.2. EKSENEL AKILI MAKİNELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	23
II.2.1. Tek Taraflı EASM Makineler	23
II.2.1.1. Oluklu stator	24
II.2.1.2. Çıkık kutuplu stator	24
II.2.2. Çift Taraflı Tek Rotorlu EAISM Makineler	25
II.2.3. Çift Taraflı EASM Makineler	26
II.2.3.1. Oluklu Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı(EASMO) Makineler.....	26

II.2.3.2. Oluksuz Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı(EASMOZ) Makineler.....	27
II.2.3.3. Nüvesiz EASM Makineler.....	28
II.2.4. Çok Bölümlü EASM Makineler	28
II.3. EASM MAKİNESİN GENEL EŞİTLİKLERİ	29
II.3.1. Sargı özelliklerinin tespiti	29
II.3.2. Moment ifadesinin çıkarılması.....	31
II.4. EASM MAKİNESİN EŞDEĞER DEVRESİ	33
II.5. EASM MAKİNESİN MANYETİK EŞDEĞER DEVRESİ.....	35
BÖLÜM III EKSENEL AKILI MAKİNELERİN MANYETİK ANALİZİ.....	39
III.1. MAXWELL 3D SEY PROGRAMI.....	39
III.1.1. Elektrik	39
III.1.2. Manyetostatik	39
III.1.3. Harmonik(Eddy Akımı).....	40
III.1.4. Geçici Durum	40
III.1.5. Manyetostatik alan hesaplaması	40
III.1.6. Manyetik Alan Enerjisi.....	41
III.1.7. Bağ akısı ve akımın endüktans olarak ifadesi	42
III.1.8. Gerilim ve Zamanla Değişen Akıma Bağlı Olan Endüktans.....	42
III.1.9. Endüktans matrisindeki elemanlar.....	43
III.1.10. Endüktans matrisindeki çapraz elemanlar	43
III.1.11. Endüktans matrisindeki çapraz olmayan elemanlar	43
III.1.12. Simetri	44
III.1.13. Endüktans matrisinin çözüm süreci.....	44
III.1.14. Lorentz Kuvveti.....	44
III.1.15. Lorentz Momenti	45
III.1.16. Zahiri Kuvvet.....	45
III.1.17. Zahiri Moment.....	46
III.2. YENİ BİR TOROİDAL AÇIK OLUKLU NN TİP EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI(TEASMAO-NN) SENKRON MAKİNESİN 3D MODELLENMESİ VE ANALİZİ	46
III.2.1. TEASMAO-NN Motorun 3D modellenmesi	47

III.2.2. Malzeme tanımlamaları	49
III.2.3. Bakır Sargıların Terminal Tanımlamaları ve Akım Yoğunluğu	50
III.2.4. Bir sargıdaki akım yoğunluğu	52
III.3. TEASMAO-NN TİP MOTOR TASARIMININ ANALİZ SONUÇLARI	52
III.3.1. Kullanılan Mıknatısların Oluşturduğu Manyetik Akının Analizi	52
BÖLÜM IV TASARIMIN UYGULAMASI.....	56
IV.1. TEASMAO-NN TİP MOTORUN ÜRETİMİ.....	56
IV.1.1. Açık Oluklu Tip Nüvenin Sargı Hesabı ve Sargı Şeması	56
IV.1.2. Statorun döküm tipi dış gövdesi	59
IV.1.3. Gövde ve Kapakların Üretimi.....	59
IV.1.4. TEASMAO-NN Tip Motor	59
IV.2. TEASMAO-NN TİP MOTORUN DENEYSEL SONUÇLARI.....	61
IV.2.1. TEASMAO-NN Tip Motorun Ters EMK'sının Tespiti	62
IV.2.2. TEASMAO-NN Tip Motorun Direnç, Empedans ve d-q Eksen Reaktanslarının Bulunması	64
IV.2.3. TEASMAO-NN Tip Motorun Vuruntu Momentinin Bulunması.....	65
IV.2.4. TEASMAO-NN Tip Motorun Boş Çalışma Momenti	67
IV.2.5. TEASMAO-NN Tip Motorun Yüklü Çalışma Deneyi.....	67
IV.2.5.1. TEASMAO-NN Tip Motorun Moment Verim Grafiklerinin Farklı Çalışma Frekanslarında Çıkarılması.....	68
IV.2.5.2. TEASMAO-NN Tip Motorun Sabit Yükte Gerilim Verim Eğrilerinin Çıkarılması	77
IV.2.5.3. TEASMAO-NN Tip Motorun Akım Moment Grafiklerinin Çıkarılması	84
IV.2.5.4. TEASMAO-NN Tip Motorun Sıcaklık Deney Sonuçları	87
BÖLÜM V SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	89
BÖLÜM VI DEĞERLENDİRMELER VE ÖNERİLER	92
ÖZGEÇMİŞ.....	104

ÖZET

TOROİDAL SARGILI AÇIK OLUKLU EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI NN TİP MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

Eksenel akılı makineler neodyum mıknatısların gelişimi ile birlikte üzerinde çalışılan bir konu haline gelmiştir. Özellikle elektrikli araçlara doğru yönelim değişik geometrideki elektrik motorlarının tasarım sürecini hızlandırmıştır. Literatür incelendiğinde eksenel akılı motorlar üzerinde yeni tasarımların geliştirildiği, eksenel akılı motor performansını geliştirici değişiklikler yapıldığı ve tasarlanan eksenel akılı motorların farklı alanlarda kullanıldığı görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada amaç yeni bir tasarım modeli geliştirmektir. Tasarlanan yeni eksenel akılı motor hem nüveli oluksuz çok katlı sargıya sahip eksenel akılı makine özelliklerini hemde nüveli açık oluklu makine özelliklerini taşımaktadır. Dolayısıyla yapılan tasarım hibrid bir yapıdadır. Ayrıca tasarım sayesinde üzerinde çok az çalışılmış oluksuz nüveli çok katlı sargıya sahip eksenel akılı motor performansı arttırılmış hemde açık oluklu nüveli eksenel akılı motorun vuruğu momentini giderici bir yöntem uygulanmıştır.

Yeni tasarlanan toroidal yapıda eksenel akılı sabit mıknatıslı açık oluklu motordan elde edilen sonuçlarda çok katlı sargı yapısına sahip eksenel akılı motorun performansının geliştirildiği görülmektedir. Bununla birlikte oluklu motorlarda meydana gelen vuruğu momenti düşük maliyetli yöntemler ile giderilmiştir. Ayrıca yapılan tasarım laboratuvar uygulamalarında kullanılacak bir geometride tasarlanmıştır. Böylelikle birçok stator ve rotor geometrisi düzeneğe yerleştirilerek deneysel çalışmalar yapılabilir olacaktır. Alınan sonuçlar incelendiğinde yapılan tasarımın birçok alanda kullanılabilir performansa sahip bir motor olduğu ortaya konmuştur.

ABSTRACT

TOROIDAL WINDING OPEN SLOTTED AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET NN TYPE MOTOR DESIGN AND APPLICATION

Axial flux permanent magnet machines have become an important subject of study in the last decade years. Neodymium magnets have contributed to this development. However, the development of electric vehicles has contributed to the development of electric motors. In the literature, the studies about new designs, performance improvements and new usage of axial flux machines have attracted attention.

The purpose of this study is to develop new design model. The designed machine have both properties of axial flux permanent magnet with slotless core and properties of axial flux permanent magnet with open slot core. Therefore, the design is a hybrid structure. Also performance of axial flux permanent magnet machines with slotless has improved and an elimination method has applied for cogging torque of axial flux permanent magnet machines with open slot.

According to obtained results from the new designed toroidal open slot axial flux permanent magnet machines, the performance of axial flux permanent magnet machines with multilayer windings structure has improved. In addition to this, cogging torque of open slotted axial flux permanent magnet machines has eliminated with very little cost. Also, designed geometry is appropriate for laboratory applications. So a lot of stator and rotor structures can be applied. The developed design can be used for a lot of areas.

July, 2012

Engin, HÜNER

YENİLİK BEYANI

TOROİDAL SARGILI AÇIK OLUKLU EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI NN TİP MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

Yapılan bu çalışmada yeni bir hibrid yapıda eksenel akılı motor tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Tasarımı yapılan eksenel akılı motor toroidal yapıda nüveli oluksuz bir geometriye sahip motor ile nüveli açık oluklu bir eksenel akılı motorun birleşiminden oluşmaktadır.

Nüveli oluksuz yapıda toroidal sargıya sahip eksenel akılı motorlar geometrileri gereği az siper sayılarına sahiptir. Çok az çalışmada çok katmanlı sargı yapısı kullanılmıştır. Bu tip motorlarda üst üste sargı yapısı kullanmak hava aralığını arttıracığı için ve yapım maliyetini de yükseltici etki göstereceğinden pek kullanılmaz. Dolayısıyla nüveli oluksuz tip motorların güçlerini arttırmak için nüve çaplarını arttırmak gereklidir. Yapılan bu çalışmada bu tip motorlarda açık oluklarda kullanılarak siper sayısını dolayısıyla aynı nüve hacmi için motor milinden alınan gücüde arttırmak mümkün olmuştur. Ayrıca açık oluklu nüveye sahip eksenel akılı motorlar yüksek vuruğu momentinden dolayı oluk ağızları kapalı yapılmaktadır. Açık oluklu eksenel akılı motorlar yüksek vuruğu momentinden dolayı tercih edilmezler. Yapılan çalışma ile sargılar nüve dışınada sarıldığı için hava aralığı daha yüksektir. Dolayısıyla vuruğu momentide giderilmiştir.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında tasarımı yapılan yeni bir toroidal yapıda eksenel akılı sabit mıknatıslı açık oluklu NN tip motor tasarlanmış ve uygulanmıştır. Uygulama sonuçlarında yüksek verimli ve yüksek güç yoğunluğuna sahip bu yeni motor birçok alanda kullanılmaya adaydır.

SEMBOLLER

I	:Akım (A)
R	:Direç (Ω)
λ	:Nüve iç çapının dış çapa oranı
H_c	:Koersivite (A/m)
B	:Manyetik akı yoğunluğu (weber/m ² , T)
H	:Manyetik alan şiddeti (At/weber)
M_s	:Doyma mıknatıslanması
B_r	:Kalıcılık (weber/m ² , T)
μ_r	:Bağıl geçirgenlik (H/m)
n_c	:Faz başına düşen sargı sayısı
x	:Oluk sayısı
m	:Faz sayısı
c	:Her faza bir kutup altında düşen oluk sayısı
2P	:Tek kutup sayısı
N_c	:Bir sargının iletken sayısı
a_p	:Paralel kol sayısı
a_w	:Paralel akım terminal sayısı
K_a	:Adım katsayısı
β	:Elektriksel olarak kısaltılan sargı derecesi (derece)
α	:İki oluk arasındaki elektriksel açı (derece)
N_1	:Bir fazın iletken sayısı
Φ	:Manyetik akı (weber)
K_d	:Dağıtım katsayısı
$\tau(r)$	:Kutup adımı
r	:Yarıçap (m)
$b_p(r)$	:Kutup genişliği (m)
B_{ort}	:Ortalama manyetik akı yoğunluğu (T)
B_{max}	:Maksimum manyetik akı yoğunluğu (T)
α_i	:Ortalama manyetik akının maksimum manyetik akıya oranı
$A_m(r)$	:Çizgisel akım yoğunluğu (AT/m)

F_x	:Disk üzerindeki kuvvet (N)
I_a	:Sargı akımı (A)
S	:Yüzey alanı (m^2)
$D_{dış}$	:Nüvenin dış çapı (m)
$D_{iç}$	:Nüvenin iç çapı (m)
T_d	:Elektromanyetik moment (Nm)
Φ_f	:Bir kutup altındaki manyetik akı yoğunluğu (weber)
$R_{dış}$	:Nüve dış yarıçapı (m)
$R_{iç}$	:Nüve iç yarıçapı (m)
k_m	:Moment sabiti
I_{aq}	:q eksenli akımı (A)
I_{ad}	:d eksenli akımı (A)
X_{sq}	:q eksenli reaktansı (Ω)
X_{sd}	:d eksenli reaktansı (Ω)
E_f	:Ters elektromotor kuvveti (V)
V_1	:Faz gerilimi (V)
X_{ad}	:Endüvi sargısının d ekseninde oluşturduğu reaktans (Ω)
X_{aq}	: Endüvi sargısının q ekseninde oluşturduğu reaktans (Ω)
X_1	:Kaçak reaktans (Ω)
R_1	:Endüvi iç direnci (Ω)
δ	:Ters elektromotor kuvvet ile gerilim arasındaki açı (derece)
ψ	:Endüvi akımı ile ters elektromotor kuvveti arasındaki açı (derece)
φ	:Faz açısı (derece)
P_{in}	: Giriş gücü (W)
P_{1w}	:Bakır kaybı (W)
P_{fe}	:Demir kaybı (W)
P_{elm}	:Elektromanyetik güç (W)
H	:Manyetik alan şiddeti (AT/m)
l_c	:Manyetik alan yolu (m)
μ_m	:Malzeme geçirgenliği (H/m)
μ_0	:Boşluğun geçirgenliği (H/m)
$\mathcal{F}$	:Manyeto motor kuvvet (amper sarım)
$\mathfrak{R}$	:Relüktans (amper sarım/weber)

A	:Kesit (m^2)
l_{PM}	:Mıknatıs kalınlığı (m)
$\mu_{r,PM}$	:Mıknatısın bağıl geçirgenliği (H/m)
W	:Enerji (J)
W_c	:Ko-enerji (J)
λ	:Sargı bağ akısı (weber)
L	:Endüktans (H)
μ	:Verim

KISALTMALAR

EA	:Elektrikli Araç
EASM	:Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
SEY	:Sonlu Eleman Yöntemi
SMC	:Yumuşak Manyetik Komposit
TVHR	:Transverse Vernier Hibrid Relüktans
DSP	:Dijital Sinyal İşlemcisi
TEASM	:Toroidal Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
CEASM	:Bileşik Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
TEASMAO	:Toroidal Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Açık Oluklu
TEASM-OZ	:Toroidal Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Oluksuz
EAISM	:Eksenel Akılı İç Sabit Mıknatıslı
EASMO	:Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Oluklu
TEASMO-NN	:Toroidal Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Oluklu NN Kutublu
EASMOZ	: Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Oluksuz
ÇKEASM	:Çok Katmanlı Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
TEASMAO-NN	:Toroidal Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Açık Oluklu NN Kutublu
DAQ	:Bilgi Yakalama Kartı
EMK	:Elektro Motor Kuvvet

ŞEKİLLER

	<u>SAYFA NO</u>
Şekil II.1 Manyetik malzemelerin sınıflandırılması[72].	18
Şekil II.2 Mıknatıslı Malzemeler A)Yüksek Enerji, B)Orta Enerji, C)Düşük Enerji[72].	19
Şekil II.3 Yumuşak ve Sert Manyetik Malzemenin B-H Eğrisi	20
Şekil II.4 Azrak Toprak Elementi Mıknatıslarının Demanyetikleşme Eğrileri[75].	23
Şekil II.5 Tek taraflı EASM Makine	24
Şekil II.6 a)SMC malzeme, b)SMC'den elde edilen stator[54].	25
Şekil II.7 Eksenel Akılı Tek Rotorlu Makine(AFIPM) a)Rotor b)Stator[87].	25
Şekil II.8 a) NN tip EASMO b)NS tip EASMO[82].	26
Şekil II.9 EASMOZ Makinenin Yapısı[35].	28
Şekil II.10 100-kW, 8 Rotorlu EASM Senkron Jeneratör[63].	29
Şekil II.11 EASM Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi	33
Şekil II.12 EASM Motorun Bir Faz Vektör Diyagramı	34
Şekil II.13 TEASMAO-NN Tip Motorun Manyetik Eşdeğer Devresi	36
Şekil III.1 a)Doğrusal Malzeme, b)Doğrusal Olmayan Malzeme[77].	41
Şekil III.2 Akım endüktans ilişkisi[77].	42
Şekil III.3 Akım Değişimi Ve Gerilim Arasındaki İlişki[77].	43
Şekil III.4 Akım Değişimi Ve Gerilim Arasındaki İlişki[77].	45
Şekil III.5 Moment yönü[79].	46
Şekil III.6 Manyetik Akının a)3 boyutlu değişimi b)İki boyutlu değişimi	48
Şekil III.7 MOH nüvesinin BH eğrisi	49
Şekil III.8 Steel 1008 BH eğrisi	50
Şekil III.9 Bir Sargı Terminalinin Akım Yönü	51
Şekil III.10 Tüm Terminallerin Akım Yönü	51
Şekil III.11 Sargılardaki akım yoğunluğu	52
Şekil III.12 Manyetik Akının Değişimi a)Nüve Yüzeyinde, b)Vektörel Değişim	53
Şekil III.13 Hava Aralığının Ortasındaki Konturda Meydana Gelen Manyetik Akı Değişimi	54

Şekil III.14 Hava Aralığının Ortasındaki Konturda Meydana Gelen Manyetik Akı Değişiminin Grafiği	55
Şekil IV.1 Sargı Bağlantı Şeması	58
Şekil IV.2 Nüve ve 3 Faz Sargısı.....	58
Şekil IV.3 TEASMAO-NN Tip Motor ve Asenkron Motor Seti	59
Şekil IV.4 TEASMAO-NN Tip Motor ve Fuko Fren Seti	60
Şekil IV.5 TEASMAO-NN Tip Motorun Farklı Frekans Değerlerinde Ters EMK Dalga Şekli.....	62
Şekil IV.6 TEASMAO-NN Tip Motorun 50.64 Hz Frekansındaki Harmonik Bozulması.....	63
Şekil IV.7 TEASMAO-NN Tip Motorun Devir Ters EMK Grafiği	64
Şekil IV.8 TEASMAO-NN Tip Motorun Vuruntu Momenti.....	66
Şekil IV.9 TEASMAO-NN Tip Motorun Boş Çalışma Momenti.....	67
Şekil IV.10 TEASMAO-NN Tip Motorun 60 Hz Moment-Verim Grafiği.....	68
Şekil IV.11 TEASMAO-NN Tip Motorun 55 Hz Moment-Verim Grafiği.....	69
Şekil IV.12 TEASMAO-NN Tip Motorun 50 Hz Moment-Verim Grafiği.....	70
Şekil IV.13 TEASMAO-NN Tip Motorun 45 Hz Moment-Verim Grafiği.....	71
Şekil IV.14 TEASMAO-NN Tip Motorun 40 Hz Moment-Verim Grafiği.....	72
Şekil IV.15 TEASMAO-NN Tip Motorun 35 Hz Moment-Verim Grafiği.....	73
Şekil IV.16 TEASMAO-NN Tip Motorun 30 Hz Moment-Verim Grafiği.....	74
Şekil IV.17 TEASMAO-NN Tip Motorun Değişik Frekanslardaki Moment-Verim Grafiği	75
Şekil IV.18 TEASMAO-NN Tip Motorun Değişik Frekanslardaki Pgirış-Verim Grafiği	76
Şekil IV.19 TEASMAO-NN Tip Motorun 24 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi	77
Şekil IV.20 TEASMAO-NN Tip Motorun 32 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi	78
Şekil IV.21 TEASMAO-NN Tip Motorun 40 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi	79
Şekil IV.22 TEASMAO-NN Tip Motorun 48 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi	80
Şekil IV.23 TEASMAO-NN Tip Motorun 56 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi	81
Şekil IV.24 TEASMAO-NN Tip Motorun 64 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi	82
Şekil IV.25 TEASMAO-NN Tip Motorun 72 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi	83
Şekil IV.26 TEASMAO-NN Tip Motorun Değişik Frekans Durumları İçin Akım Moment Eğrileri.....	84

Şekil IV.27 TEASMAO-NN Tip Motorun a) 60 Hz’de Akım-Moment ve Verim Eğrisi b) 55 Hz Akım- Moment ve Verim Eğrisi	85
Şekil IV.28 TEASMAO-NN Tip Motorun a) 50 Hz’de Akım-Moment ve Verim Eğrisi b) 45 Hz Akım- Moment ve Verim Eğrisi	86
Şekil IV.29 TEASMAO-NN Tip Motorun 40 Hz’de Akım-Moment ve Verim Eğrisi	87
Şekil IV.30 TEASMAO-NN Tip Motorun 24 Nm’de Sıcaklık Zaman Grafiği	88

TABLÖLAR

	<u>SAYFA NO</u>
Tablo II.1 Seramik Mıknatısların Özellikleri[69].	21
Tablo II.2 Preslenmiş Alnico'nun Özellikleri[72].	21
Tablo II.3 Döküm Alnico'nun Özellikleri[72].	22
Tablo II.4 Samaryum Kobalt'ın Özellikleri[72]	22
Tablo III.1 Tasarımın Fiziksel Büyüklükleri	47
Tablo IV.1 Deney Setlerinde Kullanılan Ölçü Aletleri.....	61
Tablo IV.2 Rdc Direnç Değerinin Tespiti.....	65
Tablo IV.3 d-q Eksen Empedanslarının Bulunması.....	65
Tablo IV.4 60 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri	68
Tablo IV.5 55 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri	69
Tablo IV.6 50 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri	70
Tablo IV.7 45 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri	71
Tablo IV.8 40 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri	72
Tablo IV.9 35 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri	73
Tablo IV.10 30 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri	74
Tablo IV.11 24 Nm Moment Değeri için TEASMAO-NN Tip Motorun Zamanla Sıcaklık Değişimi	88

BÖLÜM I

GİRİŞ ve AMAÇ

I.1. GİRİŞ

Elektrik makineleri hayatımızın her alanında kendine yer bulmuştur. Kimi zaman mekanik enerjiyi elektrik enerjisine, kimi zamanda elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmüşlerdir. Bu dönüşüm işlemleri sırasında makinenin verimi, güç yoğunluğu, yapısı ve uygulanabilirliği önemli olmuştur. Bu yüzden de sabit olarak elektrik makineleri üzerinde verimlilik ve güç yoğunluğunu arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca elektrik makinelerinin kullanım alanları ve yerlerine göre de özel tasarım çabalarına rastlamaktayız.

Son yıllarda araç sayısının önemli derecede artması petrol tüketimini de önemli derecede arttırmıştır. Petrol rezervlerinin sınırlı olması ve birçok ülkenin petrol ürünleri konusunda dış ülkelere bağımlı olması petrol yerine elektrik enerjisini kullanan sistemlere geçişi tetiklemiştir. Bunlardan biride yeni nesil arabaların hibrid teknolojisini kullanmaları ve son birkaç yıldır da sadece elektrik enerjisini kullanan prototip araçların üretilmesidir.

Elektrikli araçlarda(EA) kullanılan motorlar da son yirmi yıldır araştırma konusu haline gelmiştir. Özellikle 1993 yılında yapılan solar enerjili araba yarışlarında üç takım fırçasız doğru akım motoru kullanmıştır. 1994 yılında çevre ile dost elektrikli araç projesi kapsamında batarya yönetim sistemine sahip güneş paneli olan ve iki adet sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoruna sahip araç geliştirilmiştir. 1997 yılında yapılan solar enerjili güneş arabasında da fırçasız doğru akım motorunun kullanıldığı görülmektedir[1 , 2].

Yeni geliştirilen elektrik motorları elektrikli araçların yanı sıra robot kollarının hareket ettirilmesi, pompa sistemleri, asansör sistemleri, direk sürücü sistemleri gibi değişik kullanım alanları da bulmuştur.

Fırçasız doğru akım motorların gelişiminin son yirmi yılda olmasının en önemli sebebi mıknatıs teknolojisindeki gelişmelerdir. 1980'lerden itibaren yüksek

manyetik akı yoğunluğuna sahip neodyum mıknatısların bulunması 19. Yüzyılda temelleri atılan fırçasız doğru akım motorlarının uygulamaya geçmesini sağlamıştır.

Fırçasız sabit mıknatıslı motorları manyetik akı yönüne bağlı olarak ikiye ayırabiliriz. Birincisi radyal akılı sabit mıknatıslı elektrik motorlarıdır. Bunlar son birkaç yıla kadar birçok yerde kendine kullanım alanı bulmuştur. Özellikle sağladıkları yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu ve düşük hızda yüksek tork başlıca özellikleridir. İkincisi ise eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlardır. Radyal akılı motorlara göre daha yüksek güç yoğunluğu ve daha yüksek moment değerlerine sahiptirler. Ayrıca yapıları gereği eksenel yöndeki uzunlukları daha kısa ve yarıçapları daha fazladır. Bu yüzden de özellikle elektrikli araçlarda teker motor olarak kullanılabilirlikleri yanı sıra arada dişli sistemine gerek duymadan direkt sürülebilen yerlerde de öncelikli olarak kullanılabilir motor türüdür.

Eksenel akılı sabit mıknatıslı(EASM) motorların özellikle elektrikli araçlar için en iyi elektrikli motor olmasından dolayı özellikle son on yıldır çalışma konusu haline gelmiştir. Yapılmış olan prototip çalışmaların yanı sıra farklı kullanım alanları da ortaya konmuş ve üstünlükleri belirtilmiştir.

EASM motorların özellikle son on yıldır çalışılan bir konu olması ve son yıllarda da elektrikli araçların prototip üretimlerinin artması EASM motorları önemli bir çalışma konusu haline getirmiştir.

Bu çalışmada laboratuvar kullanımına uygun yeni bir EASM motor tasarlanması amaçlanmaktadır. Tasarım iki EASM motorun birleşiminden oluşan hibrid bir yapıdır. Birincisi toroidal nüveli oluksuz tip EASM motorun çok katmanlı sargı yapısıdır. İkincisi ise açık oluklu nüveli toroidal EASM motordur. Bu iki motorun birleşiminden tasarlanan yeni EASM motor iki motorun da parametrelerini iyileştirici özelliklere sahiptir. Ayrıca laboratuvar uygulamasına uygun yapılarak rotor ve stator gibi önemli parçalarının değiştirilebilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle motor performansını iyileştirici tasarımlar yapıp denenebilecektir.

Bölüm I'de çalışmanın amacı belirlendikten sonra literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Bölüm II'de EASM motorda kullanılan malzemelerin özelliklerine yer verilmiştir. Ayrıca EASM motorların sınıflandırılması verilerek genel eşitlikleri ile elektriksel ve manyetik eşdeğer devreleri verilmiştir.

Bölüm III’de manyetik analiz süreçleri verilerek tasarımı yapılacak EASM motorun manyetik analizi 3D sonlu elemanlar yöntemini(SEY) kullanan maxwell programı ile gerçekleştirilmiştir.

Bölüm IV’de tasarlanan EASM motorun üretim süreci ve yapılan deneylerden alınan sonuçlar verilmiştir.

Bölüm V’de alınan sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılarak tasarlanan eksenel akıllı motorun üstünlükleri ortaya konmuştur.

Bölüm VI’da ise değerlendirmeler ve öneriler kısmı verilmiştir. Tasarımı yapılan motorun olumlu ve olumsuz yönleri ortaya konarak ileriki çalışmaların neler olabileceği irdelenmiştir.

1.2. ÇALIŞMANIN AMACI

Özellikle elektrikli araçlardaki gelişmeler sabit mıknatıslı motorlar üzerinde durulmasını sağlamıştır. Elektrikli bir araçta kullanılacak olan motorun karşılaması gereken özellikler kalkınma momentinin yüksek olması, kompakt yapıda olması ve verimli olmasıdır. Bu gereksinimleri karşılayan motor tipide sabit mıknatıslı elektrik motorlarıdır. Özellikle de EASM motorlar önceliklidir. Fakat 1821 yılında Faraday tarafından tasarlanan ve 1837 yılında Davenport tarafından patenti alınan bu motorlar neodyum mıknatısın bulunması ve fiyatlarının son yıllarda düşmesinden dolayı son on yıldır araştırma konusu haline gelmiştir.

EASM motorlar üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde genel eşitliklerin çıkarılması, farklı tipte prototip motorlar, akı zayıflatma teknikleri, vuruğu momentinin giderilmesi ve farklı kullanım alanları üzerine yapılan çalışmaların olduğu görülmektedir. Çok nadir sayıda çalışma laboratuvar kullanımına yöneliktir. Ayrıca çalışmalar incelendiğinde genellikle kullanılan mıknatıs tiplerinin trapezoidal yapıda olduğu görülmektedir. Bu da maliyet ve kolay bulunabilirlik açısından dezavantajlı bir durumdur. Bunun yanı sıra stator yapıları incelendiğinde genellikle oluklu yapılar kullanılarak bu tip motorların dezavantajlarını gidermek için değişik çalışmalar yapılmıştır. Rotor yapılarında kullanılan mıknatıslara bakıldığında ise başlıca trapezoidal yapıda kullanılan mıknatıslar üzerine yapısal değişiklikler yapılarak vuruğu momentini giderici ve sinüzoidal ters elektromotor kuvveti oluşturmaya yönelik çalışmalar olduğu görülmektedir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar göz önüne alınarak yapılacak bu çalışmada öncelikle laboratuvar kullanımına yönelik bir tasarım oluşturulacaktır. Böylelikle farklı tipte EASM makine tasarlanıp deneysel çalışma imkânı elde edilecektir. Nihai amaç ise oluksuz tipte nüveli EASM motor ile açık oluklu nüveli EASM motorun birleşiminden oluşan hibrid bir yapı ile her iki motor tipinin performansını arttırmak ve dezavantajlarını gidermektir.

I.3. LİTERATÜR

1997 yılında Shimizu ve arkadaşları 1994 yılında başlayan eco adlı elektrikli araç projesi ile bir teker motor batarya yönetim sistemine sahip güneş paneli olan bir araç geliştirmişlerdir. Burada arka iki tekerleğe sabit mıknatıslı fırçasız dc motor takılmıştır[1].

1997 yılında Lovatt ve arkadaşları fırçasız doğru akım motorunu solar enerjili güneş arabasında kullanmışlardır. Fırçasız sabit mıknatıslı motorların yüksek akı yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle elektrikli araçlarda kullanılabilecek en uygun motor olduğu belirtilmiştir[2].

1995 yılında Patterson ve Spee güneş enerjili bir elektrikli araç için direkt sürülen EASM motor tasarımı ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Akı zayıflatma için hava aralığının ayarlanması gerektiği belirtilmiştir[3].

1997 yılında Profumo ve arkadaşları eksenel akılı motorları elektrikli araçlar için yeni bir sürücü sistem olarak tanıtmışlardır. Özellikle elektrikli araçlar için gerekli olan yüksek momenti eksenel akılı indüksiyon ve senkron motorların karşılayabileceği belirtilmiştir[4].

1996 yılında Hredzak ve Gair yaptıkları çalışmada EASM motorun statorunu direkt tekerlek miline bağlayarak tasarım geliştirmişlerdir. Dolayısıyla EASM motorun ürettiği moment yol koşullarından etkilenmiştir. Bu durumu gidermek için de vektör kontrol uygulaması gerçekleştirmişlerdir[5].

1996 yılında Caricchi ve arkadaşları su soğutmalı çok katmanlı sabit mıknatıslı EASM motor tasarlamışlardır. Oluksuz makinelerin verimlilik, hafiflik ve kompakt yapısı nedeniyle elektrikli araçlar için en iyi tercih olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada fırçasız makinelere göre ac ve fırçalı dc makinelerin direk sürüş uygulamasında zayıf moment yoğunlukları ve aşırı yük kapasiteleri açısından zayıf oldukları belirtilmiştir. Bununla birlikte trapezoidal sargıların uç sargılarından dolayı

I^2R oranına bağı olan moment miktarının düşük olduğu ve bu durumun rhomboidal sargılar ile giderildiği ifade edilmiştir. Ayrıca makine parametreleri arasında sargı parametreleri ve λ (nüve iç çapının dış çapa oranı)'nın uygun değerlerinin önemi vurgulanmıştır[6].

1997 yılında Wallace ve arkadaşları EASM senkron jeneratör tasarımı ve üretimini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada EASM makinelerin radyal akılı makineler göre daha verimli olduğu da vurgulanmıştır[7].

1998 yılında Hsu sabit mıknatıslı motor için yeni bir alan zayıflatma tekniği önermiştir. EASM motorlarda mıknatısların oluşturduğu akı sabittir. Hız arttıkça motorun ürettiği momente gereksinim azalır bu yüzden de manyetik akının azaltılması yani zayıflatılması gerekmektedir. Bunun için bu çalışmadan önce yapılan çalışmalar 'd' eksen akımının değiştirilmesine dayanıyordu. Bunun yerine bu çalışmada ilk defa olarak ikinci bir sargı sisteme yerleştirilerek yumuşak manyetik malzeme üzerinde akı oluşturmakta ve böylece geniş aralıkta alan zayıflatma mümkün olmaktadır. Bu yöntemin tek dezavantajı ise mıknatısların manyetik özelliklerinin kaybolmasına neden olabilmektedir[9].

1998 yılında Profumo ve arkadaşları güçlendirilmiş yumuşak manyetik kompozit(SMC) materyali ile içe yerleştirilen mıknatıslara sahip EASM motor tasarlamışlardır. Mıknatıslar rotorun içine gömülerek akı zayıflatma tekniği uygulamışlardır. Ayrıca akı bariyeri tabiri ile iki mıknatıs arasındaki mesafenin önemli olduğu ve bunun halen süren araştırma konusu olduğu vurgulanmıştır. Bu mesafenin makine performansını da etkilediği vurgulanmıştır[10].

1999 yılında Huang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada eksenel akılı motorun genel eşitliklerini çıkartmışlardır. Eksenel akılı sabit mıknatıslı(EASM) motorlar için en önemli parametrenin iç çapın dış çapa oranı olan λ 'nın uygun değerinin seçilmesinin EASM'de en iyi elektriksel ve manyetik yüke yol açtığını belirtmişlerdir. Bulunan bir sonuçta λ 'nın güç yoğunluğu üzerine etkisinin de olduğu vurgulanmıştır. λ 'nın elektriksel yük, akı yoğunluğu, frekans, materyal ve makine topolojisine bağlı olduğu ve kesin bir değere indirgenemeyeceği de belirtilmiştir[11].

1999 yılında Sakai ve arkadaşları dört tekerleği teker motor ile sürülen elektrikli aracın hareket kontrol yöntemini sunmuşlardır. Bu çalışmada yeni bir robust dinamik yaw moment kontrolör önerilmiştir[12].

2001 yılında Parviainen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada iki stator tek rotorlu yapıya sahip EASM motorda sinüsoidal olarak şekillendirilmiş mıknatıslar kullanarak sinüsoidal ters elektromotor kuvvet elde etmeyi başarmışlardır. Fakat yapım maliyetinin yüksek olduğu ve mıknatıs hacmindeki azalma dezavantaj olarak belirtilmiştir[13].

2001 yılında Aydın ve arkadaşları oluklu ve oluksuz torus tip yüzey yerleştirmeli eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun tasarımını ve 3D elektromanyetik alan analizini yapmışlardır. Optimum makine tasarımında kutup yay oranının ve kaykı açısının önemli olduğunu vurgulamışlardır. Vuruntu momentini ve moment dalgacıklarını azaltmak için 3D sonlu elemanlar yöntemini kullanan programlar ile analizler gerçekleştirilmiştir. EASM makinelerde λ 'nın ve hava aralığının önemli birer tasarım parametresi olduğu belirtilmiştir. Moment dalgacıklarının giderilmesinde kutup yay oranının etkili olduğu ve torus NS tip EASM makinelerin moment dalgacıklarının torus S tip EASM göre daha az olduğu vurgulanmıştır[14].

2001 yılında Huang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada prototip çalışmalar öncesinde torus konseptindeki EASM motorların tasarım parametrelerini sunmuşlardır. Yapılan bu çalışmada 3D sonlu elemanlar yöntemini kullanan yazılımlar kullanılmıştır. Ayrıca NN tip ve NS tip EASM motorların karşılaştırılmasında avantajlar ve dezavantajlar belirtilmiştir[15].

2002 yılında Aydın ve arkadaşları yeni bir yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı ve alan kontrollü torus tip makine tasarlamışlardır. Yapılan bu çalışmanın özelliği statora doğru akım sargıları yerleştirilerek hava aralığındaki akı kontrol edilmiştir. Diğer alan zayıflatma tekniklerindeki demanyetikleşme akısı oluşmamaktadır ve tam olarak alan zayıflatma mümkün olmuştur[16].

2002 yılında Gieras ve arkadaşları nüvesiz EASM motorun performansını değerlendirmişlerdir. Halbach dizilimi kullanarak hava aralığı akısını 0,6 Teslaya çıkartmışlardır. Bu değerin yüksek güçlü makineler için yeterli olduğu vurgulanmıştır. Verimlilik ve çıkış gücü bakımından ferromanyetik nüvelere göre %1 daha yüksek verimliliğe ve %82 daha fazla çıkış gücüne sahip oldukları belirtilmiştir. Tek dezavantajı olarak mil birleşim noktasında oluşan kuvvetlerden dolayı disk çapının arttırılamadığı bu problemi gidermek için çok katmanlı yapıların oluşturulması gerektiği belirtilmiştir[17].

2002 yılında Caricchi ve arkadaşları vuruuntu momentini ve güç kayıplarını azaltmak için deneysel bir düzenek oluşturmuşlardır. Oluşturulan düzenekle kullanılan dikdörtgen mıknatıslar açısız olarak döndürülebilmektedir. Ayrıca oluk başları manyetik olan somaloy(yumuşak manyetik kompozit SMC) ve manyetik olmayan malzemeler ile kapatılarak makine üzerine etkisi araştırılmıştır. Somaloy çubuklar ile olukların kapatılması vuruuntu momentini %40 oranında azaltmıştır. Ayrıca güç kayıpları ise 160 watt dan 83 watt'a kadar inmiştir. Bununla birlikte mıknatısların kendi eksenini etrafında 30 derecelik kaydırılması ile vuruuntu momenti 43 Nm'den 9 Nm'ye kadar inmiştir[19 , 29].

2003 yılında Aydın ve arkadaşları çok rotorlu yüzey yerleştirmeli EASM motor için vuruuntu momentini azaltan teknikleri ortaya koymuşlardır. Moment kalitesinin değişik hız uygulamaları için çok önemli olduğu vurgulanmıştır. Moment dalgalıklarının gerilim ve akım harmoniklerinden, vuruuntu momentinin ise rotor manyetik alanının stator relüktansının açısız değişiminden kaynakladığını belirtmişlerdir. Vuruuntu momentini azaltmak için sunulan yeni yöntem değişik kutup yay oranlarının kullanılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem oluklu iki rotorlu tek statorlu NN tip eksenel akılı sabit mıknatıslı motora uygulanmıştır. Sonuç olarak bu yöntemin diğer yöntemlere göre avantajları: maksimum moment değişmezken vuruuntu momentinin azalması, aynı tepe moment değeri için daha az mıknatıs maliyeti ve daha yüksek moment yoğunluğu olarak sıralanmıştır[21].

2003 yılında Liu ve arkadaşları elektrikli araçlar için kullanılan tek taraflı EASM motorun alan yönlendirmeli kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Alan yönlendirmeli kontrol ile tam hız, pozisyon ve moment kontrolünün gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada EASM motorun en uygun moment eğrisine karar verilmiştir. Ayrıca tek taraflı EASM motorda eksenel kuvvetlerin bilyeler üzerindeki olumsuz etkisi de vurgulanmıştır[22].

2003 yılında Espanet ve arkadaşları yüksek momente sahip yeni bir EASM motor sunmuşlardır. Tasarlanan motor tranverse vernier hibrid relüktans(TVHR) motordur. Sunulan bu yeni motor düşük mıknatıs hacminde sağladığı yüksek momente karşın üretim aşamasında birçok fiziksel, elektriksel, termal ve mekanik sorunu aşması gerekmektedir[23].

2003 yılında Parvanien ve arkadaşları laboratuvar kullanımı için yeni bir eksenel akılı sabit mıknatıslı motor tasarlamışlardır. Bu motor çift taraflı iki rotor ile tek

tarafalı iki statordan oluşmaktadır. Laboratuvar ortamında birçok parçası değiştirilerek motor üzerindeki etkilerinin incelenebileceği bir düzenek oluşturulmuştur. Bu çalışmada λ 'nın teoriksel olarak uygun değerinin 0,58 civarı olduğu ve tasarımı da λ 'nın 0,6 alındığı belirtilmiştir[24].

2003 yılında Yinghui ve arkadaşları elektrikli araçlarda kullanılan teker motor için dijital sinyal işlemcisi(DSP) tabanlı yeni bir kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Tasarım faz akımlarının ölçümüne dayanmaktadır. Tasarlanan kontrol sisteminde aracın virajlarda i ve dış tekerleklerindeki gerekli moment ve hız farklılıklarını, kullanılan DSP tabanlı kontrol algoritması ile elektriksel olarak kontrol edilmesine dayanmaktadır. Böylece mekanik sistemler yerine elektriksel olarak çok daha hızlı kontrol yapılabilmektedir[25].

2004 yılında Mendrela ve Jagiela ıkık kutuplu statora sahip sabit mıknatıslı bir fazlı motorun momentini geliştirmek için analiz yapmıştır. Bunun için 3D sonlu elemanlar ile tasarım modellenmiş ve açıya bağlı olarak moment değişimlerine karar verilmiştir. Elektromanyetik moment üzerine komitasyon açısının etkisi yapılan benzetim ile incelenmiştir. Tasarlanan bu motorun yüksek moment dalgalanmaları olduğunu ve bu yüzden de yumuşak moment gereksinimi olan yerlerde kullanımının zor olduğu belirtilmiştir[26].

2004 yılında Rahman ve arkadaşları yk hücresine sahip hibrid bir elektrikli araçta sabit mıknatıslı toroidal sargılı NN tip oluklu bir yapıya sahip eksenel akılı motor kullanmışlardır. Eksenel akılı motorda sabit güç aralığı ve yüksek hız verimliliğini geliştirmek için makine indüktansını arttıran tasarımlar yapmışlardır. Bununla birlikte mıknatısların konumları ayarlanarak vurutu ve anlık moment dalgalanmaları azaltılmıştır. Yapılan bu çalışmada nüvesiz tip eksenel akılı motorların düşük indüktansa sahip olduğu bunun da makinenin sabit güç aralığında çalışmakta zorluk çektiği vurgulanmıştır[27].

2004 yılında Upadhyay ve arkadaşları elektrikli bisiklette kullanılacak EASM motorun sargı yapısını tasarlamışlardır. Tasarımlarındaki hava aralığı akısı 0,282 Tesla'dır[28].

2004 yılında Liu ve arkadaşları EASM yüzey yerleştirmeli tek tarafalı motor için analitik geliştirme prosedürü sunmuşlardır. Bu yöntemi 3D sonlu elemanlar yöntemi ile de desteklemişlerdir. 3D sonlu eleman yöntemi ile toplam akı yoğunluğunu ölçmüşlerdir[30].

2004 yılında Hori elektrikli araca dört adet teker motor monte ederek yön kontrol, viraj kontrol ve fren kontrol uygulaması gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen uygulamada elektrik motorlarının içten yanmalı motorlara göre 10-100 kat daha hızlı cevap verebildiği belirtilmiştir. Bu avantajı ve dört tekerleğinde birbirinden bağımsız olarak moment ve hız kontrolünün yapılabilmesinden dolayı viraj kontrol, yön kontrol ve fren kontrol uygulamalarının içten yanmalı motorlara göre çok daha hızlı ve kesin yapılabildiği belirtilmiştir[31].

2004 yılında Fujimoto ve arkadaşları iki teker motora sahip elektrikli araçta hareket kontrolü ve yol tahmini gerçekleştirmişlerdir. Bunun için gözlemleyici kullanmışlardır. Ayrıca her tekerleğin çok hızlı moment yanıtı verdiğini ve bunun kontrol açısından önemli olduğunu belirtmişlerdir[32].

2004 yılında Chul Oh ve Emadi hibrid elektrikli araçlar için eksenel akıllı motor karakteristiklerinin benzetimini ve testlerini gerçekleştirmişlerdir. Hava aralığını mekanik olarak değiştirerek alan zayıflatma yapmışlardır. Bu teknik sayesinde verimlilik üzerinde değişiklik olmadan alan zayıflatmanın mümkün olduğu belirtilmiştir[33].

2005 yılında Bolognani ve arkadaşları yüksek performanslı sabit mıknatıslı motorları kullanan sistemlerin tekerlek sürüş sistemlerinin kontrolünü tasarlamışlardır. Elektrikli araçlar için herhangi bir yol şartında tam ve uygun pozisyon kontrolü önemlidir. Bu amaçla pozisyon kontrolü yapılmıştır[34].

2005 yılında Crescimbeni ve arkadaşları hibrid araçlar için kompakt EASM jeneratör tasarlamışlardır. Tasarlanan jeneratör de tek stator iki rotor ve oluksuz tipte sargılar kullanılmıştır. Geleneksel makinelere göre yüksek moment ve güç yoğunluğuna sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca litz wire iletkenleri kullanılarak 4 turdan oluşan tek katlı sarım kullanılmıştır. Böylelikle yapım kolaylığı sağlanmıştır[35].

2005 yılında Yang ve Wang EASM motorların kullanıldığı elektrikli araçlarda yeni bir elektronik vites önermişlerdir. Bunu kullanılan sargıların farklı bağlantıları ile gerçekleştirmişlerdir. Böylece aynı güçte farklı hız aralıkları sağlanmıştır[18 , 20 , 37].

2005 yılında He ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yeni hareket kontrol sistemlerini sunmuşlardır. Teker motora sahip elektrikli araç üzerinde ileri beslemeli kontrol, durum geri beslemeli kontrol, direk sapma moment kontrolü gibi değişik

kontroller denenmiştir. Elektrik motorların çok hızlı cevap verme sürelerinden dolayı sürüş momentinin çok hızlı bir şekilde kontrol edilebileceği vurgulanmıştır[36].

2006 yılında Locment ve arkadaşları yedi fazlı çift rotorlu EASM senkron motoru 3D sonlu elemanlarla ve analitik olarak incelemişlerdir. Bu tip makinelerin üç fazlı makinelere oranla indüktansları, harmonikleri ve elektromotor kuvvetlerinin daha hassas olduğunu ortaya koymuşlardır. Bunun yanında yüksek güvenilirlik, yüksek moment yoğunluğu ve düşük moment dalgalanmasına sahip olduklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmayı iki rotor tek statora sahip NN tip toroidal eksenel akılı(TEASM) makinede gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca daha kesin modelleme yöntemlerine gereksinim olduğu da ortaya konmuştur[38].

2006 yılında Upadhyay ve Rajagopal eksenel akılı sabit mıknatıslı fırçasız dc motorun sonlu elemanlarla tasarımını ve bilgisayar destekli analizini yapmışlardır. Yapılan tasarımda faz sayısının, oluk\kutup\faz oranı, mıknatıs ve kutup sayısı, sabit mıknatıs özelliği, sargı faktörü ve akım yoğunluğu gibi parametrelerin önceden tespit edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca dış ve iç çapın uygun seçilmesinin önemli olduğu da belirtilmiştir[39]

2006 yılında Park ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada nüvesiz EASM motorların elektriksel karakteristiklerini incelemişlerdir. Nüvesiz motorlarda akım kontrolü ile manyetik akının kontrolünün zor olduğunu ve bu yüzden de bu tip motorların sabit güç isteyen yerlerde örneğin fan gibi uygulamalarda kullanılmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dikdörtgen mıknatısların trapezoidal mıknatıslara göre maliyet açısından daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte nüvesiz EASM motorların en önemli avantajının yüksek hız ve düşük moment uygulamaları olduğu belirtilmiştir[40].

2006 yılında Tapia ve arkadaşları yüzey yerleştirmeli alan zayıflatma kabiliyetine sahip eksenel akılı makine tasarlamışlardır. Alan zayıflatmayı başarmak için rotoru mıknatıs ve yumuşak demirden oluşan bir yapıda tasarlamışlardır. Tasarımı 3D sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Tasarımda mıknatıs ve demir oranının akı kontrol yeteneği üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Tasarımın dezavantajının ise mıknatıs hacmindeki azalma ve trapezoidal sargıdan dolayı akı yoğunluğunun stator dişlerinde bozulmalara neden olduğu belirtilmiştir[41].

2006 yılında Jo ve arkadaşları eksenel akılı sabit mıknatıslı makinelerde mıknatıslara sonlu eleman yöntemini kullanan paket programlar yardımıyla 0'dan 6 dereceye kadar kayk verilerle performans üzerine etkileri incelenmiştir. Analizler sonucu ters elektromotor kuvveti, kaçak akılar ve vurunu momentine bakılmış ve kayk açısının artmasıyla kaçak akıların arttığı ve vurunu momentinin değışmediğı görülmüştür[42].

2006 yılında Mardaneh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada EASM motorun manyetik alanı analitik ve 2D SEY ile modellenmiştir. İki yöntemin karşılaştırılması sonucunda analitik hesaplamalarında geçerliliğı ortaya konmuştur. Bununla birlikte genetik algoritmalar kullanılarak optimal tasarım gerçekleştirilmiştir[43].

2007 yılında Yang ve Chuang küçük elektrikli araçlar için teker motor tasarımı ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Tasarım parametrelerinde dış çap, iç çap ve hava aralığının momente etki ettiğini, mıknatıs kalınlığı ve kayk açısının tüm motor performansını özellikle maksimum momenti etkilediğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte dış kalınlığı, oluk açıklığı ve derinliği, rotor demir kalınlığının moment, moment yoğunluğu, verimlilik ve hız gibi değışkenler üzerinde etkili olmadığı vurgulanmış ve tasarım parametrelerinde dikkate alınmadığı belirtilmiştir. Sargı kalınlığı, sipir sayısı ve sargı kat sayısının manyeto motor kuvvete etkili olduğu belirtilmiştir. Bu yüzden bu parametreler maksimum moment ve hız arasında seçilmesi gereken önemli tasarım parametreleri olduğu vurgulanmıştır[44].

2007 yılında Aydın ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada EASM motorlar üzerinde vurunu momentini gidermek için tasarım konseptleri sunmuşlardır. Radyal akılı motorlardaki vurunu momenti azaltma yöntemlerinin EASM motorlara da uygulanabileceğini fakat stator üretme maliyetlerinin çok yüksek olduğu belirtilmiştir. Bundan dolayı alternatif stator üretme tekniklerine ihtiyaç olduğu ortaya konmuştur. Statora tarafında oluk sayısının kutup sayısına oranı, stator dişlerine yardımcı olukların açılması, karşılıklı oluklardaki oluk açıklıklarının kaydırılması yöntemleri uygulandığı belirtilmiştir. Rotor tarafında ise mıknatıs kayk teknikleri, dairesel mıknatıslar, iki farklı mıknatıs adımının kullanılması ve iki rotorun dairesel olarak ötelenmesinin vurunu momentinin etkisinin azalttığı belirtilmiştir[45].

2007 yılında Yang ve arkadaşları ultra kapasitörlerle direkt sürülen elektrikli araçlar için elektriksel vites geliştirmişlerdir. Ayrıca yaptıkları çalışmada dört fazlı eksenel akılı motor üzerinde enerji yönetim sistemi uygulamışlardır. Bununla birlikte motor sargıları paralel ve seri bağlanarak yüksek ve düşük hız gereksinimleri de sağlanmıştır[46].

2007 yılında Kuronen ve Pyrhönen EASM motor momentinin analitik hesaplamasını gerçekleştirmişlerdir. Analitik hesaplama için önce kutupları açışal parçalara bölmüşlerdir. İkinci adımda her bir elementi bireysel olarak iki boyutlu akı problemi olarak hesaplamışlardır. Son olarak ta makinenin bir kutbu için hesaplanan değerleri toplamışlardır. Bu yöntemin sonlu elemanlar yöntemini kullanan programlara göre daha az kesin olmasının yanında daha hızlı olduğu belirtilmiştir[47].

2007 yılında Belicova ve arkadaşları EASM motorun geçici ısı ve elektriksel analizini yapmışlardır[49].

2007 yılında Rahim ve arkadaşları direkt sürülen elektrikli araçlar için oluksuz tipte EASM dc motor tasarlamışlardır. Tasarım sürecinde maxwell 3D kullanılmıştır. Motor performansı hava aralığı, sabit mıknatıslar ve sargı boyutlarının uygun değerlerde seçilmesiyle iyileştirilmiştir. Ayrıca radyal akılı motorlarla da karşılaştırılarak daha yüksek elektromanyetik moment sağladıkları belirtilmiştir[50].

2007 yılında Letelier ve arkadaşları EASM oluklu tip motorun vuru momentini azaltmak için mıknatıs kaykısını ve oluk kaydırma tekniğini uygulamışlar ve önemli derecede vuru momentini gidermişlerdir. Vuru momentinin sabit mıknatıslı makineler için bir ses ve titreşim kaynağı olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında vuru momentinin manyetik akı yoğunluğu ve relüktans değişiminin bir oranı olduğu belirtilmiştir[51].

2008 yılında Hüner ve arkadaşları yaptıkları çalışmada eksenel akılı motorların elektrikli araçlarda kullanımına dair literatür taramasını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma incelendiğinde eksenel akılı motorların yüksek güç yoğunluğu ve düşük ağırlığından dolayı elektrikli araçlarda kullanılabilecek önemli bir motor olduğu görülmektedir[52].

2008 yılında Gonzalez ve arkadaşları alan zayıflatma kabiliyetine sahip yeni bir trapezodial sargılı eksenel akılı makine tasarlayıp test etmişlerdir. Geleneksel yöntem olan vektör kontrolünde enjekte edilen ters d eksen manyetik akısı

mıknatısların manyetik özelliğinin kaybolmasına neden olabilmektedir. Önerilen alan zayıflatma tekniği ise d eksenli manyetik akısının kontrolüne dayanmaktadır. Bu yöntemde rotorda oluşturulan yumuşak demir bölgeler sayesinde düşük relüktansa sahip bölgeler oluşturulmuştur. Böylece mıknatıslar ters manyetik alan bölgesi dışında kalmaktadır. Bu yöntem sayesinde %40 oranında hava aralığı akısı azaltılabilmektedir[53].

2008 yılında Marignetti ve arkadaşları eksenel akılı senkron makinenin termal davranışını 3D termal manyetik sonlu elemanlar analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Tasarlanan motor da sargılar yumuşak manyetik kompozit(SMC) malzeme üzerine açılan oluklara sarılmıştır. Ayrıca kullanılan epoxy reçinenin makine yük performansını geliştirdiği de belirtilmiştir[54].

2008 yılında Marignetti ve arkadaşları kesirli bir sargıya sahip tek stator iki rotorlu bir yapıya sahip EASM senkron motor tasarlamışlardır. Hava aralığı akısı 0.55 Tesla olarak hesaplanmıştır. Oluk ve kutup seçiminin uygun değerde seçilmesinin ters elektromotor kuvvetini geliştirdiği belirtilmiştir[55].

2008 yılında Fei ve arkadaşları yeni bir TEASM motor tasarlayıp uygulamışlardır. En önemli özelliği sargıların sarıldığı ayakların lamine edilmiş saçlardan oluşmasıdır. Böylelikle önceki yapılan oluklu tip statorlar ve yumuşak manyetik kompozit kullanılarak yapılan statorların yapım maliyetleri düşürülmüştür[56].

2009 yılında Sadeghierad ve arkadaşları tarafından yapılan yüksek hızlı eksenel akılı jeneratörün hava aralığı hassasiyeti araştırılmıştır. Tasarlanan jeneratörün hava aralığı 0,462 tesladır[57].

2009 Choi ve arkadaşları vuruş momentini azaltmak için 3D sonlu elemanlar yöntemi yerine matematiksel hesaplama yöntemleri kullanarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Kaykı açısının vuruş momenti üzerine olan etkisi belirtilmiş ve uygun tasarım yapılırken matematiksel yaklaşımın daha kısa sürelerde gerçekleştirildiği belirtilmiştir[58].

2009 yılında Fan ve arkadaşları yeni bir compound eksenel akılı sabit mıknatıslı(CEASM) senkron motoru direkt sürülen bir benzin pompalama kulesinde kullanmışlardır. Kullanılan bu CEASM sayesinde %61 enerji tüketimi yapıldığı ve ses seviyesinin de 1 m civarında 58dB geçmediği ortaya konmuştur[60].

2009 yılında Hüner ve Aküner yaptıkları çalışmada eksenel akılı motorların yapısı, yapılan prototip çalışmalar ve kontrol sistemleri üzerine literatür taraması vermişlerdir[59].

2010 yılında Al Zaher ve arkadaşları güneş enerjili araçlar için radyal ve eksenel akılı motorları karşılaştırmışlardır. Eksenel akılı motorların düşük momentte daha verimli olduğu bulunmuştur. Ayrıca demir nüvesiz eksenel akılı motorların radyal akılı motorlara karşı iyi bir alternatif olduğunu da kanıtlamışlardır[61].

2010 yılında Seo ve arkadaşları robot eklem modülleri için eksenel akılı motor tasarlamışlardır. Eksenel akılı motorların robotlar için gerekli olan ince yapı ve yüksek moment ihtiyacını karşılayabildiğini belirtmişlerdir[62].

2010 yılında Qiu-ling ve arkadaşları paket saçlardan oluşmuş yeni bir torus eksenel akılı motor tasarlamışlardır. Özellikle elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tasarlanan EASM motorun tasarım ve üretim aşaması kolay ve basittir. Tasarımın ürettiği gerilim sinüzoidale yakındır ve vuruğu momenti çok düşüktür. Bu tasarımın analitik ve SEY analizleri yapılmıştır[83].

2010 yılında Luise ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sabit mıknatıslı motorların yüksek hızlardaki akı zayıflatma gereksinimleri ortaya konmuştur. Bunu başarmak için manyetik takozlarla birlikte inverter sistemi önermişlerdir. Böylelikle maliyetli birçok mekanik değişiklik yerine önerilen yöntemin istenilen faz endüktansını yükselttiği böylelikle de akı zayıflatmanın mümkün olduğu belirtilmiştir[84].

2010 yılında Jussile ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada endüstriyel kullanım için trapezoidal sargılı ve açık oluklu bir EASM motor tasarlamışlardır. Tasarım tek rotor ve iki statordan oluşmaktadır. Rotor tamamen demir nüvesizdir. Açık oluklu sistemlerin eddy akımlarının meydana getirdiği kayıpların çok olduğu vurgulanmıştır. Bu kayıpları azaltmak içinde enine ve boyuna katmanları olan mıknatıslar kullanarak katmansız mıknatıslara göre kayıpların azaldığı deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada EASM motorların radyal akılı motorların kullanıldığı birçok uygulamada kullanılabilirliği de belirtilmiştir[81].

2011 yılında Nguyen ve arkadaşları 1,5 oluk/kutup/faz ve 2 oluk/kutup/faz değerlerine sahip EASM motor için vuruğu momenti, elektromanyetik moment ve moment dalgalanmaları açısından sonlu elemanlar yöntemi(SEY) ve deneysel sonuçları içeren bir çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada kullanılan EASM

motor enerji depolamaya yarayan flywell motor olarak tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada demir kayıplarına mıknatıs harmonikleri ile stator oluklarının neden olduğu harmoniklerin yanı sıra uygulanan PWM sinyallerinin de etkili olduğu belirtilmiştir. Zamana bağlı olan PWM sinyallerinin neden olduğu kayıpların öncelikli olduğu vurgulanmıştır[80].

2011 yılında Mahmoudi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada dört farklı EASM motorun güç yoğunluğu, moment kalitesi yönünden karşılaştırılması verilmiştir. Bu motorlar sırasıyla torus tip oluklu, torus tip oluksuz, eksenel akılı tek rotorlu(AFIR) oluklu tip ve AFIR oluksuz tip motorlardır. Yapılan çalışmada SEY kullanılmıştır. Torus tip yapının yüksek güç yoğunluğu, yüksek akım yoğunluğu ve düşük elektriksel yükü olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada çapın oranı ve hava aralığı manyetik akının en önemli tasarım parametreleri olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca karşılaştırılan motorların 20KW'a kadar olanlarında hacim yönünden büyük bir farkın olmadığı ve daha büyük güçlerde hacim yönünden farklılık olduğu belirtilmiştir. Torus tip makinelerin rüzgar jeneratörleri için uygun bir makine olduğu vurgulanmıştır[87].

2011 yılında Aküner ve Hüner yaptıkları çalışmada eksenel akılı motorlarda hava aralığı ve mıknatıs açısının uygun değerinin belirlenmesi için 3 boyutlu manyetik analiz programını kullanmışlardır. Hava aralığında 0,5 tesla manyetik akı yoğunluğu temel alınarak kullanılan neodyum mıknatıslar için hava aralığı değeri 4mm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca mıknatısların arasındaki açının 26^0 olduğunda motordan en büyük momentin elde edildiği 3 boyutlu manyetik alan programı ile hesaplatılmıştır[85].

2012 yılında Aküner ve Hüner yaptıkları çalışmada açık oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı elektrik makine tasarımı, manyetik analizi ve deneysel çalışmasını sunmuşlardır. Bu çalışmada kullanılan açık oluk yapısı sayesinde stator yapım maliyetlerinin düşürüldüğü belirtilmiştir. Bununla birlikte kullanılan dikdörtgen geometrideki mıknatıslarda motor yapım maliyetini düşürmede önemli bir etkisi vardır[88].

2012 yılında Donato ve arkadaşları tek stator çift rotor yapısına sahip eksenel akılı generatör için kesirli sargı yapısını deneysel ve sonlu eleman analizi ile gerçekleştirmişlerdir. Kesirli sargı yapısı sayesinde manyetik alan dışında kalan sargı sonunun kısaldığı bunun da makine performansını arttırdığını belirtmişlerdir[89].

2012 yılında Jian ve arkadaşları yaptıkları çalışmada eksenel akılı senkron generatör için doğal soğutmalı termal tasarım sunmuşlardır. Yapılan çalışmada eksenel akılı generatörlerin yüksek güç sağlamasından dolayı termal problemlerin olacağı vurgulanmıştır. Bundan dolayı yapılan çalışmada 3 boyutlu sonlu eleman yöntemi ile modellemenin yanında termal ve akışkan dinamik modelleri oluşturularak analizler yapılmıştır. Analizler doğrultusunda tasarım oluşturularak tam yük için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir[90].

Yapılan çalışmalar aşağıda maddeler halinde sıralanabilir.

- Farklı EASM makine prototiplerinin tasarlanması ve uygulanması
- EASM motorların vuru momentinin giderilmesi
- EASM motorlarda akı zayıflatma tekniklerinin uygulanması
- Genel eşitliklerinin çıkarılması
- EASM makinelerin farklı alanlarda uygulanması.

Yapılan bu çalışmada da özgün bir toroidal sargılı açık oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı NN tip (TEASMAO-NN) motor tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarımı yapılan TEASMAO-NN tip motor tek katlı sarılan oluksuz nüveli toroidal eksenel akılı sabit mıknatıslı (TEASM-OZ) motorların performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

BÖLÜM II EKSENEL AKILI MAKİNELER

EKSENEL AKILI MAKİNELER

Eksenel akılı sabit mıknatıslı(EASM) makineler yapı itibari ile disk şeklindedir. Temelleri 1831 yılında Faraday tarafından tasarlanan makineye dayanmaktadır. 1837 yılında ise Davenport tarafından radyal akılı elektromanyetik motorun patenti alınmıştır. 1889 yılında ise Nicola Tesla ilk disk şeklindeki elektromanyetik motorun patentini almıştır. Fakat sabit mıknatıslı elektrik makinelerinin gelişimi mıknatıs teknolojisindeki gelişmelere paralel olmuştur. 1931 yılında Alnico'nun keşfedilmesi, 1950 yılında baryum ferritin ve 1980'lerde özellikle neodyum demir bor materyalinin keşfedilmesi sabit mıknatıslı motorların tekrar gündeme gelmesine neden olmuştur. Ayrıca 80'li yıllardan sonra neodyum mıknatıslarının gelişimi ve fiyatlarının uygun hale gelmesiyle öncelikli olarak radyal akılı sabit mıknatıslı makineleri geliştirmiş ve son 10 yıldır ise EASM makineler önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir[63].

II.1. KULLANILAN MALZEMELER

EASM makinelerde kullanılan malzemelerin makine performansı üzerine etkisinin önemli olduğunu görmekteyiz. Bu yüzden iletken, yalıtkan ve manyetik malzemeler hakkında temel bilgilerin verilmesi gerekmektedir.

Manyetik malzemeleri diamanyetik, paramanyetik, ferromanyetik, antiferromanyetik ve ferrimanyetik olmak üzere beşe ayırabiliriz[72].

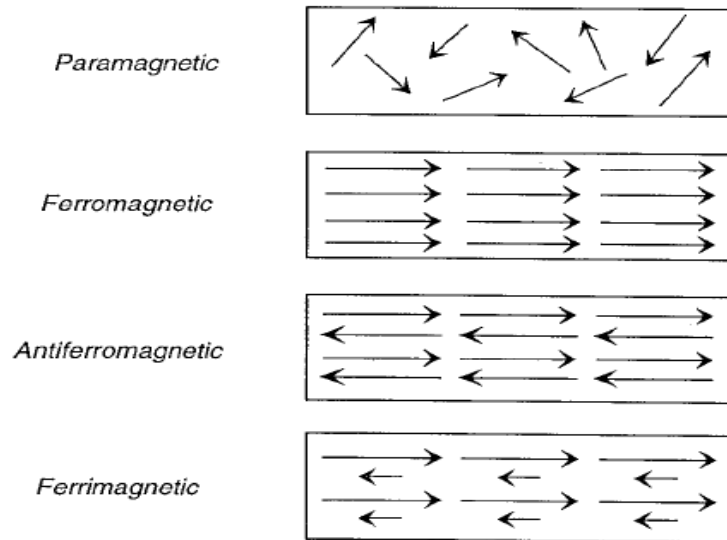
Maddelerin manyetik özelliğini belirleyen elektronlardır. Protonların etkisi çok küçük olduğu için ihmal edilir. Maddedeki atomlara bakıldığında elektronlarının bazılarının eşleşmiş(dipol) bazılarının ise eşleşmemiş olduğu görülür. Eşleşmiş elektronların dönme yönleri birbirine terstir. Bu yüzden de oluşturdukları manyetik alanlar birbirlerini yok edeceklerdir. Dolayısıyla maddelerin atomlarındaki elektronların durumuna göre malzemelerin manyetik özelliklerini saptayabiliriz[73]

Diamanyetik malzemelerin atomlarındaki elektronlar eşleşmişlerdir. Dolayısıyla eşleşmiş elektronlar ters yönde hareket edeceklerinden net bir manyetik alan oluşmayacaktır. Bu yüzden bu tür maddeler manyetik alandan etkilenmezler.

Paramanyetik malzemeler atomik boyutta bir manyetikliğe sahiptirler. Fakat bu manyetik özellik çok zayıftır. Uygulanan bir manyetik alanla elektronlar aynı yönde dizilirler ve yönlenmiş bir moment oluştururlar. Fakat bu manyetik moment sıcaklıktan çok etkilenir. Bu maddelere örnek sıvı oksijen, platin, paladyum, alüminyum, krom ve manganez verilebilir[72 , 74].

Ferromanyetik malzemeler zayıf bir manyetik alan içinde dahi manyetik dipolleri birbirine paralel olarak yönlenmeye çalışırlar. Manyetik alan kalksa dahi madde mıknatıslanmış olarak kalır. Bu maddelere örnek olarak demir, kobalt, nikel, godyum ve dispozyum verilebilir. Bu tür maddelerdeki komşu manyetik momentler arası etkileşim çok büyüktür[74].

Antiferromanyetik malzemelerde komşu momentler birbirine eşit ve ters yöndedir. Net manyetik alan sıfırdır. Ferrimanyetik malzemelerde ise komşu momentler birbirine ters yönde fakat büyüklük olarak eşit değildirler. Dolayısıyla net bir manyetik alan mevcuttur[72].

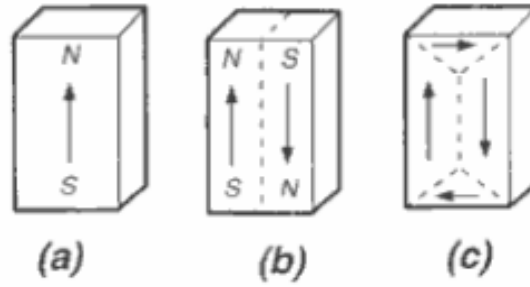


Şekil II.1 Manyetik malzemelerin sınıflandırılması[72].

II.1.1. Domenler

Ferromanyetik malzemeler curie sıcaklığının altında manyetik moment çiftlerinde gruplaşma eğilimine girerler. Bu yüzden oda sıcaklığında ferromanyetik malzemelerin manyetik olarak doyuma gitmesi beklenir. Fakat atomik boyutta bakıldığında mıknatıslanmadığı görülür. Bu durum manyetik domenler yardımıyla açıklanabilir.

Domenler tipik olarak 10^{12} - 10^{15} atomdan oluşurlar. Domenler içerisinde momentler birbirine paraleldir. Bir malzeme mikroskopik boyutta değişik büyüklük, şekil ve yönde olan birçok domenden oluşur. Mıknatıslanma ise tüm domenlerin yönsel ve yapısal olarak toplanmasından oluşur. Homojen malzemelerde domenler toplam enerjiyi en aza indirecek şekildedir. Aşağıdaki şekil II.2-a’da görüldüğü gibi magnetostatik enerji en yüksek, ikincide daha az ve üçüncüde en azdır[69 , 71].



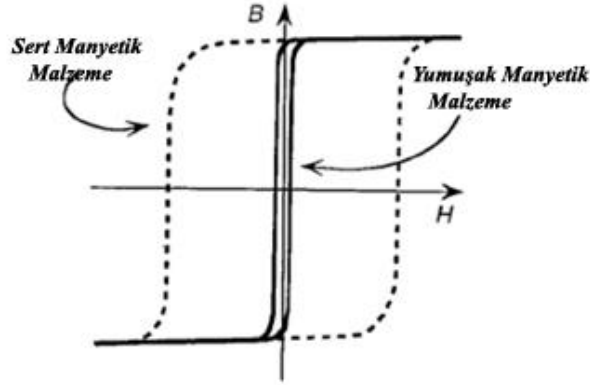
Şekil II.2 Mıknatıslı Malzemeler A)Yüksek Enerji, B)Orta Enerji, C)Düşük Enerji[72].

II.1.2. Yumuşak Manyetik Malzemeler

Malzemelerin manyetik açıdan yumuşak ya da sert oluşları bu malzemelerin magnetize ve demagnetize olma değerlerine bağlıdır. Yumuşak malzemeler yapı gereği de yumuşaktırlar ve kolay bir şekilde manyetik özellik kazanıp kolay bir şekilde manyetik özelliklerini yitirirler. Sert manyetik malzemeler ise yapısal olarak ta daha serttirler ve manyetikleşmeleri daha zor olduğu gibi manyetik özelliklerini de daha zor kaybederler[69].

Yumuşak malzemeler yüksek geçirgenliğe ve düşük koersiviteye($H_c < 1000$ A/m) sahiptir. Sert malzemeler ise düşük geçirgenlik ve yüksek koersiviteye(H_c

>1000 A/m) sahiptirler. En çok kullanılan yumuşak manyetik malzemeler yumuşak demir, nikel demir, demir silikon alaşımları ve yumuşak ferritlerdir[72].



Şekil II.3 Yumuşak ve Sert Manyetik Malzemenin B-H Eğrisi

II.1.3. Sert Manyetik Malzemeler

Sert manyetik malzemeler düşük geçirgenliğe ve yüksek koercivite'ye sahiptirler. Bundan dolayı zor manyetikleşirler ve demanyetikleşirler. Mıknatıs seçimindeki öncelikli özellik elde edilecek alanın kararlılığı ve genişliğidir. Bunlar koercivite(H_c), doyma mıknatıslanması(M_s) ve kalıcılık(B_r)'dır. Sert manyetik malzemeler olarak ferrit, alnico, samaryum-cobalt(Sm-Co) ve neodyum-demir-bor(Nd-Fe-B) sayılabilir[72].

II.1.4. Ferrit Mıknatıslar

Baryum ve Strontiumun karıştırılarak sinterlenmesiyle ferrit mıknatıslar oluşturulur ve seramik olarak adlandırılırlar. Bu sınıf mıknatıslar düşük direnç ve demanyetikleşmelerine karşın düşük fiyatları nedeniyle popülerdirler. Gelişimleri 1950'li yıllara dayanır. Üretim toz metalurji yöntemlerine dayanır. Üretimde doğru oranda demir oksite(Fe_2O_3) baryum, stronyum veya kurşundan birinin karbonatının karıştırılmasıyla başlar. Karışım 1000-1300°C de ısıtılarak toz haline getirilir. Bu tozlar pudra büyüklüklerine kadar ezilir ve eş yönlü mıknatıslar bu pudra taneciklerinin istenilen biçimde kurutulup preslenmesiyle ve son olarak yine 1000-1300 C° de ısıtılıp istenilen kütle haline getirilmesiyle oluşturulur[69 72].

Tablo II.1 Seramik Mıknatısların Özellikleri[69].

	Br (KGs)	Hc (KOe)	Hci (KOe)	BH_{max} (MGOe)
Seramik 1	2,2	1,86	3,25	1,1
Seramik 5	3,8	2,4	2,5	1,1
Seramik 7	3,4	3,25	4,0	2,75
Seramik 8	3,85	2,95	3,2	3,5
Seramik 10	4,2	2,95	3,05	4,2

II.1.5. Alnico Mıknatıslar

Alnico mıknatıslar Fe, Co ve Ni gibi ferromanyetik metaryellere Al ve Cu'nun değişik oranlarda eklenmesiyle elde edilirler. Alnico ismi de alüminyum, nikel ve cobaltın birleşimiyle oluşmuştur. İlk olarak 1931 yılında Mishima Japonya da keşfetmiştir. Keşfettiği alaşımda %58 oranında demir(Fe), %30 oranında nikel(Ni) ve %12 oranında alüminyum(Al) bulunmaktadır. Daha sonra yapılan birleşimlerde Cu ve Co eklenmesiyle çok çeşitli olarak Alnico mıknatıslar üretilmiştir. Üretimi sıvı alaşım olarak veya 1mm çapındaki materyallerin preslenip ısıtılma işleminden geçirilmesi ile gerçekleştirilir. Keşfedildiği zaman çok fazla kullanılan alnico mıknatıslar günümüzde ferrit ve azrak toprak mıknatısların bulunmasıyla birlikte az tercih edilir duruma gelmiştir[75].

Alnico mıknatısların en önemli özelliği çok yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir. Bundan dolayı özel kullanım alanları mevcuttur. Ayrıca düşük üretim maliyetleri de son derece önemlidir. Bununla birlikte düşük koercivite kuvvetleri, kırılgan ve sert yapıları nedeniyle mekanik sınırlamaları mevcuttur[75].

Tablo II.2 Preslenmiş Alnico'nun Özellikleri[72].

Alnico(Sinterlenmiş)	2	5	6	8
B _r (T)	0,71	1,05	0,94	0,76
H _c (kAm ⁻¹)	43,8	47,8	62,9	119
H _{ci} (kAm ⁻¹)	45,3	49,3	65,2	134
(BH) _{max} (kJm ⁻³)	11,9	24	23	36
μ _r	6,4	4,0	4,5	2,1
Yoğunluk(kg/m ³)	6837	7000	6892	6975
Curie sıcaklığı(C ⁰)	810	900	860	860

Tablo II.3 Döküm Alnico'nun Özellikleri[72].

Döküm Alnico	2	5	6	8
$B_r(T)$	0,75	1,24	1,5	0,82
$H_c(kAm^{-1})$	44,6	50,9	62,1	131,3
$H_{ci}(kAm^{-1})$	46,1	54,1	63,7	148
$(BH)_{max}(kJm^{-3})$	13,5	43,8	31,0	42,2
μ_r	6,4	4,3	5,3	2,0
Yoğunluk(kg/m^3)	7086	7308	7418	7252
Curie sıcaklığı(C^0)	810	900	860	860

II.1.6. Samaryum Kobalt(SmCo) Mıknatıslar

Samaryum cobalt mıknatıslar atom numarası 58-71 arasında bulunan geçiş gurubu elementlerdir ve azrak toprak mıknatısları olarak bilinirler. Gelişimleri 1960'lı yıllara dayanır. $SmCo_5$ ve $SmCo_{17}$ olmak üzere en yaygın üretilen iki türü vardır. Samaryum Kobalt mıknatısların maliyetlerinin yüksek olmasına karşın yüksek sıcaklıklarda($300C^0$) kullanılabilmesi ve yüksek koercivitesi nedeniyle tercih edilir[72 69].

Tablo II.4 Samaryum Kobalt'ın Özellikleri[72]

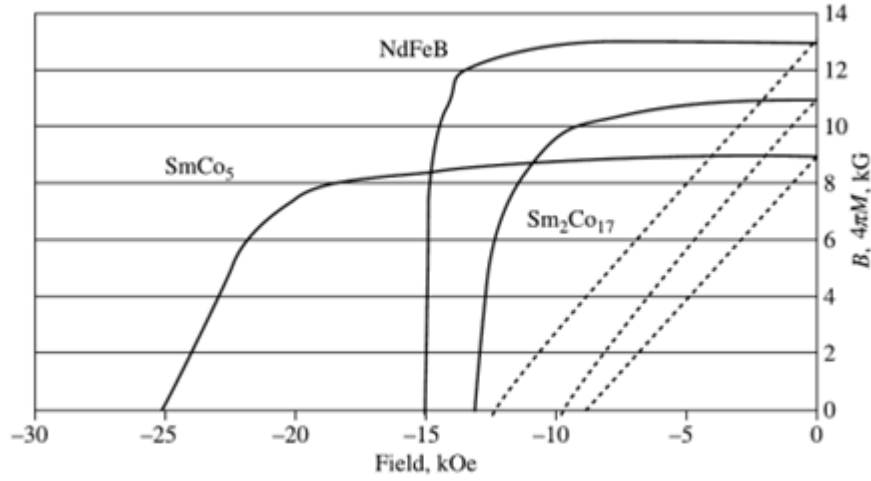
	SmCo₅	Sm₂Co₁₇
$B_r(T)$	0,83	1,0
$H_c(kAm^{-1})$	600	480
$H_{ci}(kAm^{-1})$	1440	558
$(BH)_{max}(kJm^{-3})$	128	192
μ_r	1,05-1,1	1,05
Yoğunluk(kg/m^3)	8200	8100
Curie sıcaklığı(C^0)	700	750

II.1.7. Neodyum Demir Bor Mıknatıslar

Neodyum Demir Bor($NdFeB$) mıknatıslarıda $SmCo$ gibi azrak toprak elementi mıknatıslarıdır. 1980'li yılların başında bulunmuştur. Özellikle düşük maliyetleri nedeniyle $SmCo$ 'ya bir alternatif oluşturmuşlardır. Bunun nedeni ise neodyumun samaryuma göre çok daha fazla bulunmasıdır. Neodyum mıknatıslar $NdFeB$ tozlarının farklı yöntemlerle(azaltma yayılma süreci, hızlı sulama süreci) işlenmesiyle üretilirler. Ayrıca üretim aşamasında basınçla birlikte uygulanan manyetik alanlar mıknatısın performansını arttırmaya yardımcı olacak şekilde uygulanır. Yüzey kaplaması olarak nikel ve çinko gibi elementler kullanılır[72 69].

Neodyum mıknatıslar samaryum mıknatıslara göre bazı avantajları vardır. Öncelikle neodyum samaryuma göre daha fazla bulunduğu için maliyet açısından

daha ucuzdurlar. Bununla birlikte daha güçlü bir yapıya sahiptirler. Bu özelliklerinin yanında %13 kadar daha hafiftirler. Bu özelliklerinden dolayı motorlar, sensörler, bilgisayarlar, geniş kapasiteli harddiskler, minyatür el tipi ses kayıt cihazları ve kilitlenmeyi önleyici fren sistemleri gibi birçok alanda kendine kullanım yeri bulmuştur[76].



Şekil II.4 Azrak Toprak Elementi Mıknatıslarının Demanyetikleşme Eğrileri[75].

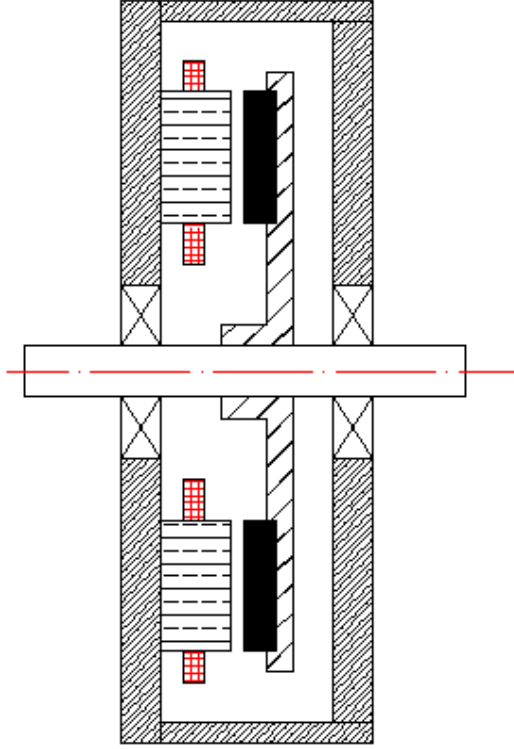
II.2. EKSENEL AKILI MAKİNELERİN SINIFLANDIRILMASI

Eksenel akıllı sabit mıknatıslı(EASM) makineler çalışma akımı kare dalga ise DC makine, sinüzoidal ise AC senkron makine olarak ikiye ayrılırlar. Ayrıca EASM makineler yapısı gereği de tek ya da çift taraflı olarak ikiye bölünürler. Kendi içlerinde de nüveli, nüvesiz veya oluklu, oluksuz olarak sınıflandırılır. Aşağıda EASM makinelerin sınıflandırılması verilmiştir[63 , 68].

II.2.1. Tek Taraflı EASM Makineler

EASM makinelerin en basit yapıda olanlarıdır. Tek rotor ve tek statordan oluşurlar. Rotor da mıknatıslar bulunur. Mıknatıslar gömülü ya da çıkık olabilir. Ayrıca rotor yapısı yumuşak demir malzemeden yapıldığı gibi halbach dizilimini kullanarak manyetik olmayan malzemeden de üretilebilir. Statorunda ise sargılar bulunur. Stator yapısı oluklu, oluksuz, nüvesiz ve çıkık kutuplu olarak üretilebilir. Bu tip yapıda sargıların tek bir kenarı kullanıldığı için çift taraflı EASM makinelere göre

ürettikleri moment daha düşüktür. Bunu yanında yapı gereği daha az karmaşık ve üretimi daha kolaydır. Ayrıca tek taraflı olduğu için disklerin mil ile birleşim noktaları tek yönlü yüksek kuvvetlere maruz kalır. Bu nedenle yüksek güçlü makineler için bu tasarımın kullanılması güçleşir.



Şekil II.5 Tek taraflı EASM Makine

II.2.1.1. Oluklu stator

Tek taraflı statorun ve bir rotorun kullanıldığı makine tipidir. Mekanik birleşimi kolay ve maliyeti düşüktür. Statorun üretim maliyeti nüve üzerine açılan oluklardan dolayı yüksektir. Statorun bir yüzü kullanıldığı için bakır ve demir kayıpları yüksektir. Toplam ürettiği moment için iki taraflı makinelere oranla daha düşüktür.

II.2.1.2. Çıkık kutuplu stator

Çıkık kutuplu EASM makineler genellikle yumuşak manyetik kompozit(SMC) malzemelerden yapılır. Şekil II.6'da görüldüğü gibi SMC malzemeden yapılmış stator yapısı görülmektedir. Şekil II.6.a'da statorun işlenmeden önceki hali

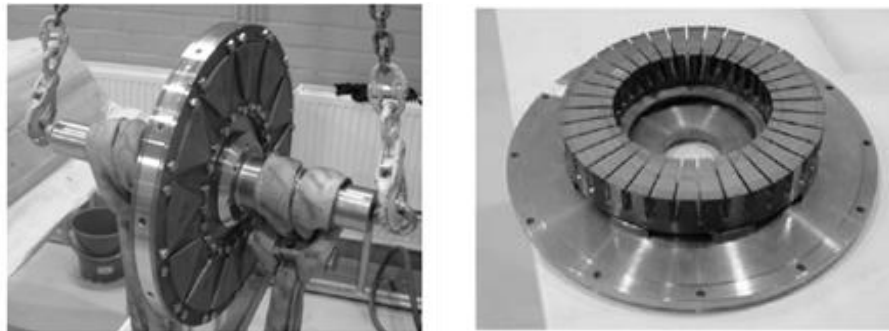
verilmiştir. Şekil II.6.b’de ise malzeme işlendikten sonraki yapısı verilmektedir. İnce saçların paketlenerek oluşturulan nüvelere göre işleme maliyeti daha düşüktür. Fakat bu tür nüvelerin malzeme maliyetlerinin yüksek olduğu da farklı çalışmalarda belirtilmiştir[56].



Şekil II.6 a)SMC malzeme, b)SMC’den elde edilen stator[54].

II.2.2. Çift Taraflı Tek Rotorlu EAISM Makineler

Bu tip EAISM makineler tek rotor çift statordan oluşur. Rotor ortada yer alır. Rotor diskinin her iki yüzeyine mıknatıslar yerleştirilerek manyetik akının her iki statorun üzerinden tamamlanması sağlanır. Çift rotorlu EASM makinelerle göre mıknatıs yoğunluğu azdır. Bu yüzden güç yoğunluğu ve verimi diğerlerine göre daha düşüktür[87]. Ayrıca statorun sadece bir yüzü kullanıldığı için bakır kayıpları daha yüksektir. Bununla birlikte mekanik olarak statorların bir yüzü kolaylıkla gövdeye monte edilebilir. Stator yapısı olarak oluklu ve oluksuz yapıda nüve kullanılabilir.



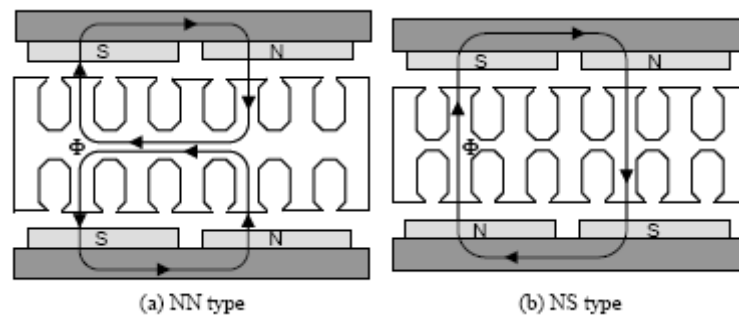
Şekil II.7 Eksenel Akılı Tek Rotorlu Makine(AFIPM) a)Rotor b)Stator[87].

II.2.3. Çift Taraflı EASM Makineler

Çift rotor tek statora sahip EASM sabit mıknatıslı makineler genellikle en çok tercih edilendir. Bunda sağladıkları yüksek güç yoğunluğu ve moment etkilidir. Rotor değişik mıknatıs ve kutup sayılarından oluşabilir. Stator ise genel olarak nüveli ve nüvesiz olarak ikiye ayrılır. Nüveli statorlar oluklu veya oluksuz yapıdadır. Sargılar ise toroidal ve trapezodial olarak sarılır. Toroidal sargılı nüveli eksenel akılı makineler genellikle Torus tip eksenel akılı sabit mıknatıslı (TEASM) makineler olarak isimlendirilir. Nüvesiz statorlar ise trapezodial sargıların epoxy bir gövdenin içine konulması ile oluşturulur. Bunun için kalıpların içine yerleştirilen sargıların üstüne epoxy reçinenin dökülmesiyle oluşturulur. Nüveli tiplere göre sağladıkları moment ve güç yoğunluğu daha düşüktür. Bununla birlikte maliyet ve yapım kolaylığı açısından önemlidir.

II.2.3.1. Oluklu Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı (EASMO) Makineler

EASM makineler arasında en çok tercih edilen yapıdır. Bunda sağladıkları yüksek moment ve yüksek güç yoğunluğu önemlidir. Sargı yapıları toroidal ya da trapezodial tiptedir. Manyetik akı devresi şekil II.7 a'da gösterildiği gibi karşılıklı zıt kutupların karşılıklı olarak yerleştirilmesinden dolayı nüvenin orta yüzeyinden geçerek tamamlıyorsa bu tip EASMO makineler NN tip olarak isimlendirilir. EASMO makinenin manyetik devresi şekil II.7 b'de gösterildiği gibi manyetik nüveyi boyuna geçerek tamamlıyorsa NS tip EASMO makine olarak isimlendirilir. NN tip EASMO makinelerde toroidal sargı yapısı kullanılır bu yüzden torus NN tip eksenel akılı sabit mıknatıslı (NN tip TEASMO) makineler olarak isimlendirilir. NS tip EASM makinelerde ise trapezodial sargılar kullanılır.



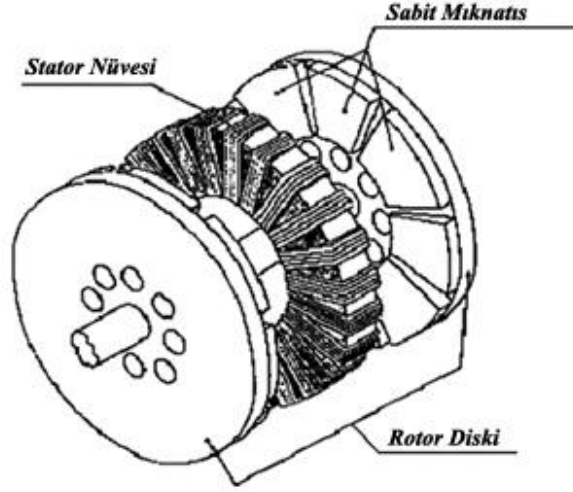
Şekil II.8 a) NN tip EASMO b) NS tip EASMO [82].

EASMO makinelerin en büyük özelliği hava aralığının az olmasıdır. Hava aralığının küçük olmasından dolayı hava aralığı manyetik akı değeri diğer tipteki EASM makinelerine göre yüksektir. Bununla birlikte mıknatıslar ile oluk kenarlarının bir birine yakın olmasından dolayı aralarında bir etkileşim olur. Bu durum EASMO makinelerinde vuruntu momentinin oluşmasına neden olur. Bu yüzden birçok çalışma vuruntu momentini giderici yöntemler üzerinedir. Özellikle ilk kalkınma anındaki yüksek vuruntu momenti bu tip EASMO makinelerde büyük bir sorundur.

Vuruntu momentini gidermek için literatürde birçok yöntem sunulmuştur. Özellikle EASMO makinelerin rotor kısmında yapılan değişikliklerle vuruntu momentinin azaltılması üzerinde durulmaktadır. Bunun için rotor kısmında değişik şekillerde mıknatıslar kullanmak, mıknatıslarda kayk oluşturmak, iki rotorun birbirine göre kaydırılması, kutupların birbirine göre ötelenmesi ve iki rotorun karşılıklı kutuplarında farklı kutup yay oranları kullanarak vuruntu momentini azaltıcı teknikler geliştirilmiştir. Stator kısmında ise önerilen teknikler olukların birbirine göre ötelenmesi ve yardımcı olukların açılmasına dayanmaktadır. Fakat stator tarafında yapılan değişiklikler yapım maliyetlerinin yükseltmesi açısından daha az tercih edilir.

II.2.3.2. Oluksuz Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı(EASMOZ) Makineler

EASMOZ makinelerin statoru oluksuz nüveden oluşur. Toroidal sargılar kullanılır. Bu makinelerde kullanılan sarım sayısı düşüktür. Bu da endüktansın düşük olmasına neden olur. Bu yüzden güç yoğunlukları ve momentleri TEASMO'ya göre düşüktür. Bu yüzden pek fazla tercih edilmezler. Bununla birlikte yapım kolaylığı ve düşük maliyetleri dikkat çekici özelliklerindendir. Şekil II.9'da gösterildiği gibi EASMOZ iki rotor bir statordan oluşmaktadır. Mıknatıslar NN tip olarak yerleştirilir. Dolayısıyla manyetik akı devresini stator nüvesinin boyunduruğundan tamamlar. Bu makinelerin en önemli özellikleri nüve üzerinde olukların bulunmamasıdır. Bu yüzden bu makinelerde vuruntu momenti oluşmaz. Sürme devresinden ve sargı yapısından dolayı meydana gelen moment dalgalanmaları ise diğer EASM'ye göre düşüktür. Bu yüzden bu tip makineler moment dalgalanmalarının istenmediği yerlerde rahatlıkla kullanılabilir.



Şekil II.9 EASMOZ Makinenin Yapısı[35].

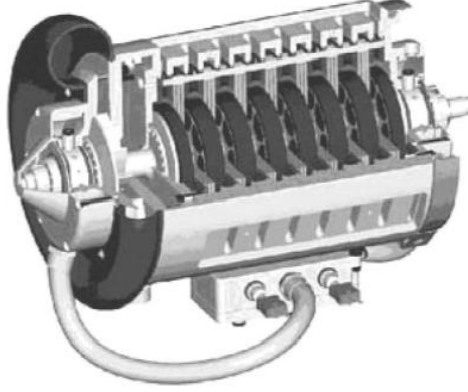
II.2.3.3. Nüvesiz EASM Makineler

Nüvesiz EASM'lerin statoru epoxy reçine içine sargıların gömülmesi ile oluşur. Yapımı kolaydır. Nüve olmadığı için yapım maliyeti ve eksenel uzaklık düşüktür. Sargılar genellikle trapezoidal olarak sarılır. Ayrıca üretilen elektro motor kuvvetinin daha sinüzoidal olması için sargılar rhomboidal olarak ta sarılır. Rotoru ise NS tipte üretilir. Böylelikle manyetik akı şekil II.8-b'deki gibi bir yol izler. Bu yüzden stator kalınlığı mutlaka minimum yapılmalıdır. Bu tip tasarımlarda manyetik akı değeri düşük olduğu ve statorun mil ile temas yüzeyi düşük olduğu için düşük güçlü makine tasarımlarında tercih edilir. Nüve olmadığı için vuruğu momenti yoktur. Moment dalgacıkları minimumdur. Bu yüzden moment dalgalanması istenmeyen düşük güçlü uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir.

II.2.4. Çok Bölümlü EASM Makineler

Çok bölümlü EASM makineler birden çok rotor ve statordan oluşur. EASM makinelerde makine gücü makinenin çapıyla orantılıdır. Dolayısıyla bu tip makinelerde gücü artırmak için çapın artırılması mekanik problemlere neden olmaktadır. Çünkü makine çapı arttığında mil ile bağlantı noktası yeteri kadar artmamaktadır. Dolayısıyla birleşim noktası artan makine gücüne karşı koyamamaktadır. Bu problemi yenmek için yüksek güçlü makine tasarımında birden çok rotor ve statora sahip yapılar kullanılmaktadır. Bu tip makineler çok katmanlı eksenel akılı sabit mıknatıslı makine(ÇKEASM) olarak isimlendirilir. Şekil II.10'da

8 rotora sahip bir senkron EASM jeneratör verilmiştir. Görüldüğü gibi 100 kw gibi bir güç elde edilen bu makine birden çok EASM'nin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. EASM makinelerde gücü arttırmak için çok katmanlı yapıların kullanılması etkili bir yöntemdir.



Şekil II.10 100-kW, 8 Rotorlu EASM Senkron Jeneratör[63].

II.3. EASM MAKİNEİN GENEL EŞİTLİKLERİ

II.3.1. Sargı özelliklerinin tespiti

EASM makinede stator tarafında öncelikle sargı sayısı tespit edilir. Toplam oluk sayısı x ise ve sargının tek bir kenarı sadece bir oluğa yerleştirilirse bu durumda toplam sargı sayısı oluk sayısının yarısı kadar olur. Faz başına düşen sargı sayısını ise formül 2.1'deki gibi hesaplarız. Formül 2.1'de m faz sayısını n_c ise faz başına düşen sargı sayısını belirtmektedir.

$$n_c = \frac{x}{m} \quad (2.1)$$

Bir kutup altındaki oluk sayısı ise formül 2.2'deki gibi bulunur.

$$Y_x = \frac{x}{2P} \quad (2.2)$$

Her faza bir kutup altında düşen oluk sayısı ise formül 2.3'de verildiği gibi bulunur.

$$c = \frac{x}{2Pm} \quad (2.3)$$

Toplam her bir sargının iletken sayısını formül 2.4'den hesaplanır.

$$N_c = \frac{a_p a_w N_1}{n_c} = \frac{a_p a_w N_1}{x/2m} = \frac{a_p a_w N_1}{c P} \quad (2.4)$$

Formül 2.4'de N_1 bir faza ait toplam sipir sayısını belirtmektedir. a_p ve a_w sırasıyla paralel kol sayısı ve paralel akım terminal sayısıdır.

Formül 2.5'de β elektriksel olarak kısaltılan sargı derecesini ifade eder. K_a ise adım katsayısıdır.

$$K_a = \cos \frac{\beta}{2} \quad (2.5)$$

Dağıtım katsayısı ise formül 2.6'dan hesaplanır. Formül 2.6'daki α iki oluk arasındaki elektriksel açıdır.

$$K_d = \frac{\text{sinc} \frac{\alpha}{2}}{c \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2.6)$$

Elektriksel açı(α) formül 2.7'den hesaplanır.

$$\alpha = \frac{180 \cdot 2P}{x} \quad (2.7)$$

Yukarıdaki formüllere göre sargı sayısı ve sargıların fazlara ve kutuplara göre dağılımı yapılır.

Sipir sayısının hesaplamak için ise formül 2.8'den yararlanılır.

$$N_1 = \frac{E_f}{4,44 \cdot Q \cdot k_a \cdot k_d \cdot f} \quad (2.8)$$

II.3.2. Moment ifadesinin çıkarılması

Eksenel akıllı makinelerde moment üretimi makinenin çapıyla orantılı olarak değişir. Moment değerinin hesaplanması için aşağıdaki formüller kullanılır.

Öncelikle kutup adımı $\tau(r)$ ve kutup genişliği $b_p(r)$ yarıçapa bağlı olarak hesaplanır.

Kutup adımı $\tau(r)$ formül 2.9'dan hesaplanır. Formül 2.9'daki p tek kutup sayısıdır.

$$\tau(r) = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p} \quad (2.9)$$

Kutup genişliği $b_p(r)$ formül 2.10'dan hesaplanır. Formül 2.10'da α_i ortalama manyetik akının B_{ort} maksimum manyetik akıya B_{max} oranıdır.

$$b_p(r) = \alpha_i \tau(r) = \alpha_i \frac{\pi r}{p} \quad (2.10)$$

$$\alpha_i = \frac{B_{ort}}{B_{max}} \quad (2.11)$$

Çizgi akım yoğunluğunun maksimum değeri formül 2.12'den hesaplanır. Formül 2.12'de m_1 faz sayısı ve N_1 bir faza ait sipir sayısıdır.

$$A_m(r) = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{p \tau(r)} = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{\pi r} \quad (2.12)$$

Amper eşitliğine göre disk üzerindeki teğetsel kuvvet formül 2.13'den hesaplanır.

$$d\vec{F}_x = I_a (\vec{dr} \times \vec{B}_g) = A(r) (\vec{dS} \times \vec{B}_g) \quad (2.13)$$

Formül 2.13'de $I_a \vec{dr} = A(r) \vec{dS}$, $A(r) = A_m(r)/\sqrt{2}$ olarak düzenlenir. $\vec{dS}$ yüzey eleman vektörüdür. Manyetik akının hava aralığı yüzeyindeki vektörü ise $\vec{B}_g$ dir. Manyetik akının hava aralığındaki değerini yarıçaptan bağımsız alırsak B_{max} değeride yarıçaptan bağımsız olur. $dS = 2\pi r dr$ ve formül 2.11'e göre,

$B_{ort} = \alpha_i B_{max}$ olur. Verilenlere göre kuvvet mil eksen uzaklığı ile çarpılırsa elektromanyetik momenti elde etmiş oluruz. Formül 2.14’de elektromanyetik momentinin değişimi verilmiştir.

$$dT_d = r dF_x = r[k_{w1}A(r)B_{ort}dS] = 2\pi\alpha_i k_{w1}A(r)B_{mak}r^2 dr \quad (2.14)$$

Formül 2.14’deki A(r) stator aktif yüzeyindeki elektrik yüküdür. Adım ve dağıtım katsayılarının çarpımı ise k_{w1} ’dir. Dolayısıyla formül 2.14’e bakıldığında EASM makinenin momenti yarıçapın karesi ile orantılı olarak değişir.

Ortalama elektromanyetik momenti hesaplamak için formül 2.12 ve 2.14 düzenlenirse ve r yerine dış çap $D_{dış}$ ve $D_{iç}$ cinsinden değerler yerleştirilirse formül 2.15 elde edilir.

$$T_d = \frac{1}{4}\alpha_i m_1 I_a N_1 k_{w1} B_{mak} (D_{dış}^2 - D_{iç}^2) \quad (2.15)$$

Formül 2.16’daki gibi bir kutup altındaki manyetik akı yoğunluğu yarıçapa ve maksimum manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak ifade edilir.

$$\Phi_f = \alpha_i B_{mak} \frac{\pi}{2p} (R_{dış}^2 - R_{iç}^2) \quad (2.16)$$

Formül 2.15 ve 2.16’dan formül 2.17’deki ortalama moment ifadesi çıkartılır. Formül 2.17’deki k_{w1} moment sabitidir.

$$T_d = 2\frac{p}{\pi} m_1 N_1 k_{w1} \Phi_f I_a \quad (2.17)$$

Moment değeri sinüsoidal akım ve manyetik akı yoğunluğu için elde edilmek isteniyorsa formül 2.17 $\pi\sqrt{2}/4 = 1,11$ katsayısı ile çarpılmalıdır. Sinüzoidal bir sistem için moment değeri formül 2.18’deki gibi ve moment sabiti de formül 2.19’daki gibi elde edilir.

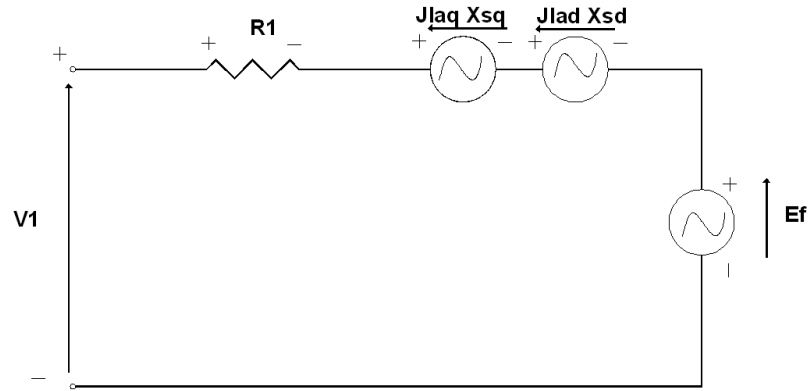
$$T_d = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p N_1 k_{w1} \Phi_f I_a = k_M I_a \quad (2.18)$$

$$k_M = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p N_1 k_{w1} \Phi_f \quad (2.19)$$

II.4. EASM MAKİNESİNİN EŞDEĞER DEVRESİ

Tasarımı yapılacak EASM motorun kutuplarını oluşturmak için dikdörtgen formunda mıknatıslar kullanılmıştır. Bu yüzden eşdeğer devreyi çıkık kutuplu senkron makine eşdeğer devresine göre çıkartmak mümkündür. Çıkık kutuplu senkron makinelerde kutbun karşısına gelen eksen d eksenini iki kutup arasında kalan hizaya denk gelen eksenini de q eksenini olarak isimlendirip çözümlemeleri bu iki eksene göre yapmak gerekir.

Öncelikle EASM motorun bir faz eşdeğer devresi şekil II.11’de verilmiştir.



Şekil II.11 EASM Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi

EASM motor d ekseninde olduğunda reaktansı formül 2.20 ile ifade edilir. Formül 2.20’de X_{sd} d eksenini senkron reaktansıdır. X_{ad} endüvi sargısının oluşturduğu reaktans, X_1 ise kaçak reaktansı ifade eder.

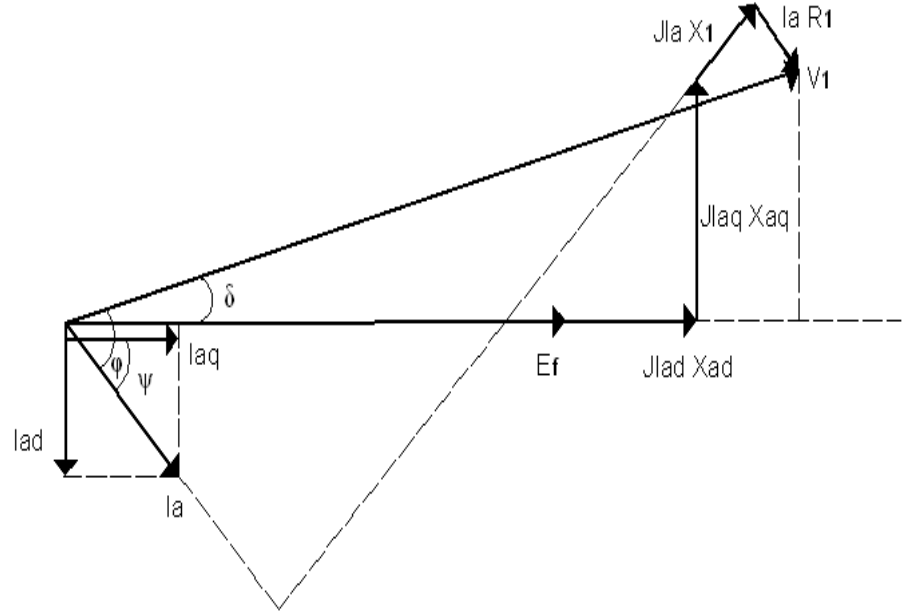
$$X_{sd} = X_{ad} + X_1 \quad (2.20)$$

Formül 2.20’yi baz alarak q eksenini için de aynı eşitlikler formül 2.21’de gösterildiği gibi verilmiştir. Formül 2.21’de X_{sq} q eksenini senkron reaktansıdır.

X_{aq} endüvi sargısının oluşturduğu reaktans, X_1 ise kaçak reaktansı ifade eder.

$$X_{sq} = X_{aq} + X_1 \quad (2.21)$$

Şekil II.11, formül 2.20 ve formül 2.21'den yararlanılarak EASM motorun vektör diyagramı şekil II.12'deki gibi çıkartılır



Şekil II.12 EASM Motorun Bir Faz Vektör Diyagramı

Şekil II.12'de EASM motorun bir fazı için verilen vektör diyagramından formül 2.22'de verildiği gibi uygulanan gerilim eşitliği elde edilir.

$$V_1 = E_f + I_a R_1 + jI_{ad} X_{sd} + jI_{aq} X_{sq} \quad (2.22)$$

Formül 2.22'de d eksenli endüvi akımı I_{ad} ve q eksenli endüvi akımı I_{aq} endüvi akımı I_a cinsinden formül 2.23 ve 2.24'de verildiği gibi ifade edilir.

$$I_{ad} = I_a \sin \psi \quad (2.23)$$

$$I_{aq} = I_a \cos \psi \quad (2.24)$$

EASM motorda uygulanan uç geriliminin iki bileşeni formül 2.25 ve 2.26' verildiği gibidir.

$$V_1 \sin \delta = I_{aq} X_{sq} - I_{ad} R_1 \quad (2.25)$$

$$V_1 \cos \delta = E_f + I_{ad} X_{sd} + I_{aq} R_1 \quad (2.26)$$

EASM motorun giriş gücü ise formül 2.27'de verilmiştir.

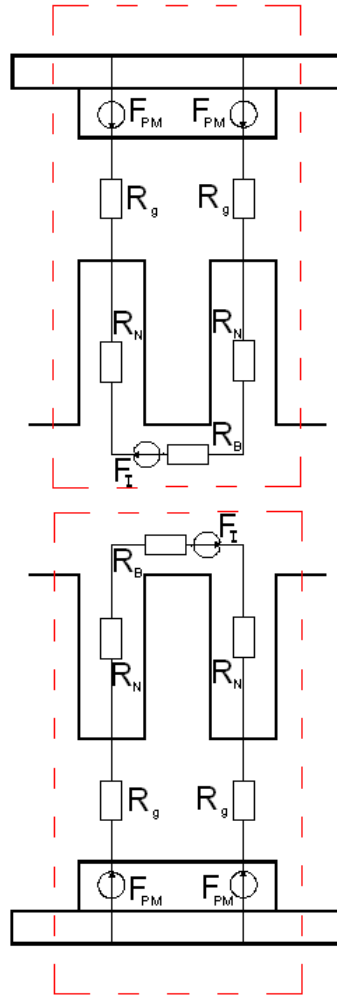
$$P_{in} = m_1 V_1 I_a \cos \Phi = m_1 V_1 (I_{aq} \cos \delta - I_{ad} \sin \delta) \quad (2.27)$$

EASM motorun giriş gücünden wattlı kayıplar ile demir kayıplarını çıkartırsak formül 2.28'daki elektromanyetik gücü elde etmiş olunur

$$P_{sim} = P_{in} - \Delta P_{1w} - \Delta P_{Fe} \quad (2.28)$$

II.5. EASM MAKİNESİNİN MANYETİK EŞDEĞER DEVRESİ

Tasarımı yapılan toroidal sargılı eksenel akılı sabit mıknatıslı açık oluklu NN tip (TEASMAO-NN) motorun bir kutup için manyetik eşdeğer devresi şekil II.13'de verilmiştir. TEASMAO-NN tip motorun diğer kutupları şekil II.13'ün simetriği olacaktır. Şekilde $\mathfrak{R}_g$, $\mathfrak{R}_B$, $\mathfrak{R}_N$, $\mathcal{F}_{PM}$ ve $\mathcal{F}_I$ sırasıyla hava aralığı relüktansı, nüve boyunduruğunun relüktansı, nüve ayağının relüktansı, sabit mıknatısın manyeto motor kuvveti (mmk) ve sargı tarafından akıma bağlı olarak üretilen mmk'dır.



Şekil II.13 TEASMAO-NN Tip Motorun Manyetik Eşdeğer Devresi

Formül 2.29’da amper kanunu verilmiştir. Amper kanununa göre bir yol boyunca akımın meydana getirdiği manyetik alan şiddeti formül 2.29’dan hesaplanır. Formül 2.29’da H manyetik alan şiddeti birimi AT/m(metre başına amper sarım miktarı), I_{top} toplam akım değeri ve l ise toplam yolu ifade etmektedir. Eğer toplam N tane sarım varsa formülde I_{top} yerine $N.i$ yazılır.

$$\oint H \cdot dl = I_{top} \quad (2.29)$$

Manyetik alan şiddeti H kapalı bir l_c yolu boyunca devresini tamamlarsa ve kaçak akılar göz ardı edilirse bu durumda formül 2.30’da verildiği gibi yazılır.

$$H \cdot l_c = N \cdot i \quad (2.30)$$

Manyetik akı yoğunluğunu oluşturan manyetik alan şiddetidir. Manyetik akı yoğunluğu B (weber/m² veya Tesla) malzeme geçirgenliğine bağlıdır. Malzeme geçirgenliği μ_m ile ifade edilir. Birimi Henry/metre(H/m)'dir. Malzeme geçirgenliğinin havaya göre oranı bağlı geçirgenlik μ_r ile ifade edilir. Ortamın geçirgenliği $\mu_0=4\pi.10^{-7}$ H/m'dir.

$$B = \mu_m \cdot H \quad (2.31)$$

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} \quad (2.32)$$

Formül 2.30 ve 2.31'den formül 2.33 elde edilir.

$$B = \frac{\mu_m \cdot N \cdot i}{l_c} \quad (2.33)$$

Belirli bir alandaki manyetik akı yoğunluğu Φ (weber) formül 2.34'den hesaplanır.

$$\Phi = \int_A B \cdot dA = B \cdot A = \frac{\mu_m \cdot N \cdot i \cdot A}{l_c} \quad (2.34)$$

Manyetik akı yoğunluğu Φ (weber) manyete motor kuvvet $\mathcal{F}$ (amper sarım) ve relüktans $\mathfrak{R}$ (amper sarım/weber) cinsinden ise formül 2.35'deki gibi yazılabilir.

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}} \quad (2.35)$$

Formül 2.35'deki manyeto motor kuvvet $\mathcal{F}$ (amper sarım) formül 2.36'da verilmiştir.

$$\mathcal{F} = N \cdot i \quad (2.36)$$

Formül 2.34-35-36'dan yararlanarak manyetik akı Φ (weber)'yi aşağıdaki gibi düzenleyebiliriz.

$$\Phi = \mathcal{F} \cdot \left(\frac{\mu_m \cdot A}{l_c} \right) \quad (2.37)$$

Formül 2.37'de verilen parantez içindeki değer manyetik devrelerdeki iletkenliğin(permeans) tersi relüktanstır. Formül 2.38'deki gibi ifade edilir. Birimi amper sarım/weberdir. Relüktans seri ve paralel devrelerde elektrik devrelerindeki direnç ile aynı kurallar çerçevesinde işlem görür.

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu_m A} = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 \cdot A} \quad (2.38)$$

Şekil II.13'de verilen sabit mıknatısın ürettiği mmk formül 2.34-35-38'den elde edilerek formül 2.39'da verildiği gibidir. Formül 2.39'da B_r , l_{PM} ve $\mu_{r,PM}$ sırasıyla sabit mıknatısın manyetik akı değeri, mıknatısın kalınlığı ve mıknatısın bağlı geçirgenliğidir.

$$\mathcal{F}_{PM} = \frac{B_r l_{PM}}{\mu_{r,PM} \cdot \mu_0} \quad (2.39)$$

Formül 2.40'da verilen $\mathcal{F}_I$ (amper sarım) sargının ürettiği mmk'dır.

$$\mathcal{F}_I = N \cdot i \quad (2.40)$$

Şekil II.13'de verilen $\mathfrak{R}_g$, $\mathfrak{R}_B$ ve $\mathfrak{R}_N$ formül 2.38'den yararlanılarak hesaplanır.

Bu kısımda TEASMAO-NN tip motorun verilen basit eşdeğer devresi ile manyetik hesaplamaları yapmak mümkündür. Fakat motorun geometrisinden dolayı bir kutup altındaki oluk kenarlarının tümü şekil II.13'de verildiği gibi hizalanmaz. Dış çaptan iç çapa doğru mıknatıs altında kalan oluk kenarlarının yüzeyi küçülür ve diğer oluklar mıknatıs altına girmeye başlar. Dolayısıyla hesaplarda bir miktar sapma olur. Bunun için bölüm III'de motorun manyetik analizleri 3 boyutlu analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu analiz sayesinde değişik geometrilerdeki manyetik alan dağılımını tespit etmek daha kolaydır. Tek dezavantajı makine geometrisi karışıkça bilgisayar hızının ve kapasitesinde artması gerekmektedir.

BÖLÜM III EKSENEL AKILI MAKİNELERİN MANYETİK ANALİZİ

EKSENEL AKILI MAKİNELERİN MANYETİK ANALİZİ

Elektrik makinelerinin tasarım aşamasında son yıllarda sonlu elemanlar yöntemini(SEY) kullanan programlar büyük kolaylık sağlamaktadır. SEY’i kullanan bu programlar sayesinde tasarlanan elektrik makinesinin parametreleri değiştirilerek manyetik analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Böylelikle zaman ve maliyet açısından büyük tasarruf sağlanmaktadır.

III.1. MAXWELL 3D SEY PROGRAMI

SEY kullanan programlardan bir tanesi de ansoft firmasının maxwell 3D programıdır. Bu program SEY’i kullanarak elektrik, manyetostatik, harmonik(eddy akımları) ve geçici manyetik çözümleri yapabilmektedir[77].

Aşağıda çözüm süreçleri verilmiştir.

III.1.1. Elektrik

Maxwell programının elektriksel çözümlemesinde elektostatik 3D alanlar kullanılarak gerilim ve depolanan enerji belirlenerek moment, kuvvet ve kapasitanslar belirlenir. Ayrıca gerilimin değişimi, elektrik alanı ve akım yoğunluğu iletkenlerdeki 3D alanlarla karakterize edilerek güç kayıpları hesaplanır[77].

III.1.2. Manyetostatik

DC akım yoğunluğu, gerilim, sabit mıknatıslar ve dışarıdan uygulanan manyetik alanlar ile lineer ve nonlineer manyetostatik alanlar yardımıyla moment, kuvvet ve endüktans(öz ve karşılıklı) hesaplanır[77].

Sonlu elemanlar analizi(FEA) çok karışık bir araçtır. Birçok mühendis ve araştırmacı elektromanyetik, termal, yapısal, sıvı akışı, ses ve benzeri konularda SEY'den yararlanmaktadırlar[77].

III.1.3. Harmonik(Eddy Akımı)

Bu çözümleme süreci elektromanyetik alan dalgalarının etkilerini içerir[77].

III.1.4. Geçici Durum

Değişen zamanla birlikte akım veya gerilim kaynağının sargılara uygulanması ve sabit mıknatıslar nedeniyle meydana gelen 3D manyetik alan dağılımı bu çözüm sürecinde işlenir. Ayrıca dönen ya da hareket eden parçaların benzetimi de bu çözüm süreci içinde gerçekleştirilir[77].

Sonlu elemanlar yönteminde orijinal alan öncelikle alt alanlara bölünür. Bölünen her alandaki potansiyel dağılım bir deneme fonksiyonu ile yakınlaştırılır. En son olarak alan probleminin sayısal çözümü elde edilir[78].

Maxwelle elektromanyetik alan benzetimi yapılırken aşağıdaki adımlar takip edilir[77].

- Öncelikle hangi tip elektromanyetik alan çözümlemesi yapılacağı belirlenir.
- Tasarımın 3 boyutlu modeli oluşturulur.
- Tasarımda kullanılan 3 boyutlu elemanların malzeme özellikleri belirlenir. Eğer kütüphanede istenilen özellikte malzeme yoksa yeni malzeme özellikleri belirlenerek kütüphaneye eklenir.
- Sınır koşulları belirlenir.
- Sargı varsa bu sargıların akımları belirlenir.
- Hesaplanması istenilen parametreler girilir.
- Ağ yapısı belirlenir.
- Çözümleme ayarları girilir.
- Çözümleme süreci başlatılır.

III.1.5. Manyetostatik alan hesaplaması

Manyetostatik çözümlemede manyetik alanlar DC akımlar ve sabit mıknatıslar tarafından üretilir. Zaman değişimi bu çözümleme sürecinde yoktur. Tüm objeler

sabit durumdadır. Manyetostatik alan çözümlemesi aşağıdaki amper kanununa ve maxwell denkleminde dayanır[77].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

III.1.6. Manyetik Alan Enerjisi

Lineer bir sistemde manyetik enerji ve koenerji birbirine eşittir ($W=W_c$) ve denklem 3.3’de verilmiştir.

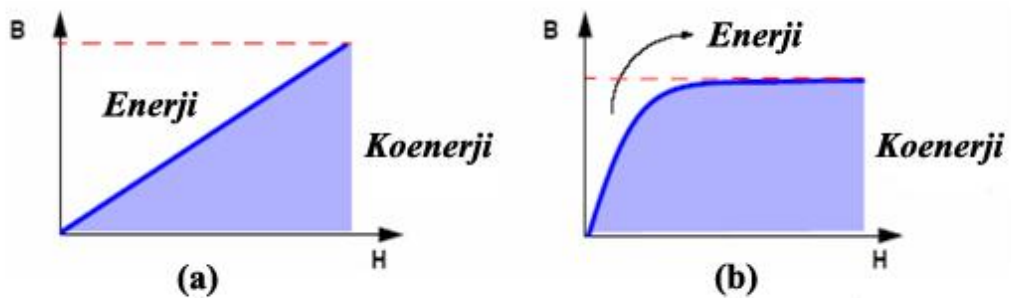
$$W = \frac{1}{2} \int_V B \cdot H \, dV \quad (3.3)$$

Nonlinear bir sistemde ise enerji denklemi 3.4’de verilmiştir.

$$W = \int_V w \cdot dV = \int_V \left[\int_0^B (H \cdot dB) \right] dV \quad (3.4)$$

Yukarıdaki iki denklemde H manyetik alan şiddetini, B ise manyetik alan yoğunluğunu vermektedir.

Bir malzemenin enerji ve koenerjisini BH eğrisine bakılarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.



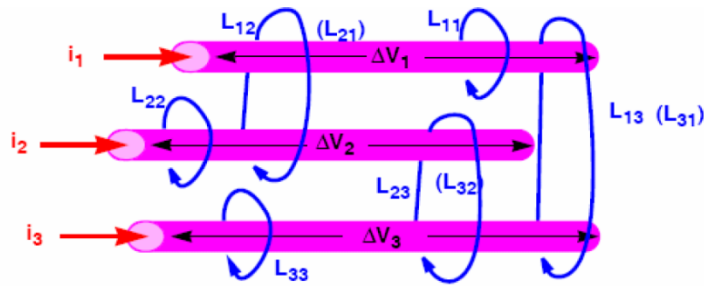
Şekil III.1 a) Doğrusal Malzeme, b) Doğrusal Olmayan Malzeme[77].

III.1.7. Bağı akısı ve akımın endüktans olarak ifadesi

Bir endüktans matrisi akım döngülerinin manyetik akıya ve birbirlerine olan etkisini gösterir. Üç akımlı bir sistem için şekil III.2'den yararlanılarak denklem 3.5'de öz ve karşıt endüktanslar verilmiştir[77].

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= L_{11}i_1 + L_{12}i_2 + L_{13}i_3 \\ \lambda_2 &= L_{21}i_1 + L_{22}i_2 + L_{23}i_3 \\ \lambda_3 &= L_{31}i_1 + L_{32}i_2 + L_{33}i_3\end{aligned}\tag{3.5}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}\tag{3.6}$$

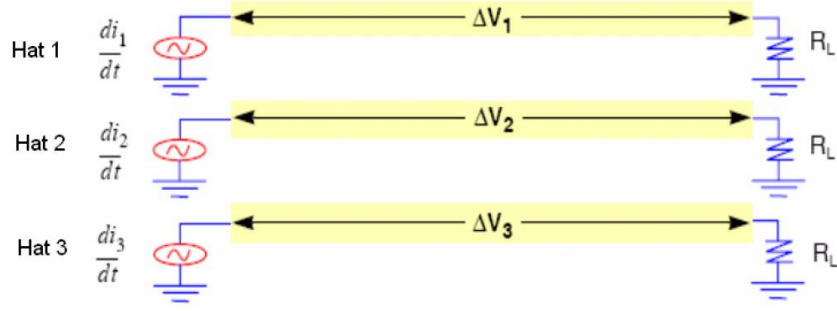


Şekil III.2 Akım endüktans ilişkisi[77].

III.1.8. Gerilim ve Zamanla Değişen Akıma Bağlı Olan Endüktans

Endüktans matrisi akım dalgalanmaları ve gerilim arasındaki ilişkiyi gösterecek şekilde denklem 3.7'de verilmiştir. Şekil 3.3'te ise gösterildiği gibi 3 adet bağımsız iletken vardır. Şekilde gösterildiği gibi zamanla değişen akımlar geriliminde değişimine neden olmaktadır[77].

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \\ \frac{di_3}{dt} \end{bmatrix}\tag{3.7}$$



Şekil III.3 Akım Değişimi Ve Gerilim Arasındaki İlişki[77].

Denklem 3.7’de üç hat için verilen ΔV ve di/dt değişimi arasındaki ilişkide ikinci ve üçüncü akım değişimleri sıfıra götürülürse aşağıdaki denklem elde edilir. Böylelikle birinci iletken üç döngü arasında endüktif kublajdır[77].

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{12} \\ L_{13} \end{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \quad (3.8)$$

III.1.9. Endüktans matrisindeki elemanlar

Aşağıdaki denklem 3.9’da birinci akıma 1 amper değerlerine sıfır amper uyguladığımızda elde ettiğimiz birinci endüktansa bağlı olan denklemdir[77].

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{12} \\ L_{13} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

III.1.10. Endüktans matrisindeki çapraz elemanlar

Denklem 3.9’daki L_{11} öz endüktansdır. Öz endüktans birinci sargıdan akım geçtiği ve diğer sargılardan akım geçmediği durumda ki bağ akısına eşittir[77].

III.1.11. Endüktans matrisindeki çapraz olmayan elemanlar

Karşılıklı endüktanslar ise L_{12} ve L_{13} olarak ifade edilmiştir. Karşılıklı endüktanslarda karşı sargıdan akım geçtiği diğer hiçbir sargıdan akım geçmediği durumdaki bağ akısını verir. Örnek olarak L_{12} endüktansı 2. Sargıdan akım geçtiği ve

diğer sargılar üzerinden akım geçmediği durumda birinci sargıda oluşan bağ akısıdır[77].

III.1.12. Simetri

Endüktans matrisi çapraz eksen üzerinde simetriktir. Bu durum iki sargı arasında karşılıklı etkilerin aynı olduğunu gösterir. Örneğin L_{13} endüktansı ile L_{31} endüktansı birbirine eşittir[77].

III.1.13. Endüktans matrisinin çözüm süreci

Endüktans matrisinin çözmek için manyetostatik çözücü tek alan çözümü üretir. Sistem her endüktans matrisinin girişini denklem 3.10'a göre hesaplar[77].

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \int H \cdot B d\Omega \quad (3.10)$$

3.10'daki eşitlikte akım 1 amper kabul edilirse eşitlik 3.11'i elde ederiz.

$$L = \int H \cdot B \cdot d\Omega \quad (3.11)$$

Matristeki her bir iletken bağımsız bir akım döngüsü farz edilir ve endüktans matrisindeki her bir elemanın katılımı sayısal matris işleme teknikleri ile modellenir[77].

III.1.14. Lorentz Kuvveti

Bir manyetik alandaki iletkenin ürettiği lorentz kuvveti aşağıdaki denklem 3.12'deki gibi çözülür[77].

$$F = \int_V j \times B dV \quad (3.12)$$

Program denklem 3.12'ye göre her bir obje için x,y,z düzlemlerinde birbirinden ayrı olarak lorentz kuvvetlerini hesaplar. Tanımlanan malzemelerin bağıl geçirgenlikleri 1'den büyük olduğu zaman lorentz kuvveti gerçek kuvveti hesaplamaz. Bu durumda zahiri kuvvet kullanılır[77 , 79].

III.1.15. Lorentz Momenti

Program x,y,z eksenleri etrafındaki momenti hesaplarken lorentz momentini kullanır. Lorentz momenti aşağıdaki denklem 3.13'deki gibi hesaplanır.

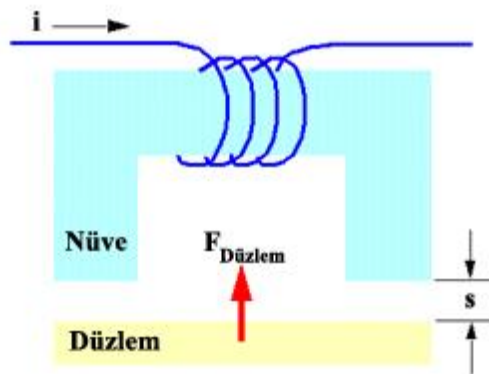
$$T = \int_V r \times (J \times B) dV \quad (3.13)$$

Denklem 3.13'de verilen r dönüş eksenindeki yer değiştirme vektörüdür. Denklem 3.13'de verilen integral ile her bir objenin x,y,z eksenlerindeki momenti hesaplanır. Burada da lorentz kuvvetinde olduğu gibi malzemenin bağıl geçirgenliği 1'den büyükse zahiri(virtual) moment kullanılır[77 , 79].

III.1.16. Zahiri Kuvvet

Sistem bir objedeki zahiri kuvveti hesaplama için gerçek çalışma prensibini kullanır. Şekil III.4'de gösterildiği gibi alt tablanın F kuvveti etkisiyle yer değiştirmesini veren denklem 3.14'de verilmiştir. Denklemde s yer değiştirme miktarıdır. W(s,i) ise manyetik koenerjidir. Burada akım sabit alınmıştır[77].

$$F_{plate} = \frac{dW(s, i)}{ds} \quad (3.14)$$



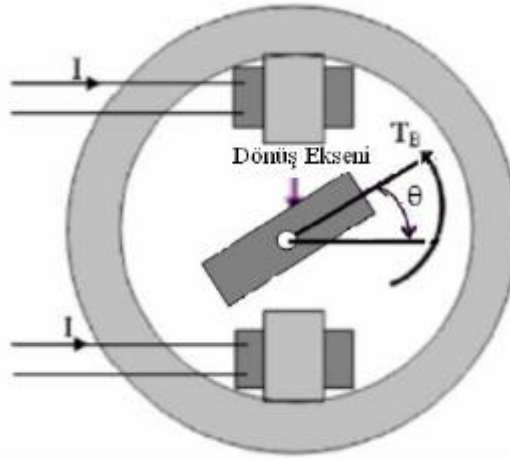
Şekil III.4 Akım Değişimi Ve Gerilim Arasındaki İlişki[77].

Şekil III.4’de palet kuvveti hesaplanırken aslında taşınmaz. Bunun yerine objenin dış yüzeyi boyunca yer alan dörtyüzlü eleman değiştirilir. Bu nedenle kuvvet hesabı sadece bir alan çözümüne ihtiyaç duyar[79].

III.1.17. Zahirî Moment

Zahirî kuvvet hesaplamasına benzerdir. Sistem sistem momenti hesaplarken gerçek çalışma prensibini kullanır. Şekil III.5’de verilen şekilde B objesinin dönüş yönündeki moment bağıntısı aşağıdaki denklem 3.15’de verilmiştir[77 , 79].

$$T_B = \frac{dW(\theta, i)}{d\theta}, i \text{ sabit} \quad (3.15)$$



Şekil III.5 Moment yönü[79].

III.2. YENİ BİR TOROİDAL AÇIK OLUKLU NN TİP EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI (TEASMAO-NN) SENKRON MOTORUN 3D MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Maxwelle manyetik analiz öncelikle 3D modelleme ile başlar. 3D modellemede önemli olan motorun parçalarının fiziksel büyüklükleridir. Stator dış ve iç çapını belirlerken önceki yapılmış çalışmalardan referans alınarak uygun değer olan $\lambda=0,61$ değeri ve istenen güç yoğunluğu değeri göz önünde tutulmuştur. Statorun fiziksel büyüklüğü rotorun da fiziksel büyüklüğünü belirlemede etkindir. Rotorda kullanılan mıknatısların büyüklüğünü belirlemek için ise öncelikli olarak dış ve iç çapın mesafesi dikkate alınarak uzunluğu 40mm olarak tespit edilmiştir.

Kullanılan mıknatısların eni için ise hem sargı adımı hem de sık bulunan mıknatıslar göz önünde bulundurulmuştur. Böylelikle tasarlanan motorun maliyetlerinin de minimum olması amaçlanmıştır. Mıknatısların sayısı ve yerleştirilme açılarını belirlemek için literatürde verilen belirli bir yöntem ve uygun değer yoktur. Bunun için maxwell ile değişik mıknatıs açılarında hava aralığındaki manyetik akı dağılımına bakılmıştır. Manyetik akının maksimum olduğu noktaya göre mıknatıs sayısı ve açısı belirlenmiştir.

Yukarıdaki fiziksel boyutlar belirlenerek aşağıdaki adımlara göre tasarım oluşturulmuş ve optimize edilmiştir.

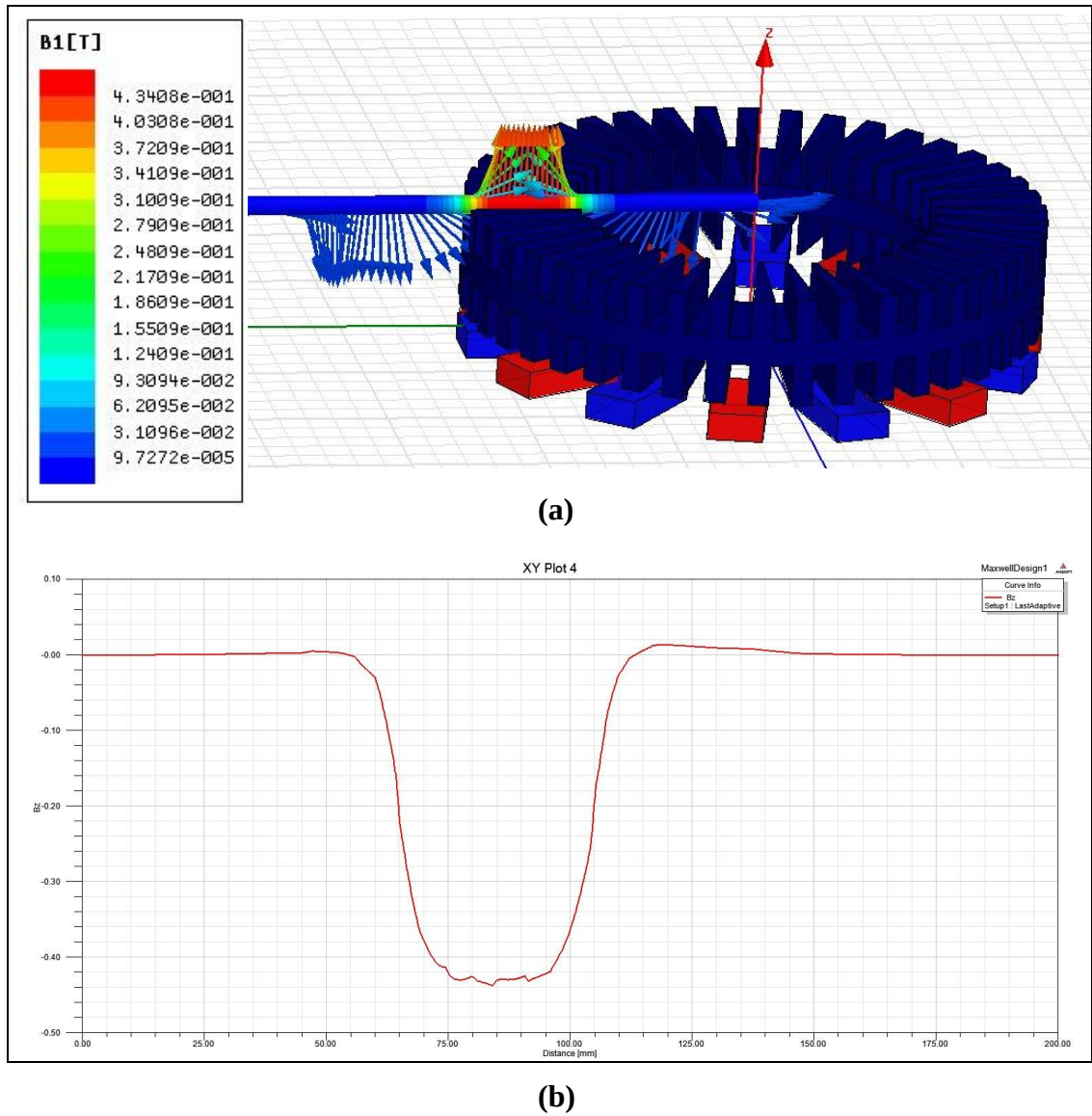
III.2.1. TEASMAO-NN Motorun 3D modellenmesi

Tasarımı ve analizleri yapılan yeni bir açık oluklu tip toroidal eksenel akılı sabit mıknatıslı NN tip(TEASMAO-NN) senkron motorun fiziksel boyutları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo III.1 Tasarımın Fiziksel Büyüklükleri

Stator Ölçüleri	
Stator Dış Çapı	210mm
Stator iç Çapı	130mm
Stator nüve kalınlığı	40mm
NdFeB mıknatıs ölçüleri	
Uzunluğu	40mm
Eni	20mm
Yüksekliği	10mm
Sargı	
Faz sayısı	3
Sargı genişliği	8mm
Sargı Yüksekliği	15mm
Sargı Sayısı	42
Hava aralığı	1.5mm
Rotor	
Rotor kalınlığı	5mm
Kutup sayısı	14
Rotor Çapı	230mm

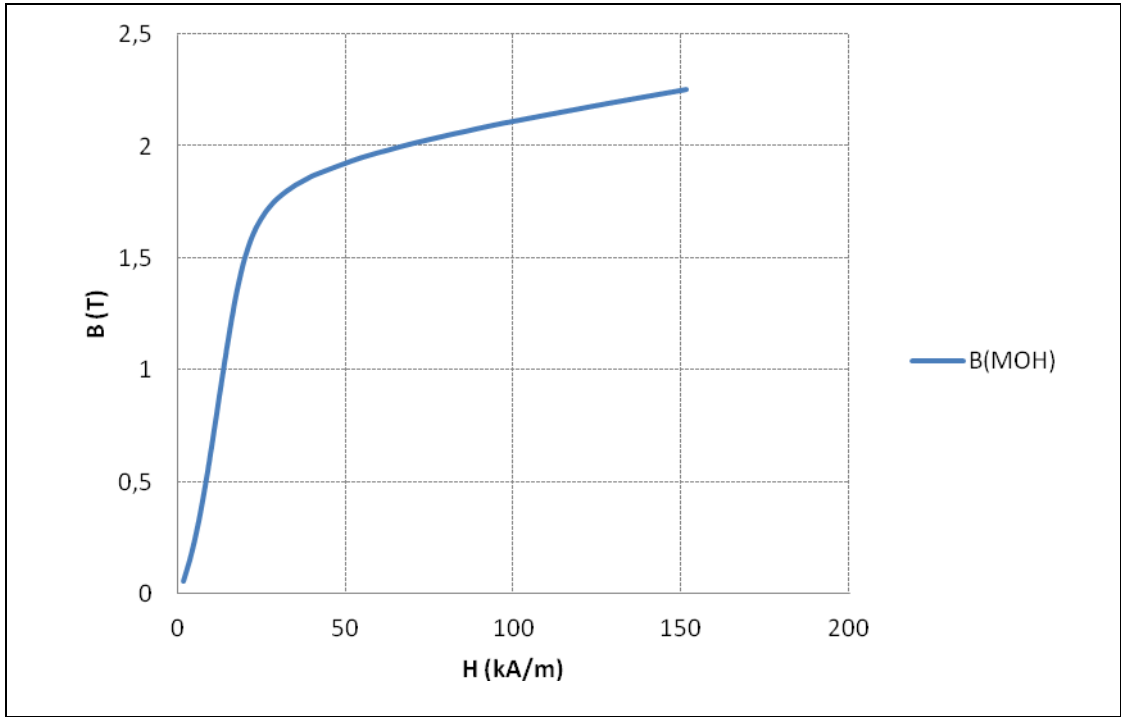
Belirlenen sınır koşullarının uygunluğunu denetlemek için 3 ekseninde 3 kontur belirlenerek kontur boyunca manyetik akıdaki değişim aşağıdaki şekil III.6 a-b’de verilmiştir. Görüldüğü gibi vakum bölgesinde manyetik akı değişimi sıfıra inmektedir. Bu yüzden alınan vakum bölgesi ölçüleri yeterlidir. Eğer gereğinden fazla vakum bölgesi büyütülürse hesaplama sürelerinde büyük artışa neden olmaktadır[79 , 80].



Şekil III.6 Manyetik Akının **a)3** boyutlu değişimi **b)İki** boyutlu değişimi

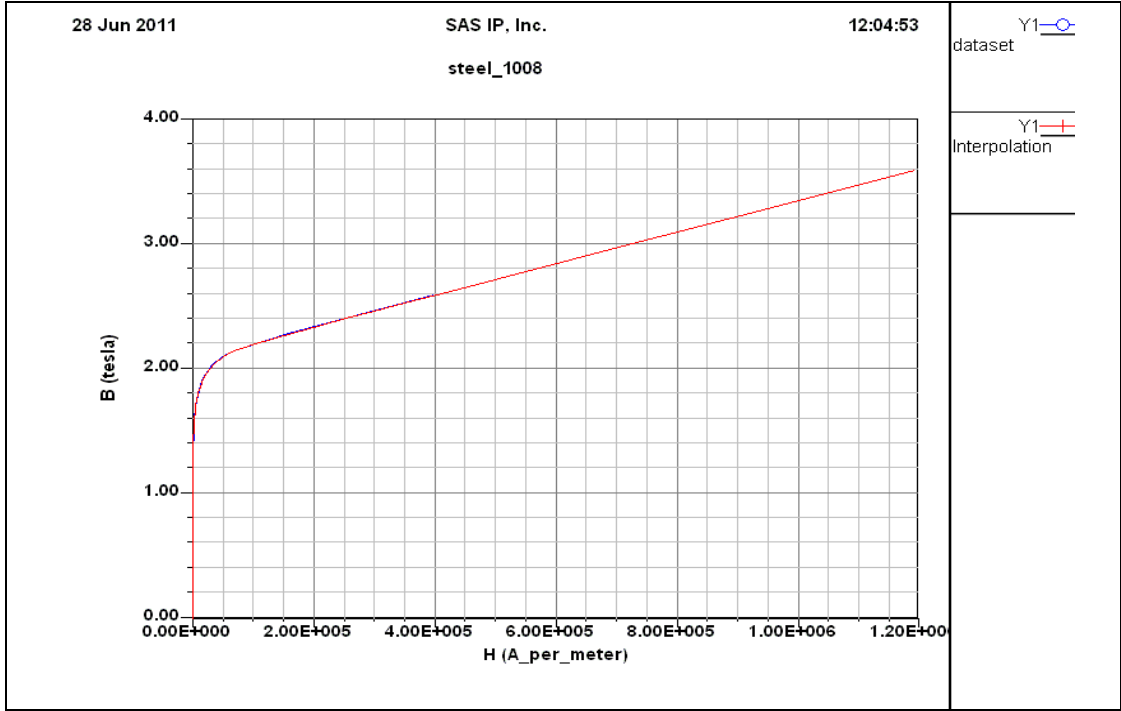
III.2.2. Malzeme tanımlamaları

Tasarlanan modelde nüve lamine edilmiştir. Ayrıca BH eğrisi çıkartılarak elde edilen değerler programa girilmiştir. Böylelikle gerçek koşullara daha yakın değerler elde etmek amaçlanmıştır. Deneysel yolla elde edilen veriler nüvenin alındığı firma değerleriyle de karşılaştırılarak ölçüm sonuçlarının geçerliliği sağlanmıştır. Tasarımda ve uygulamada kullanılan MOH nüvesinin BH eğrisi şekil III.7’de görüldüğü gibidir.



Şekil III.7 MOH nüvesinin BH eğrisi

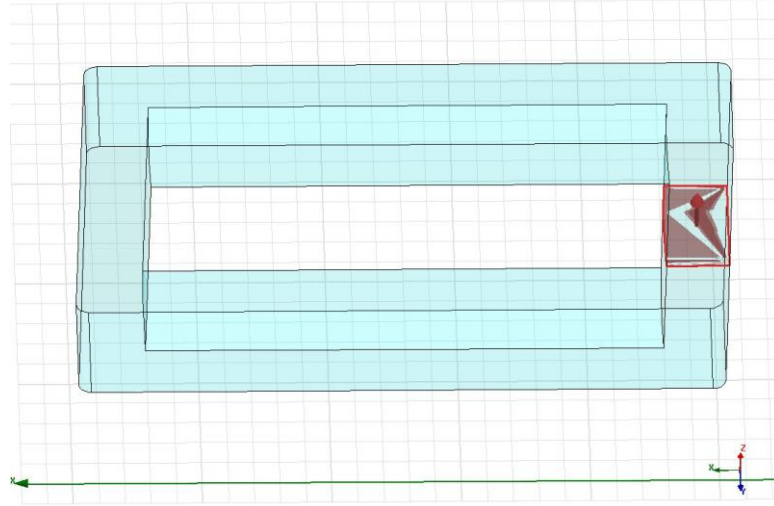
Tasarımda kullanılan sargılar ise program kütüphanesinden tek parça bakır olarak seçilmiştir. Rotorlar ise program kütüphanesinden steel 1008 malzemesi olarak belirlenmiştir. Bu malzemenin BH eğrisi de şekil III.8’de verilmiştir. Ayrıca mıknatıslar olarak ta yine program kütüphanesinden NdFeB 35 olarak seçilmiştir.



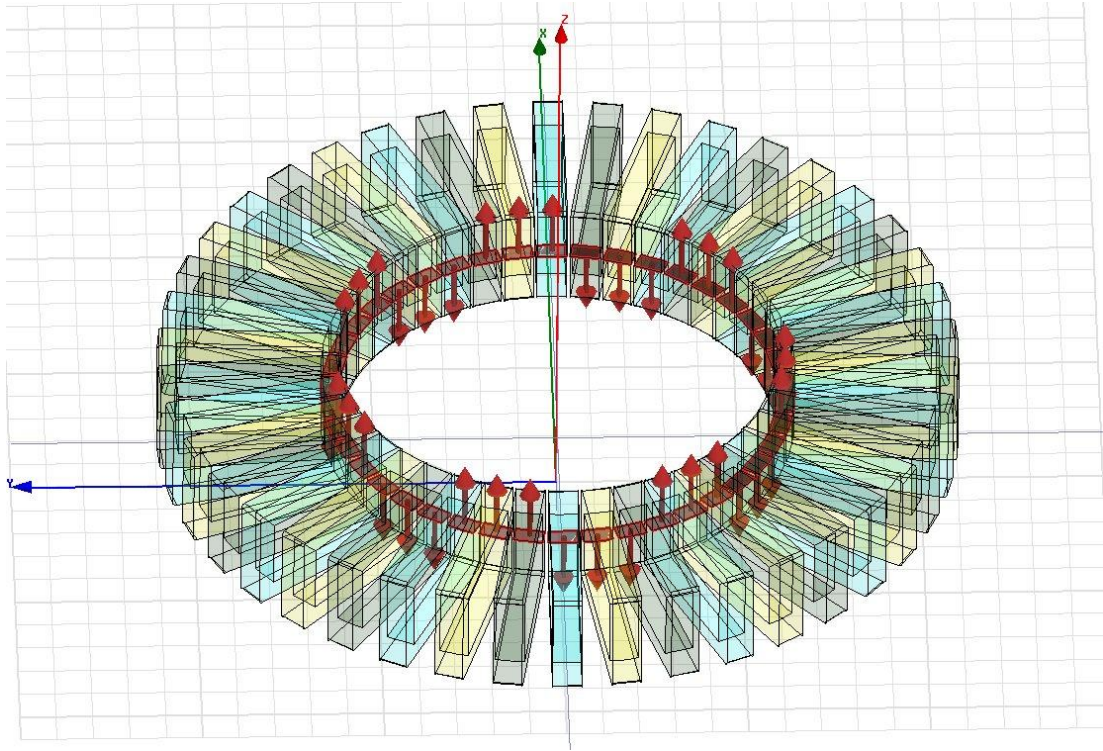
Şekil III.8 Steel 1008 BH eğrisi

III.2.3. Bakır Sargıların Terminal Tanımlamaları ve Akım Yoğunluğu

Tasarımda 42 adet sargı kullanılmıştır. Faz başına 14 sargı düşmektedir. Maxwellde her bir sargı tek bir iletken olarak modellenmektedir. Önemli olan modellenen her bir iletkenin kesiti ve akım yoğunluğudur. Bu iki parametre ayarlanarak uygulaması yapılırken sarılacak sipir sayısı ve geçirilen nominal akım değeri modellenebilmektedir. Yapılan tasarımda da şekil III.9’da görüldüğü gibi bir sargı için terminal ve akım yönü gösterilmiştir. Sargının terminali ise 15mm×8mm ölçülerindedir. Şekil III.10’da ise tüm model için terminallerin akım yönü gösterilmiştir.



Şekil III.9 Bir Sargı Terminalinin Akım Yönü

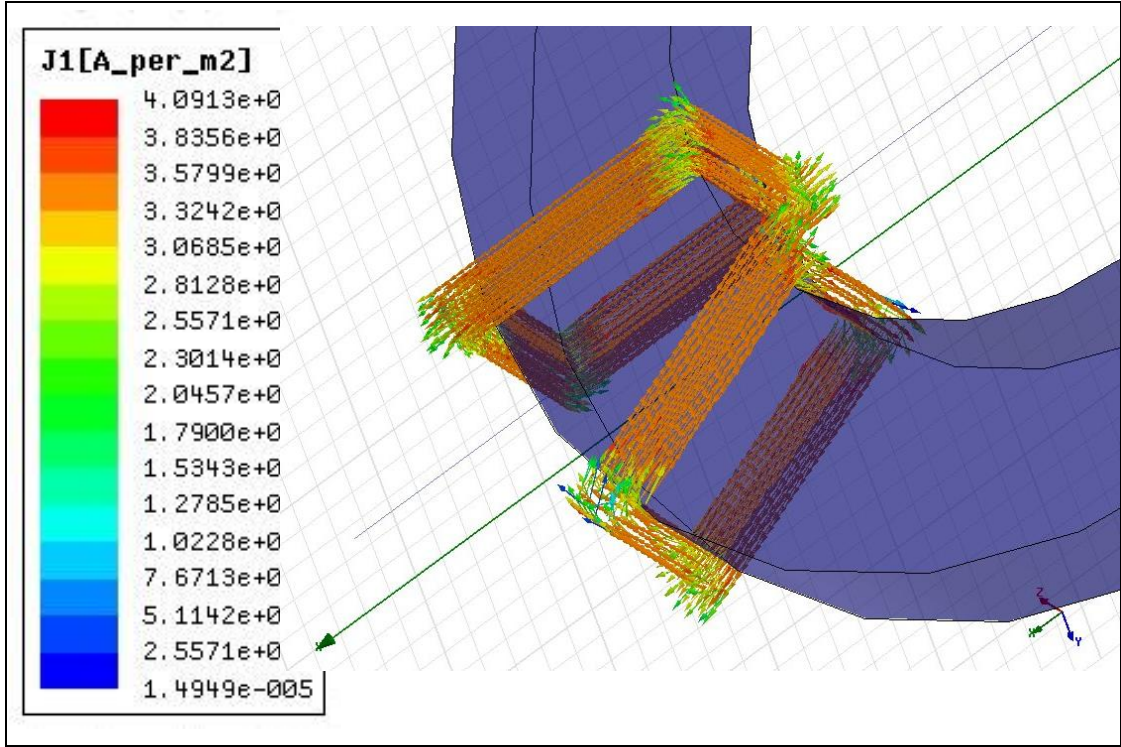


Şekil III.10 Tüm Terminallerin Akım Yönü

Programda hesaplama yaptırılırken herhangi bir zamanda sargılardan geçen akım ve rotor konumu göz önünde bulundurulmuştur. Dolayısıyla terminal akım yönleri belirlenirken her üç sargıdan geçen akım yönünün aynı olması sağlanmıştır. Ayrıca iki sargı enerjiliyken bir sargı enerjisiz bırakılmıştır.

III.2.4. Bir sargıdaki akım yoğunluğu

Şekil III.11'de bir sargıdan geçen akım yoğunluğun benzetimi verilmiştir. Programda sargılar tek sipir olarak belirlenmektedir. Önemli olan amper sarım miktarıdır. Bu yüzden toplam sipirden geçen akım değeri sargıda belirlenen kesit üzerinde tanımlanır. Buna göre de program aşağıdaki örnekte olduğu gibi akım yoğunluğunu kesite göre belirler.



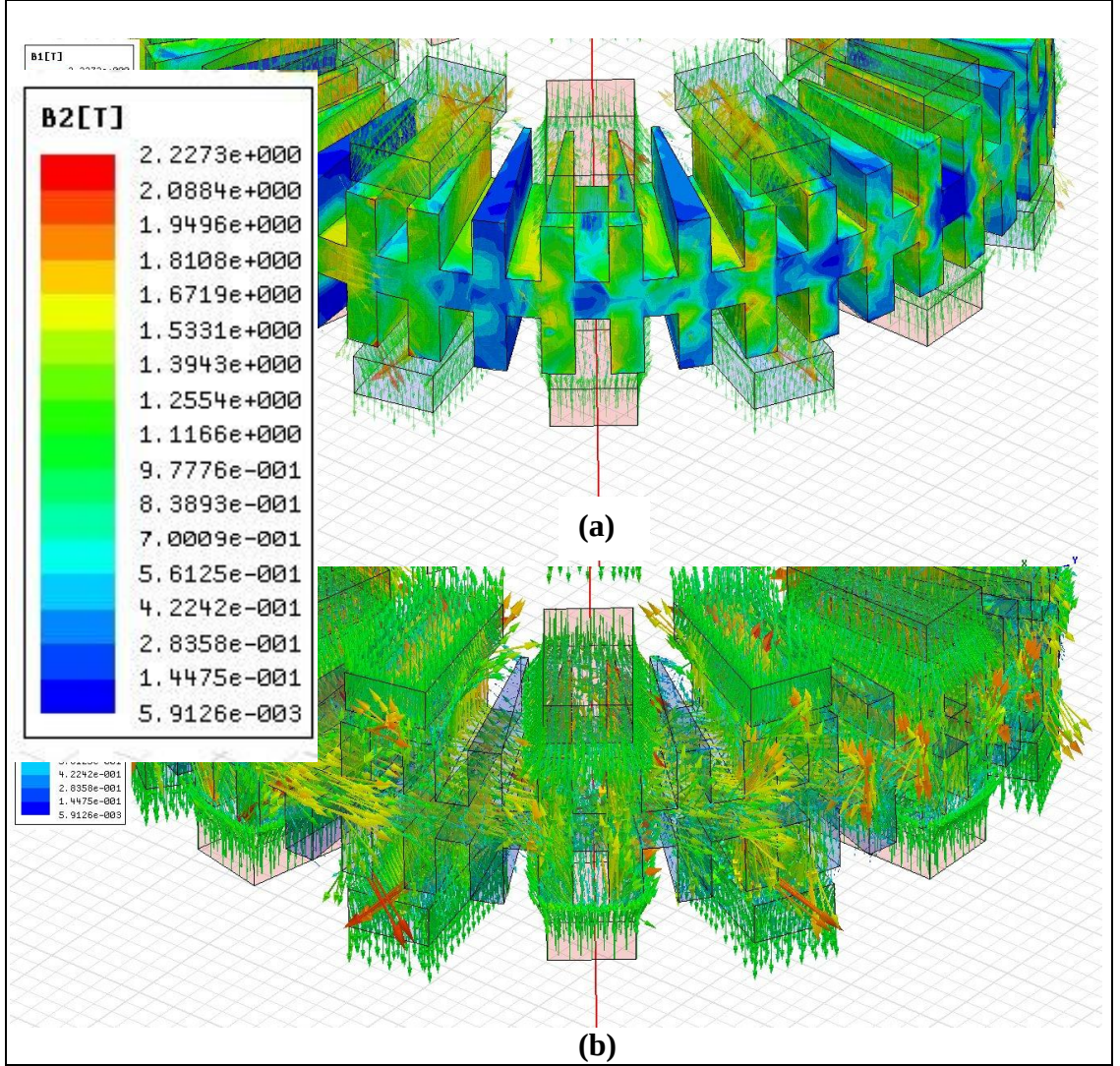
Şekil III.11 Sargılardaki akım yoğunluğu

III.3. TEASMAO-NN TİP MOTOR TASARIMININ ANALİZ SONUÇLARI

III.3.1. Kullanılan Mıknatısların Oluşturduğu Manyetik Akının Analizi

TEASMAO-NN tip motorun manyetik analizinde tasarlanan nüve boyunca ve mıknatıslardaki manyetik akının değişimi ve yönü önemlidir. Bu yüzden sargılar uyarılıp mıknatıslar ile birlikte manyetik akı yönleri Şekil III.12 a,b'de olduğu gibi çıkarılır. Şekil III.12 b'de görüldüğü gibi manyetik akı karşılıklı NN kutuplarında nüveye doğru, SS kutuplarında ise mıknatıslara doğru gelerek manyetik devresini tamamlamaktadır. Nüve yüzlerinden geçen ortalama manyetik akı değeri 1,11 tesla civarındadır. Kullanılan mıknatıslarda N35 tipi neodyum mıknatıslar olduğu için

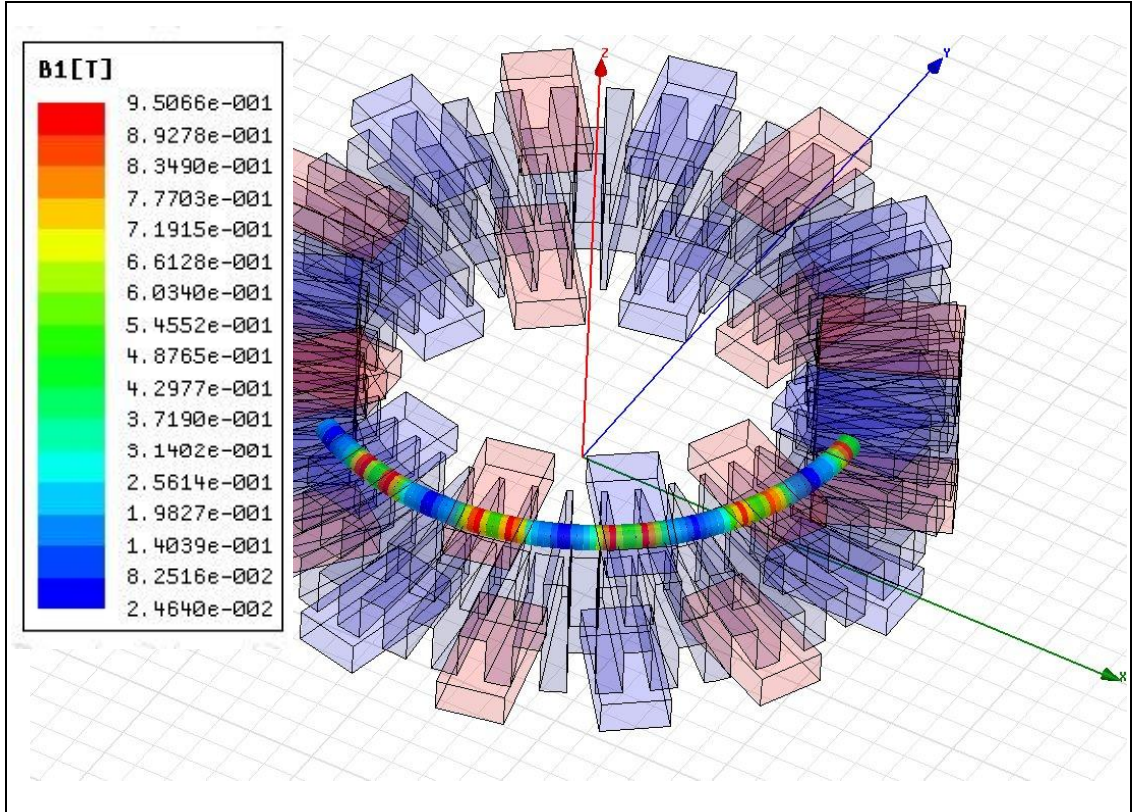
verebilecekleri manyetik akı değeri 1,25 tesla civarındadır. Şekil III.12 a’da açık oluk açılan nüve üzerinde doyum yapan birkaç nokta görülmektedir. Dolayısıyla nüve ve nüve oluk değerlerinin de yapılan tasarım için uygun olduğu sonucuna varılır.



Şekil III.12 Manyetik Akının Değişimi **a)**Nüve Yüzeyinde, **b)**Vektörel Değişim

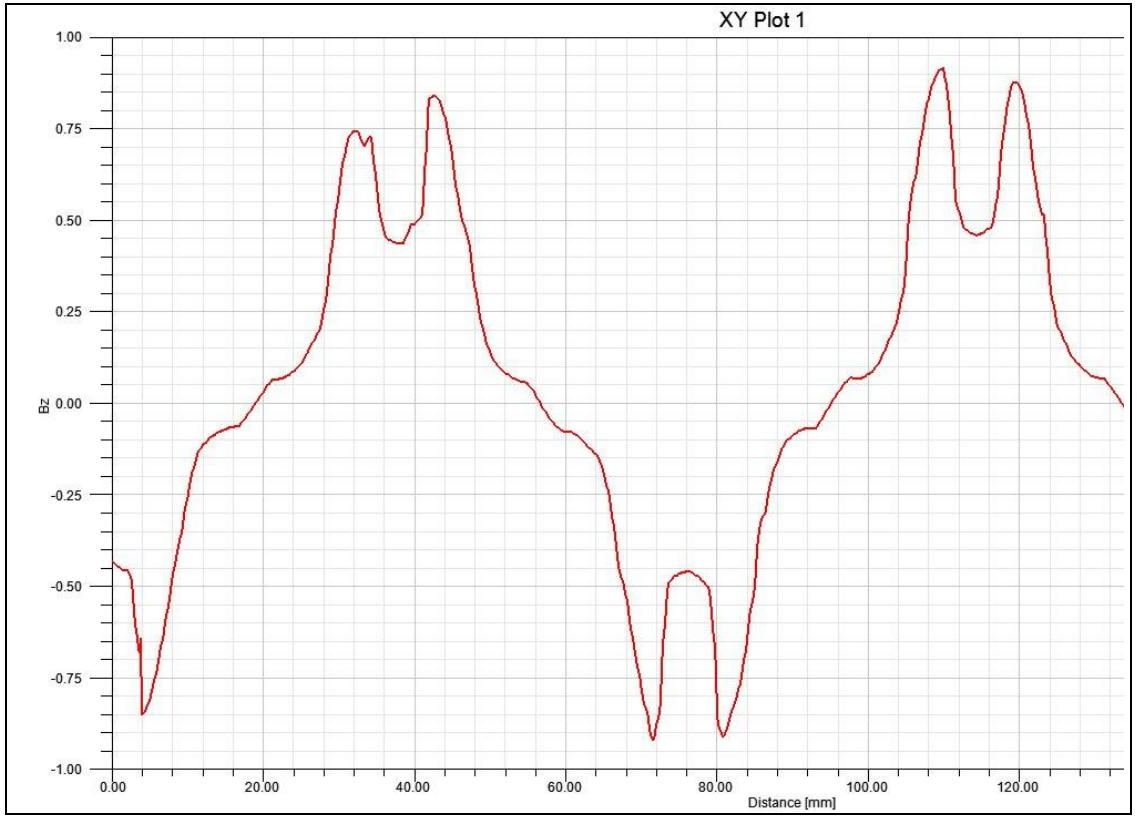
Tasarlanan motorda kullanılan mıknatısların yeterliliğini tespit etmek için hava aralığındaki akı dağılımına bakılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde 0,6 tesla dolayında manyetik akı yoğunluğunun motor tasarımı için yeterli olduğu görülmüştür[17 , 55 , 57].

Sargılar uyarılmadan sadece mıknatısların oluşturduğu manyetik alanlar şekil III.13’de görüldüğü gibi mıknatıs ile nüvenin ortasında belirlenen kontur boyunca incelenmiştir. Şekil III.13’de görüldüğü gibi mıknatıslar ile nüve oluk kenarlarında ki etkileşim kontur boyunca görülmektedir. Oluk boyunca ortalama 0,6 tesla manyetik akı şiddeti vardır. Mıknatıslara karşı gelen oluk kenarlarında ise 0,95 tesla civarında manyetik akı değeri vardır. Oluklu makinelerde vuruntu momentini oluşturanda nüve yüzeyi boyunca meydana gelen relüktans değişikliğidir.



Şekil III.13 Hava Aralığının Ortasındaki Konturda Meydana Gelen Manyetik Akı Değişimi

Aşağıdaki şekil III.14’de ise şekil III.13’de verilen kontur boyunca manyetik akı değişiminin grafiksel gösterimidir. Grafikten minumum, maksimum ve ortalama değerler kolaylıkla tespit edilir. Kutbun altındaki olukta meydana gelen manyetik akının minumum değeri 0,45 tesladır. Kutbun altındaki oluk kenarında meydana gelen manyetik akının maksimum değeri ise 0,9 tesla civarındadır. Kutub boyunca ortalama manyetik akı değişimine bakılırsa 0,6 tesla civarı olduğu görülmektedir. Bu değerde makine tasarımı için yeterli bir değerdir.



Şekil III.14 Hava Aralığının Ortasındaki Konturda Meydana Gelen Manyetik Akı Değişiminin Grafiği

BÖLÜM IV TASARIMIN UYGULAMASI

TASARIMIN UYGULAMASI

Tasarımı ve manyetik analizi gerçekleştirilen TEASMAO-NN tip motorun uygulanması öncelikle temel parçalarının mekanik olarak birleştirilmesine dayanır. Bir elektrik motorunun temel 3 parçası vardır. Bunlar rotor, stator ve kapaklardır. Analitik ve manyetik hesaplamalarda motorun rotoru ve statorunun yapısı hakkında temel bilgiler(mıknatıs sayısı, iç çap, dış çap, sargı sayısı, sipir sayısı, bağlantı şekli ve nüve kalınlığı gibi) belirlenir. Uygulama esnasında ise bu yapıların birbirine kullanım amacı da gözeterek bağlanması gerekir. Burada da öncelikle mekanik olarak tasarımın yapılması gerekir.

Tasarımının ve uygulamasının yapılacağı TEASMAO-NN tip motorun laboratuvar uygulamalarında kullanılabilecek esneklikte olması da tasarımı şekillendiren önemli bir faktördür. Bu yüzden TEASMAO-NN tip motorun rotor ve statorunu birbirine bağlayabilecek gövdenin şekillendirilmesi için 3D çizim programı kullanılmıştır. Öncelikle programda rotor ve stator tasarlanmıştır. Daha sonra bu iki yapıyı birbirine bağlayacak gövde ve mil tasarımı yapılmıştır. Son olarak ise laboratuvar da uygulama yaparken TEASMAO-NN tip motorun karşısına bağlanabilecek moment sensörü, fuko freni ve dc motor düzeneklerinin yerleştirileceği alt gövde tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde öncelikli olarak 3D tasarım aşamaları verilmiştir. Daha sonra ise TEASMAO-NN tip motorun üretim aşamaları ile yapılan deneyler ve sonuçları verilmiştir.

IV.1. TEASMAO-NN TİP MOTORUN ÜRETİMİ

IV.1.1. Açık Oluklu Tip Nüvenin Sargı Hesabı ve Sargı Şeması

Sargı şeması için öncelikle bölüm II’de verilen denklem 2.1-8 nolu eşitlikler yardımıyla sargı bilgileri hesaplanır. Motorda kullanılan sargı tipi ise toroidal sargı

tipidir. Öncelikle formül 2.1'den faz başına düşen sargı sayısı formül 4.1'den 14 olarak hesaplanır.

$$n_c = \frac{x}{m} = \frac{42}{3} = 14 \quad (4.1)$$

Bir kutup altındaki oluk sayısı ise formül 2.2'den yararlanılarak formül 4.2'de 3 olarak hesaplanır.

$$Y_x = \frac{x}{2P} = \frac{42}{14} = 3 \quad (4.2)$$

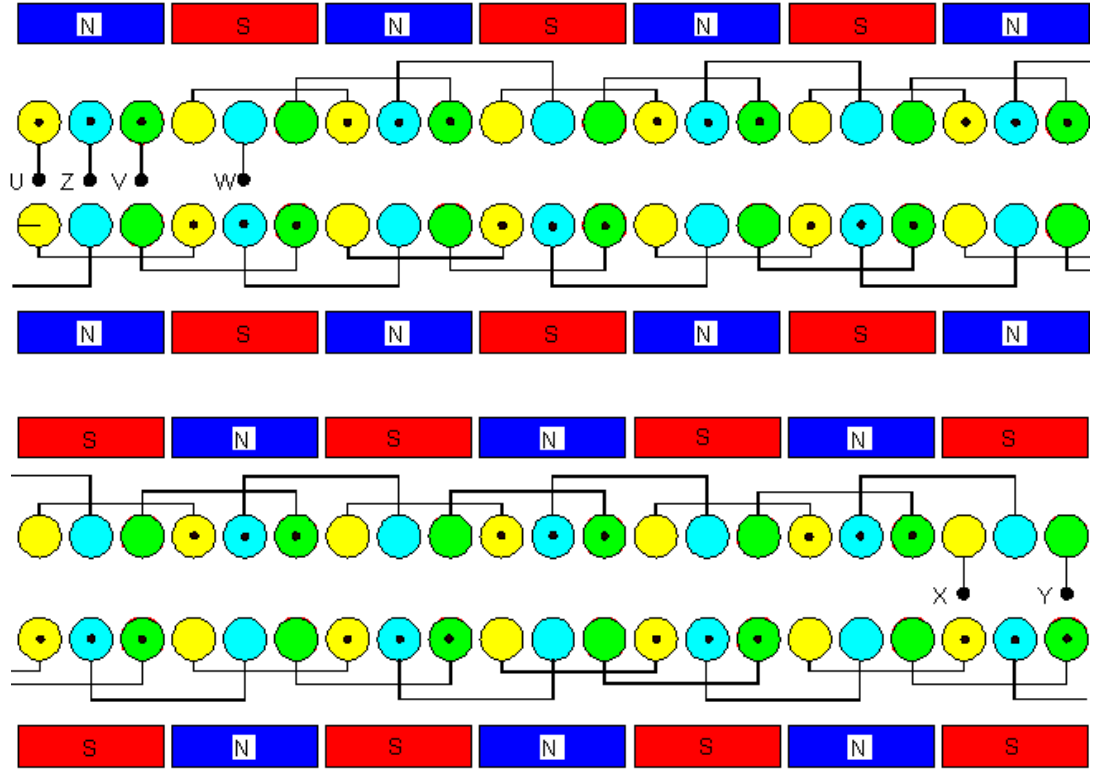
Her fazın bir kutup altındaki oluk sayısı ise formül 2.3'den yararlanılarak formül 4.3'de verildiği gibi 1 olarak bulunur.

$$c = \frac{x}{2Pm} = \frac{42}{14 \cdot 3} = 1 \quad (4.3)$$

Formül 2.5 ve 2.6'da adım ve dağıtım katsayıları K_a , K_d 1 olarak alınmıştır. İki sargı arasındaki elektriki açı ise formül 2.7'den yararlanılarak formül 4.4'de verildiği gibi 60 derece olarak hesaplanmıştır.

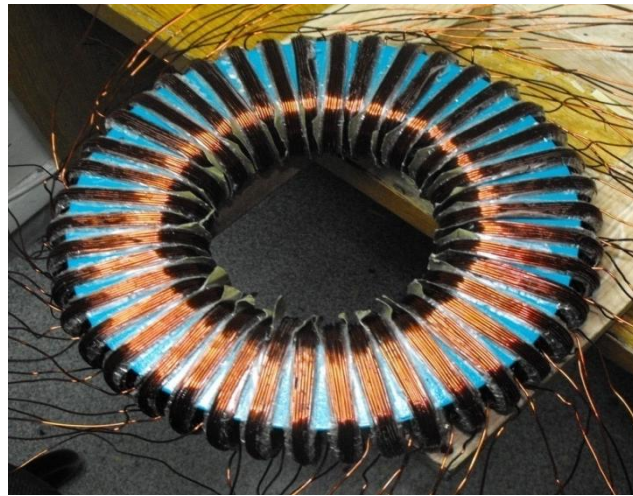
$$\alpha = \frac{180 \cdot 2P}{x} = \frac{180 \cdot 14}{42} = 60^\circ \quad (4.4)$$

Yukarıdaki hesaplamalara göre sargı sayısı ve sargıların fazlara ve kutuplara göre dağılımı yapılır. Buna bağlı olarak yapılan toroidal sargı şeması şekil IV.1'de verildiği gibidir. Toroidal sargı uygulamasından ve karşılıklı aynı kutupların kullanılmasından dolayı sargılar giriş girişe, çıkış çıkışa bağlanmıştır.



Şekil IV.1 Sargı Bağlantı Şeması

Şekil IV.1’da verilen sargı şemasına göre Şekil IV.2’de gösterilen nüveye toroidal sargı uygulanmıştır. Toplam 42 sargı sarılmıştır. Her bir sargı 88 sipirden oluşmaktadır. Her bir sargı nüve yüzeyinden 3mm dışarı çıkacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil IV.2 Nüve ve 3 Faz Sargısı

IV.1.2. Statorun döküm tipi dış gövdesi

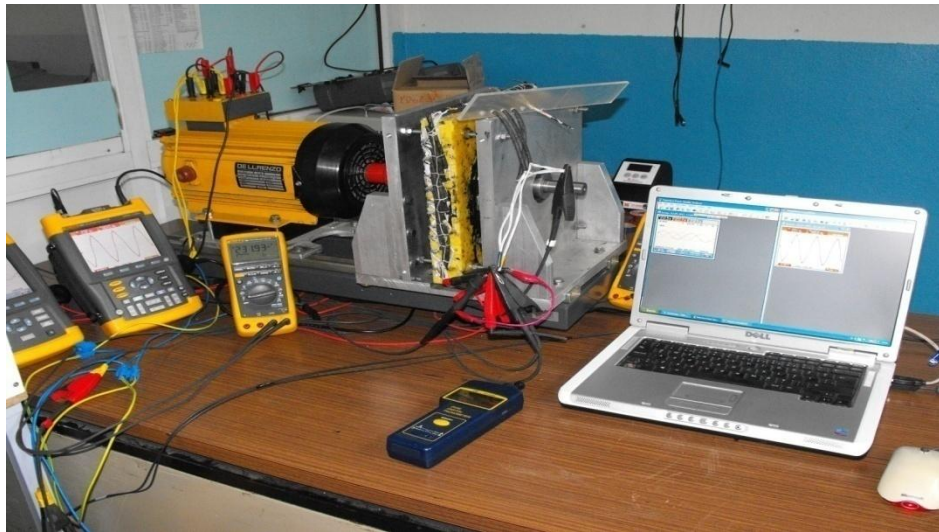
Statoru deney setine monte edebilmek için oluşturulan katı modele bağlı olarak stator için cnc frezede bir kalıp hazırlanmıştır. Hazırlanan kalıp sayesinde statorun dışına epoxy sıvı dökülmüştür. Bir gün bekledikten sonra nüve deney setinde kullanılabilir duruma gelmiştir. Ayrıca kullanılan epoxy malzeme sayesinde ısı transferi yapmakta mümkün olmuştur.

IV.1.3. Gövde ve Kapakların Üretimi

Rotor, stator ve milin yerleştirileceği kapaklar ve gövde sistemi sert alüminyumdur. Tasarlanan kapak ve alt gövde sistemi sayesinde üretilen farklı stator ve rotor yapıları kolaylıkla denenebilmektedir. Gövde ve kapak yapısı sayesinde laboratuar uygulamalarında değişik eksenel akılı motor uygulamaları kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

IV.1.4. TEASMAO-NN Tip Motor

Yukarıda ayrı ayrı tasarımı yapılan rotor, stator, kapaklar ve gövde aşağıdaki şekil IV.3-4’de verildiği gibi birleştirilmiştir. Şekil IV.3’de TEASMAO-NN tip motorun diğer tarafına bağlanan asenkron motor sayesinde ters elektro motor kuvvetleri çıkartılmıştır. Bunun içinde asenkron motor abb firmasının ACS800 serisi yol verici sistemi ile sürülmüştür.



Şekil IV.3 TEASMAO-NN Tip Motor ve Asenkron Motor Seti

Aşağıdaki şekil IV.4’de verilen sistemde TEASMAO-NN tip motorun diğer tarafına fuko freni bağlanmıştır. TEASMAO-NN tip motor ile fuko freni arasına moment sensörü bağlanmıştır. Fuko freni ile yüklenen TEASMAO-NN tip motorun boş durum ve yüklü durum için çalışma deneyleri bu set ile gerçekleştirilmiştir. veriler fluke osilasko ve fluke 435 serisi power analyzer ile ACS800 serisi sürücünün bilgisayar yazılımından toplanmıştır. Ayrıca moment sensöründen alınan veriler data yakalama kartı(DAQ) ile toplanarak excelde işlenmiştir.



Şekil IV.4 TEASMAO-NN Tip Motor ve Fuko Fren Seti

IV.2. TEASMAO-NN TİP MOTORUN DENEYSEL SONUÇLARI

Toroidal eksenel akılı sabit mıknatıslı açık oluklu NN tip motorun şekil IV.3-4’de verilen setlerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçü aletleri aşağıdaki tablo IV.1’de verilmiştir.

Tablo IV.1 Deney Setlerinde Kullanılan Ölçü Aletleri

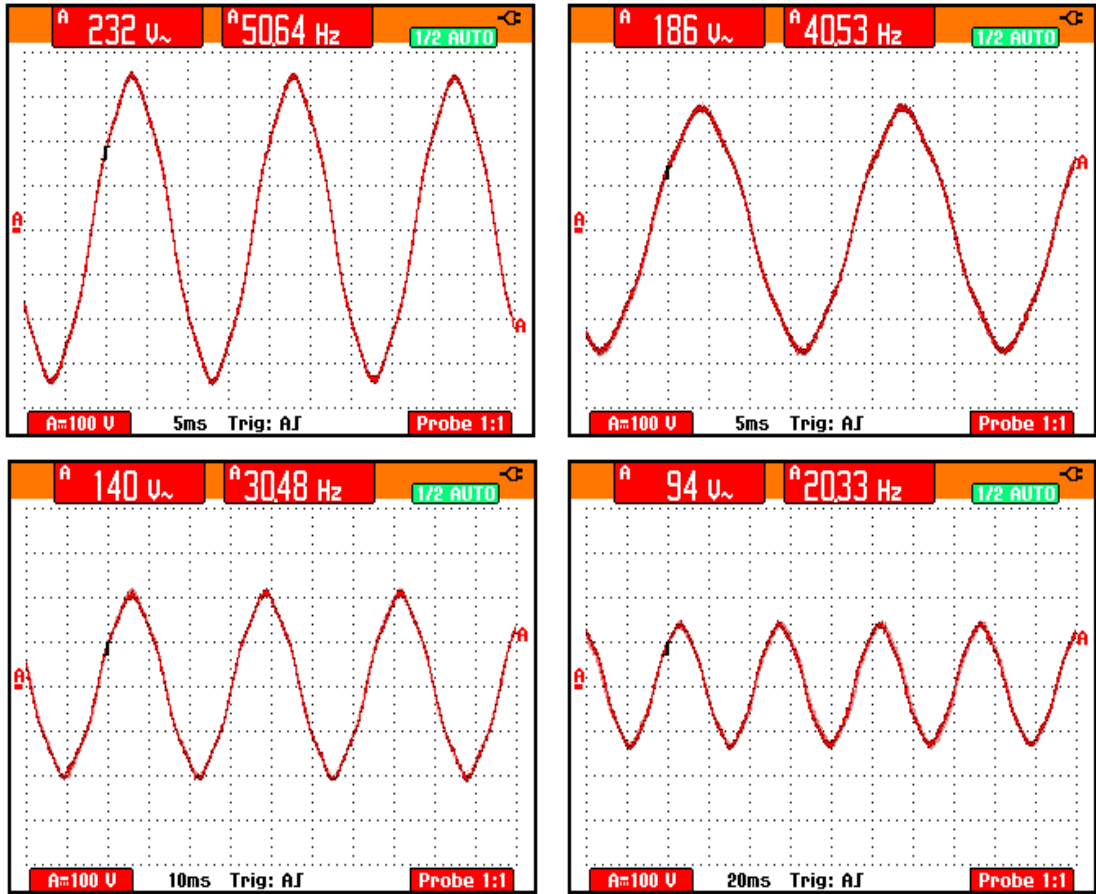
Kullanım Amacı	Ölçü Aleti
TEASMAO-NN tip motoru sürmek için	ACS 800 serisi sürücü
Yüklü çalışma deneylerinde moment ölçümü için	NCTE firması 2000 serisi moment sensörü
Moment bilgisinin bilgisayara kaydedilmesi için	Personal DaqView Kartı
Vuruntu Momentlerinin ve boş çalışma momentlerinin elde edilmesi için	Moment Sensörü
Gerilim ve akım Dalga Şekilleri ve $\cos\phi$ ’nin tespiti için	Fluke Osilaskop 199C
Güç akışı için	Fluke 434 Güç Analizörü
Gerilim ve akım değerlerinin RMS değerleri için	Fluke 189 Multimetre

Öncelikle tasarımı ve uygulaması yapılan TEASMAO-NN tip motorun ters EMK’sı farklı hızlar için tespit edilmiştir. Daha sonra elektriksel parametrelerinin tespiti, boş çalışma deneyi ve yüklü çalışma deneyleri yapılarak sonlandırılmıştır.

IV.2.1. TEASMAO-NN Tip Motorun Ters EMK'sının Tespiti

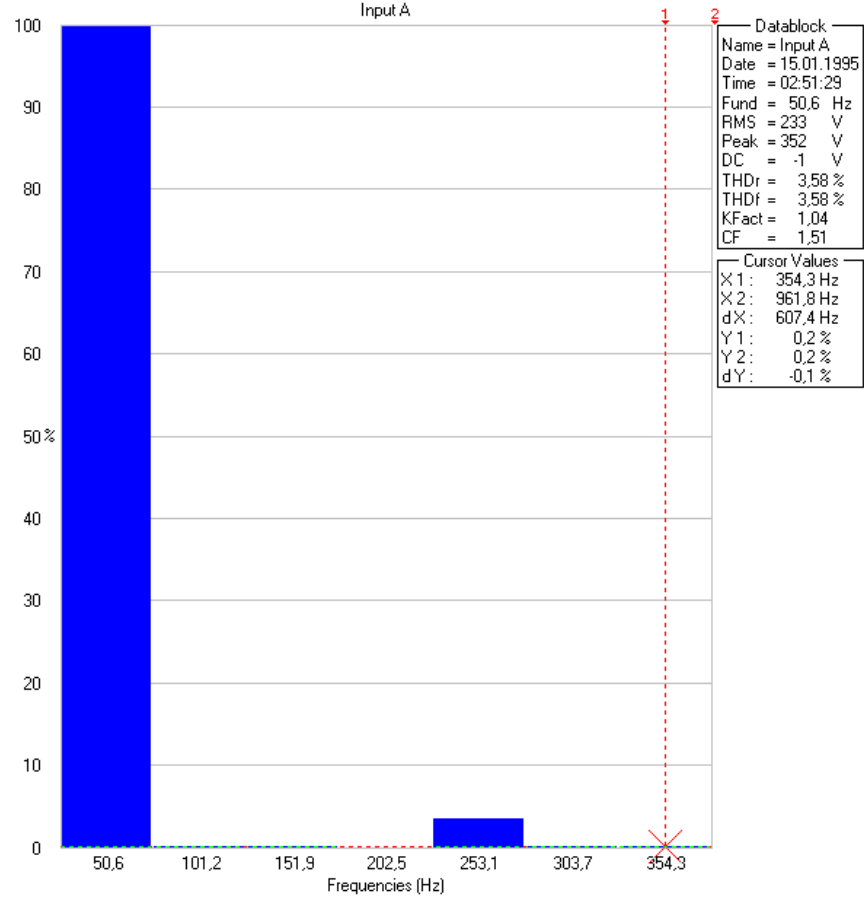
TEASMAO-NN tip motorun ters emk'sının tespiti için şekil IV.3'deki bağlantı gerçekleştirilmiştir. TEASMAO-NN tip motorun uçları boş bırakılarak miline değişik hızlarda mekanik enerji uygulanmıştır. Sabit mıknatıslardan dolayı oluşan ters emk değeri farklı devirlerde kaydedilerek deney gerçekleştirilmiştir.

Şekil IV.5'de gösterildiği gibi TEASMAO-NN tip motorun farklı frekans değerleri için ters EMK dalga şekilleri osilaskop yardımıyla kaydedilmiştir. Alınan değerler fazlar arası değerlerdir. 50.64 Hz frekansında $U_h=232$ volt, 40.53 Hz frekansında $U_h=186$ volt, 30.48 Hz frekansında $U_h=140$ volt, 20.33 Hz frekansında ise $U_h=94$ volt elde edilmiştir.



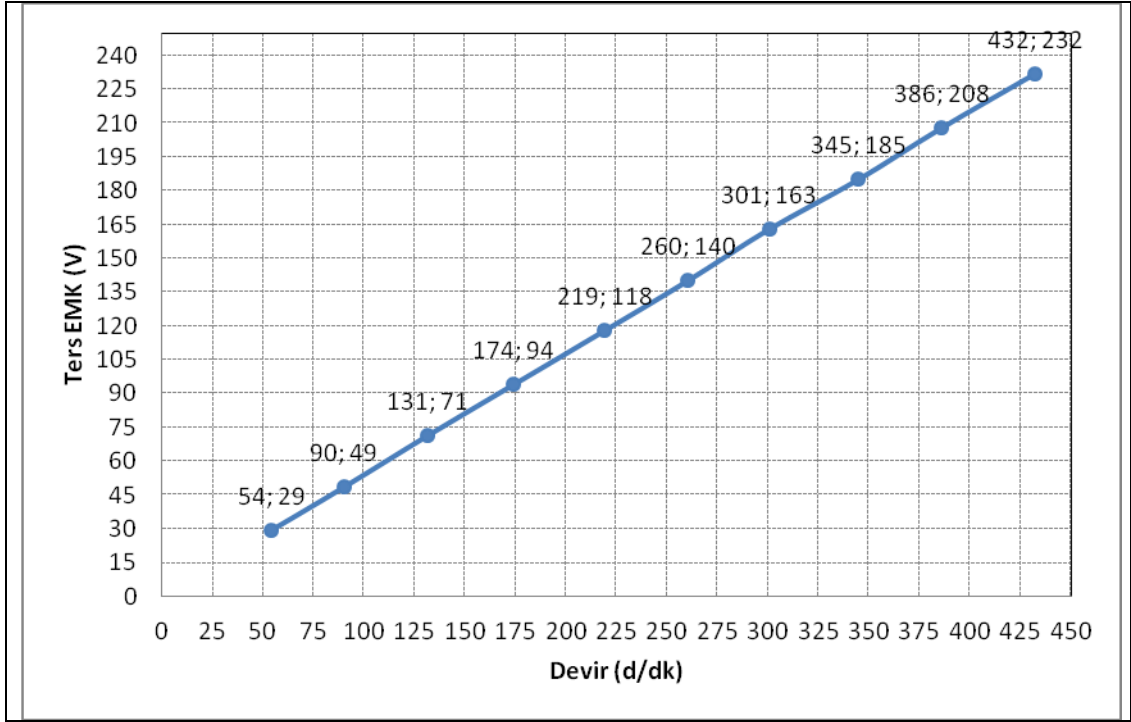
Şekil IV.5 TEASMAO-NN Tip Motorun Farklı Frekans Değerlerinde Ters EMK Dalga Şekli

Şekil IV.5’de görüldüğü gibi değişik frekanslardaki gerilim eğrileri sinüsoidale yakındır. 50.64 Hz frekansı için harmonik bozulması şekil IV.6’da verilmiştir. Alınan değerlere bakıldığında toplam 5. Harmonik toplam harmonik bozulması %3,58’dir.



Şekil IV.6 TEASMAO-NN Tip Motorun 50.64 Hz Frekansındaki Harmonik Bozulması

Şekil IV.7’de farklı devir sayıları için indüklenen ters EMK değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi devir sayısına bağlı olarak gerilim değeri doğrusal olarak artmaktadır. Bu değer TEASMAO-NN tip motorun farklı devirlerde çalışabilmesi için uygulanabilecek gerilim değeri hakkında bize fikir vermektedir. Örneğin 432 d/dak ile döndürülmek istendiğinde motora yüküne bağlı olarak $U_h=232$ volt’tan daha yüksek bir gerilim uygulamak gerekmektedir.



Şekil IV.7 TEASMAO-NN Tip Motorun Devir Ters EMK Grafiği

IV.2.2. TEASMAO-NN Tip Motorun Direnç, Empedans ve d-q Eksen Reaktanslarının Bulunması

TEASMAO-NN Tip motorun eşdeğer devre parametrelerinin deneysel olarak bulunmasında öncelikle direnç değerinin ölçülmesi gerekir. Bunun için yıldız bağlı TEASMAO-NN tip motorun iki ucuna farklı değerlerde dc gerilim uygulanarak geçen akım ve uygulanan gerilim değerleri kaydedilir. Tablo IV.2’de görüldüğü gibi uygulanan farklı iki gerilim değeri için geçen akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Ohm kanuna göre R_{dc} direnç değeri tablo IV.2’de verildiği gibi bulunmuştur. Yıldız bağlı olduğu ve iki faz arasından ölçüm yapıldığı için bulunan direnç değeri ikiye

bölünmüştür. Buna göre TEASMAO-NN tip motorun Rdc değeri 4,16 ohm olarak deneysel yolla hesaplanmıştır.

Tablo IV.2 Rdc Direnç Değerinin Tespiti

U	I	Rdc	Rdc/2
7,931	0,9528	8,32	4,16
11,896	1,4278	8,33	4,165

TEASMAO-NN tip motorun d ve q eksen reaktanslarının deneysel olarak bulunması için yapılan çalışmalarda yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemde göre mıknatıslar sırasıyla d ve q eksenlerine (d eksen için mıknatıslar oluk kenarları üzerine getirilmiştir. Q eksen için ise mıknatıslar sargı üstüne hizlanmıştır.) hizlanıp bir sargıya gerilim uygulanıp diğer iki sargı uçları boş bırakılmıştır. Böylelikle alınan değerlerden hesaplanan empedanslar bize d ve q eksen empedanslarını vermektedir [64].

Tablo IV.3 d-q Eksen Empedanslarının Bulunması

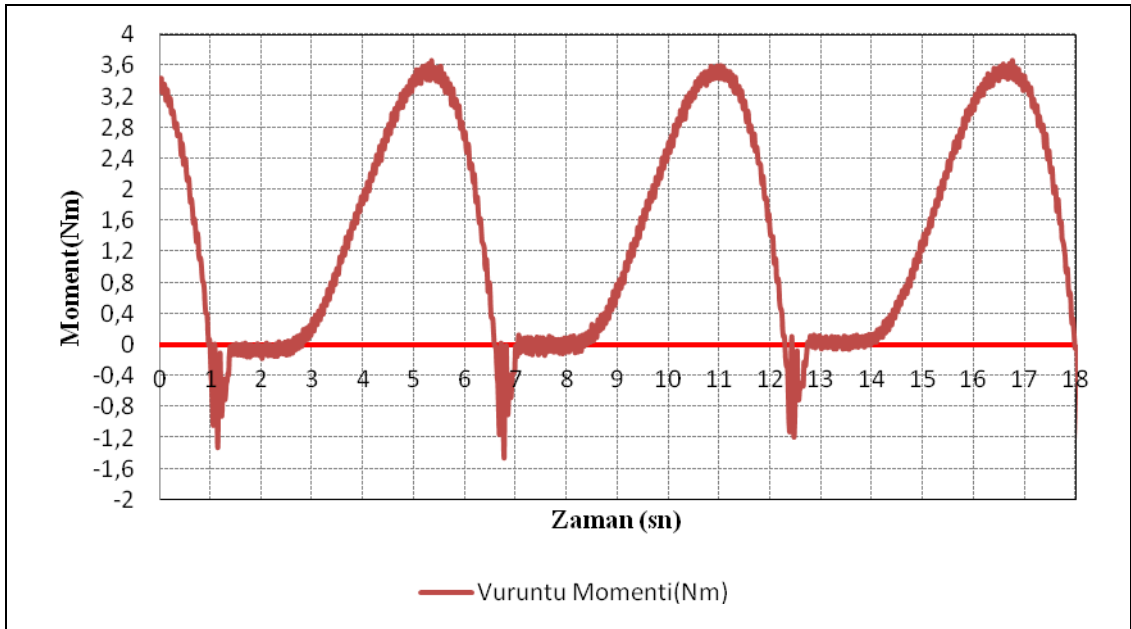
	Sargı Üstünde q Eksen	Nüve Üstünde d Eksen
I (A)	1,16	1,23
U (V)	18	18
Z (ohm)	15,517	14,63
I (A)	1,9	2,02
U (V)	29,7	29,6
Z (ohm)	15,63	14,65
X (ohm)	14,9	13,85
L (mH)	47,46	44,11

IV.2.3. TEASMAO-NN Tip Motorun Vuruntu Momentinin Bulunması

Vuruntu momenti nüve olukları ile mıknatıs kenarlarının etkileşimi sonucunda ortaya çıkan moment değişimidir. Oluklu tip nüvelerde mıknatıs ve oluk şekline bağlı olarak önemli derecede vuruntu momenti oluşur. Yapılan birçok araştırma konusu da vuruntu momentini minimize etme yönündedir. Tasarımı ve uygulaması yapılan TEASMAO-NN tip motorda da açık oluk sistem kullanıldığı için vuruntu momenti söz konusudur. Fakat geleneksel oluklu motorlara göre nüve ile mıknatıs arası mesafenin fazla olmasından dolayı vuruntu momentinin değeri düşüktür. Bu yüzden ekstra yöntemler kullanarak vuruntu momentini giderici düzenekler üretmeye

gerek yoktur. Bundan dolayı vuruuntu momentini gidermek için maliyeti yüksek alternatiflere gerek kalmamaktadır.

TEASMAO-NN tip motorun vuruuntu momentini tespit etmek için mıknatısların çok düşük hızda hareket etmesine dayalı bir sistem geliştirilmiştir. Bunun için TEASMAO-NN tip motorun karşısına redüktörlü bir asenkron motor bağlanmıştır. Redüktörlü asenkron motor çok düşük hızlarda döndürülerek aradaki moment sensörü yardımıyla TEASMAO-NN tip motorun mıknatısları ve oluk kenarları arasındaki etkileşim ortaya çıkartılmıştır. Şekil IV.8’de gösterildiği gibi vuruuntu momentinin tepe değeri 3,4 Nm olarak ölçülmüştür. Şekil IV.8’den anlaşıldığı üzere mıknatısların nüve oluk kenarlarındaki etkileşimin maksimum olduğu, sargı üstünde ise minimum olduğu görülmektedir.



Şekil IV.8 TEASMAO-NN Tip Motorun Vuruuntu Momenti

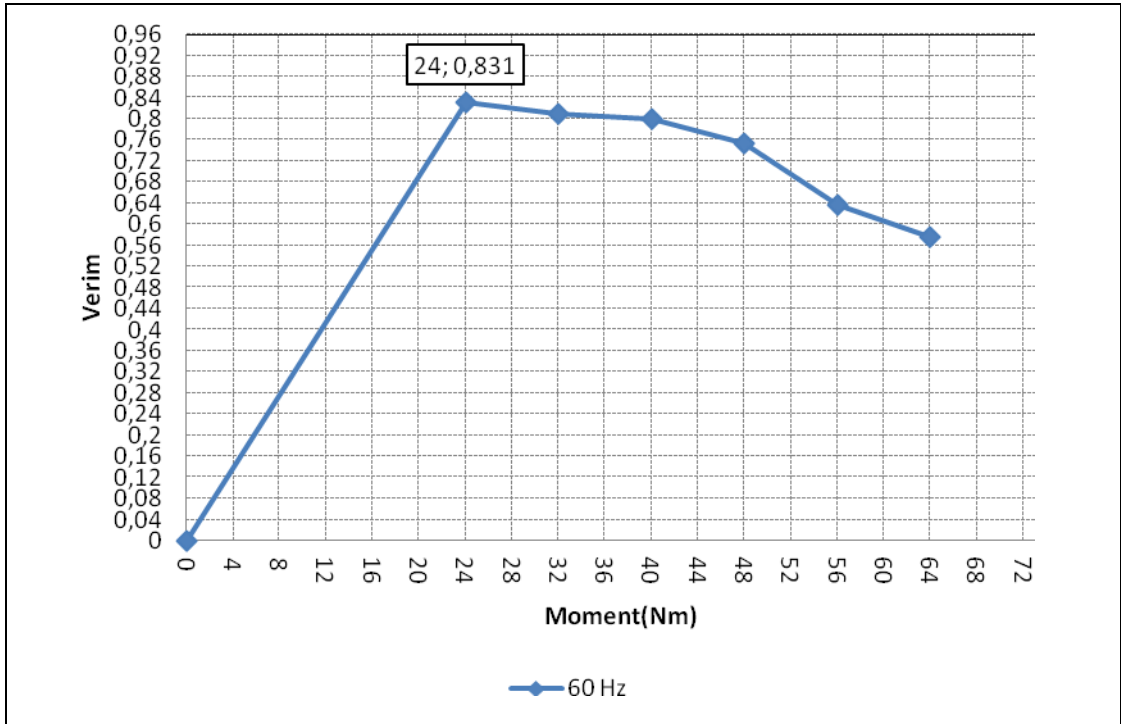
IV.2.5.1. TEASMAO-NN Tip Motorun Moment Verim Grafiklerinin Farklı Çalışma Frekanslarında Çıkarılması

Aşağıdaki tablo IV.4 ise şekil IV.10'daki grafiğin değerleri ve diğer motor parametreleri verilmiştir. Maksimum verim noktası 24 Nm'de %83 ve 32 Nm'de ise %81 değerindedir. Dolayısıyla giriş gücü açısından 1553 watt ve 2125 watt değerlerinde yüksek verimle TEASMAO-NN tip motor çalıştırılabilir.

Tablo IV.4 60 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri

Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Uh (V)	Ih (A)	Pgiriş (W)	Sgiriş (VA)	Cos(ϕ)	Verim (μ)
24	1291	280	3,34	1553	1617	0,960	0,831
32	1722	270	5	2125	2335	0,910	0,810
40	2153	280	5,75	2696	2785	0,968	0,798
48	2583	280	7,21	3429	3492	0,982	0,753
56	3014	265	10,5	4736	4813	0,984	0,636
64	3445	255	13,7	5983	6043	0,990	0,575

Şekil IV.10'da 60 Hz frekansında değişik momentlerde TEASMAO-NN tip motorun verimi verilmiştir. Verimin maksimum olduğu nokta 24 Nm değerine karşılık gelmektedir.



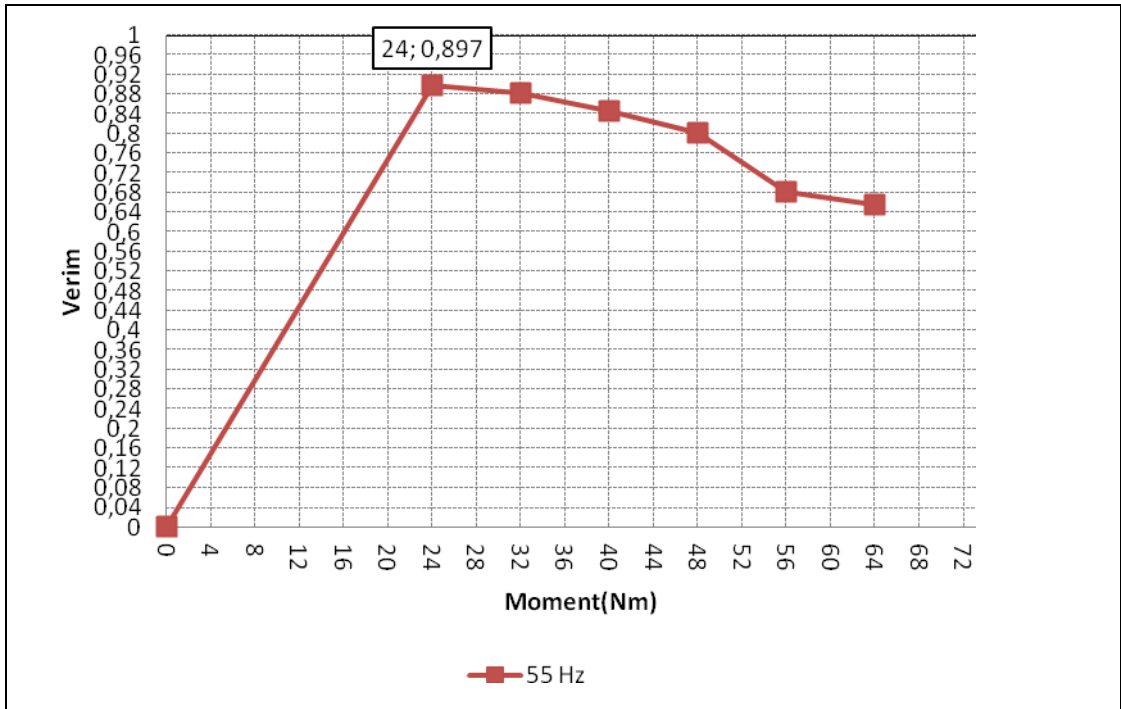
Şekil IV.10 TEASMAO-NN Tip Motorun 60 Hz Moment-Verim Grafiği

Aşağıdaki tablo IV.5 ise şekil IV.11'deki grafiğin değerleri ve diğer motor parametreleri verilmiştir. Maksimum verim noktası 24 Nm'de %89,7 ve 32 Nm'de ise %88,2 değerindedir. Dolayısıyla giriş gücü açısından 1318 watt ve 1788 watt değerlerinde yüksek verimle TEASMAO-NN tip motor çalıştırılabilir.

Tablo IV.5 55 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri

Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Uh (V)	Ih (A)	Pgiriş (W)	Sgiriş (VA)	Cos(ϕ)	Verim (μ)
24	1184	275	2,8	1318	1332	0,990	0,897
32	1578	280	3,73	1788	1806	0,990	0,882
40	1973	280	4,86	2330	2354	0,990	0,846
48	2368	280	6,15	2955	2979	0,992	0,801
56	2763	265	8,96	4054	4107	0,987	0,681
64	3157	265	10,6	4806	4859	0,989	0,657

Şekil IV.11'de 55 Hz frekansında değişik momentlerde TEASMAO-NN tip motorun verimi verilmiştir. Verimin maksimum olduğu nokta 24 Nm değerine karşılık gelmektedir. Ayrıca 24-32 Nm değerleri arasında verimin yüksek olduğu görülmektedir.



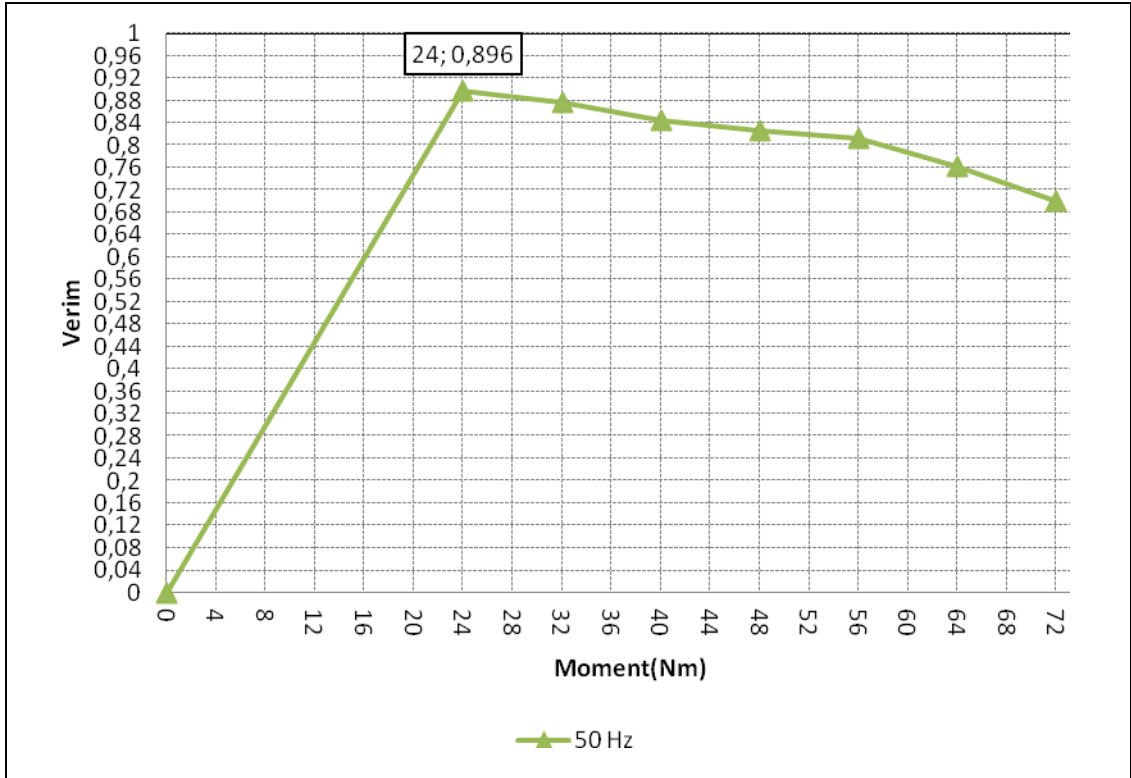
Şekil IV.11 TEASMAO-NN Tip Motorun 55 Hz Moment-Verim Grafiği

Aşağıdaki tablo IV.6 ise şekil IV.12'deki grafiğin değerleri ve diğer motor parametreleri verilmiştir. Maksimum verim noktası 24 Nm'de %89,6 ve 32 Nm'de ise %87,5 değerindedir. Dolayısıyla giriş gücü açısından 1201 watt ve 1638 watt değerlerinde yüksek verimle TEASMAO-NN tip motor çalıştırılabilir.

Tablo IV.6 50 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri

Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Uh (V)	Ih (A)	Pgiriş (W)	Sgiriş (VA)	Cos(ϕ)	Verim (μ)
24	1076	255	2,75	1201	1213	0,990	0,896
32	1435	260	3,68	1638	1655	0,990	0875
40	1794	265	4,65	2123	2131	0996	0,845
48	2153	270	5,65	2604	2639	0,987	0,826
56	2512	285	6,3	3093	3106	0,996	0,811
64	2870	280	7,82	3765	3788	0,994	0,762
72	3229	270	9,92	4605	4633	0,994	0,701

Şekil IV.12'de 50 Hz frekansında değişik momentlerde TEASMAO-NN tip motorun verimi verilmiştir. Verimin maksimum olduğu noktalar 24-32 Nm değerleri arasına karşılık gelmektedir.



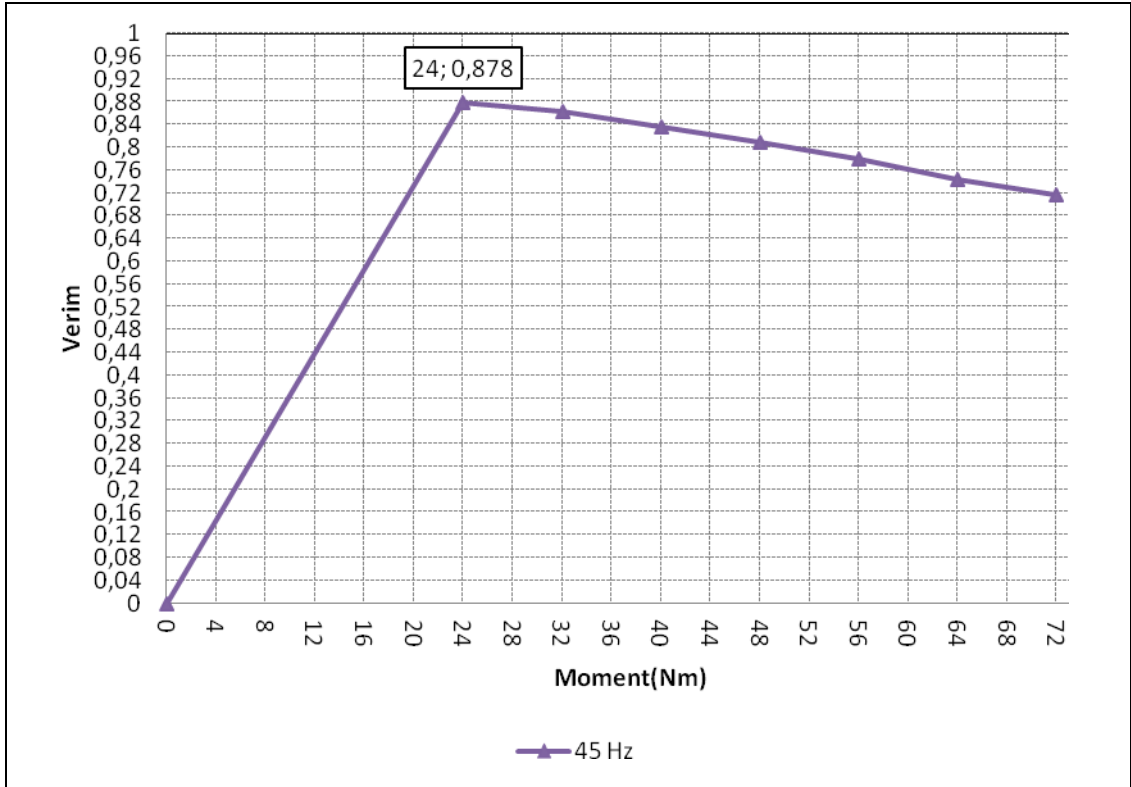
Şekil IV.12 TEASMAO-NN Tip Motorun 50 Hz Moment-Verim Grafiği

Aşağıdaki tablo IV.7 ise şekil IV.13'deki grafiğin değerleri ve diğer motor parametreleri verilmiştir. Maksimum verim noktası 24 Nm'de %87,8 ve 32 Nm'de ise %86,3 değerindedir. Dolayısıyla giriş gücü açısından 1114 watt ve 1511 watt değerlerinde yüksek verimle TEASMAO-NN tip motor çalıştırılabilir.

Tablo IV.7 45 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri

Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Uh (V)	Ih (A)	Pgiriş (W)	Sgiriş (VA)	Cos(φ)	Verim (μ)
24	968	230	2,8	1102	1114	0,990	0,878
32	1291	240	3,64	1496	1511	0,990	0,863
40	1614	245	4,58	1931	1941	0,995	0,836
48	1937	255	5,45	2392	2404	0,995	0,810
56	2260	265	6,34	2900	2906	0,998	0,779
64	2583	265	7,59	3469	3479	0,997	0,744
72	2906	270	8,72	4060	4073	0,997	0,715

Şekil IV.13'de 45 Hz frekansında değişik momentlerde TEASMAO-NN tip motorun verimi verilmiştir. Verimin maksimum olduğu noktalar 24-32 Nm değerleri arasına karşılık gelmektedir.



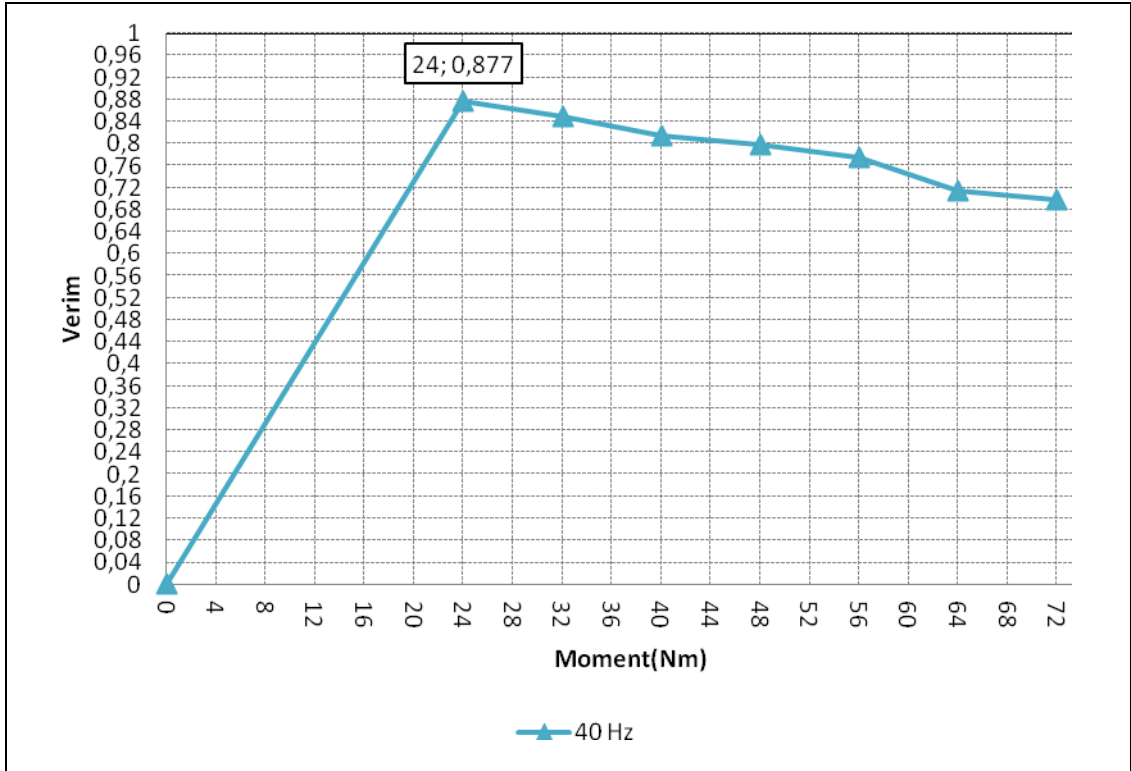
Şekil IV.13 TEASMAO-NN Tip Motorun 45 Hz Moment-Verim Grafiği

Aşağıdaki tablo IV.8 ise şekil IV.14'deki grafiğin değerleri ve diğer motor parametreleri verilmiştir. Maksimum verim noktası 24 Nm'de %87,7 ve 32 Nm'de ise %84,9 değerindedir. Dolayısıyla giriş gücü açısından 981 watt ve 1351 watt değerlerinde yüksek verimle TEASMAO-NN tip motor çalıştırılabilir.

Tablo IV.8 40 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri

Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Uh (V)	Ih (A)	Pgiriş (W)	Sgiriş (VA)	Cos(ϕ)	Verim (μ)
24	861	210	2,73	981	991	0,990	0,877
32	1148	215	3,67	1351	1365	0,990	0,849
40	1435	225	4,54	1763	1767	0,998	0,813
48	1722	230	5,43	2156	2160	0,998	0,798
56	2009	240	6,26	2593	2599	0,998	0,774
64	2296	245	7,61	3215	3225	0,997	0,714
72	2583	255	8,4	3698	3705	0,998	0,698

Şekil IV.14'de 40 Hz frekansında değişik momentlerde TEASMAO-NN tip motorun verimi verilmiştir. Verimin maksimum olduğu nokta 24 Nm değerine karşılık gelmektedir.



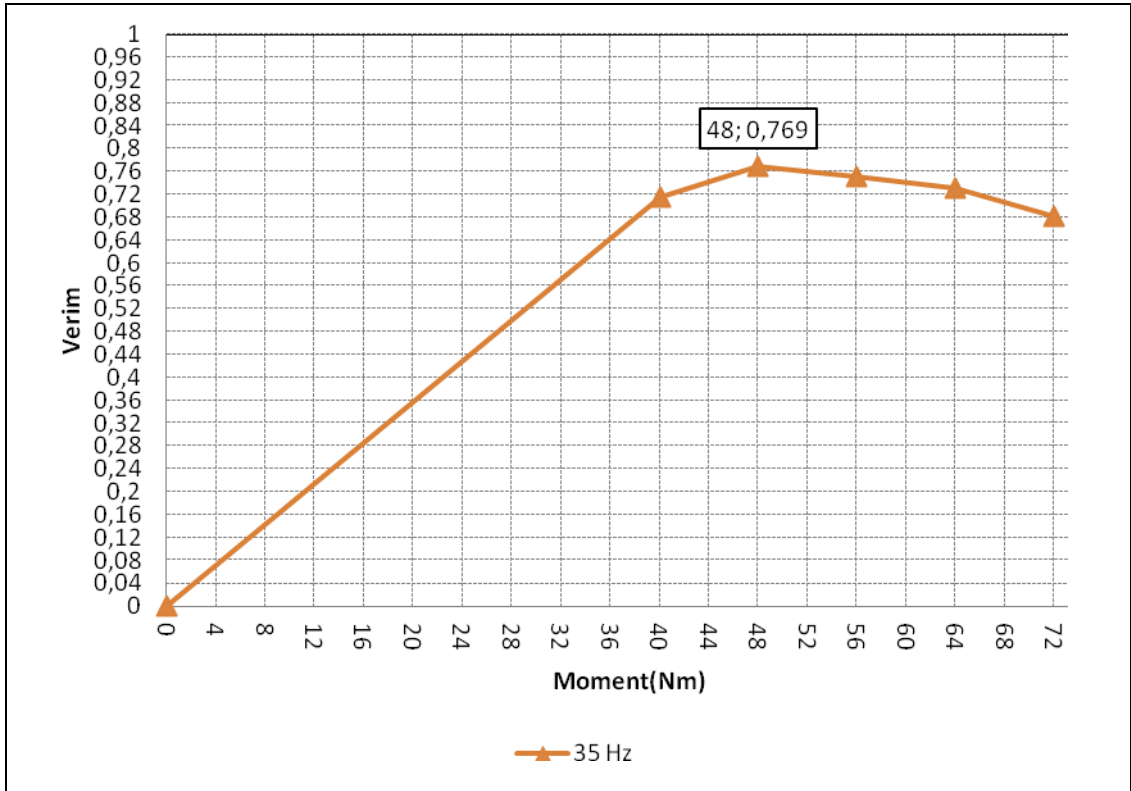
Şekil IV.14 TEASMAO-NN Tip Motorun 40 Hz Moment-Verim Grafiği

Aşağıdaki tablo IV.9 ise şekil IV.15'deki grafiğin değerleri ve diğer motor parametreleri verilmiştir. Maksimum verim noktası 48 Nm'de %76,9 ve 56 Nm'de ise %75,1 değerindedir. Dolayısıyla giriş gücü açısından 1957 watt ve 2339 watt değerlerinde yüksek verimle TEASMAO-NN tip motor çalıştırılabilir.

Tablo IV.9 35 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri

Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Uh (V)	Ih (A)	Pgiriş (W)	Sgiriş (VA)	Cos(ϕ)	Verim (μ)
40	1256	215	4,73	1757	1759	0,999	0,714
48	1507	210	5,4	1957	1961	0,998	0,769
56	1758	210	6,46	2339	2346	0,997	0,751
64	2009	220	7,24	2750	2755	0,998	0,730
72	2260	235	8,16	3310	3317	0,998	0,682

Şekil IV.15'de 35 Hz frekansında değişik momentlerde TEASMAO-NN tip motorun verimi verilmiştir. Verimin maksimum olduğu noktalar 48 Nm ve 56 Nm değerlerine karşılık gelmektedir.



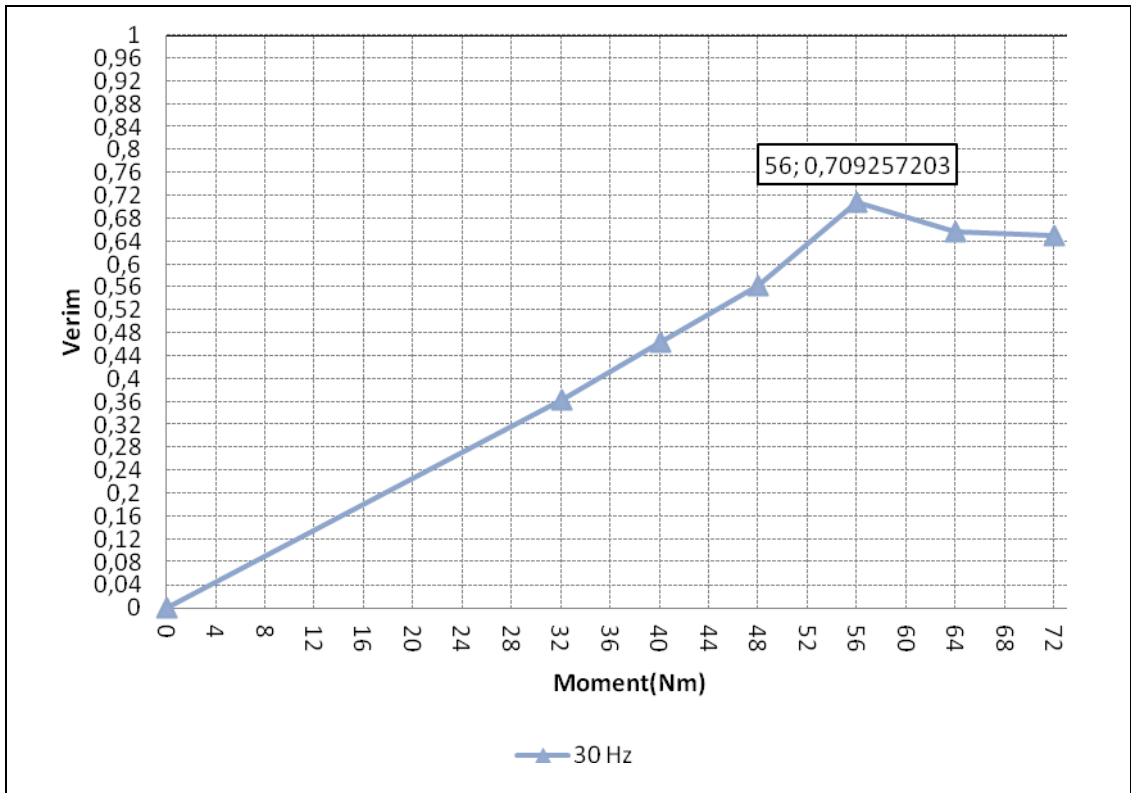
Şekil IV.15 TEASMAO-NN Tip Motorun 35 Hz Moment-Verim Grafiği

Aşağıdaki tablo IV.10 ise şekil IV.16'daki grafiğin değerleri ve diğer motor parametreleri verilmiştir. Maksimum verim noktası 56 Nm'de %70,9 değerindedir. Dolayısıyla giriş gücü açısından 2125 watt değerinde yüksek verimle TEASMAO-NN tip motor çalıştırılabilir.

Tablo IV.10 30 Hz'de TEASMAO-NN Tip Motorun Elektriksel Değerleri

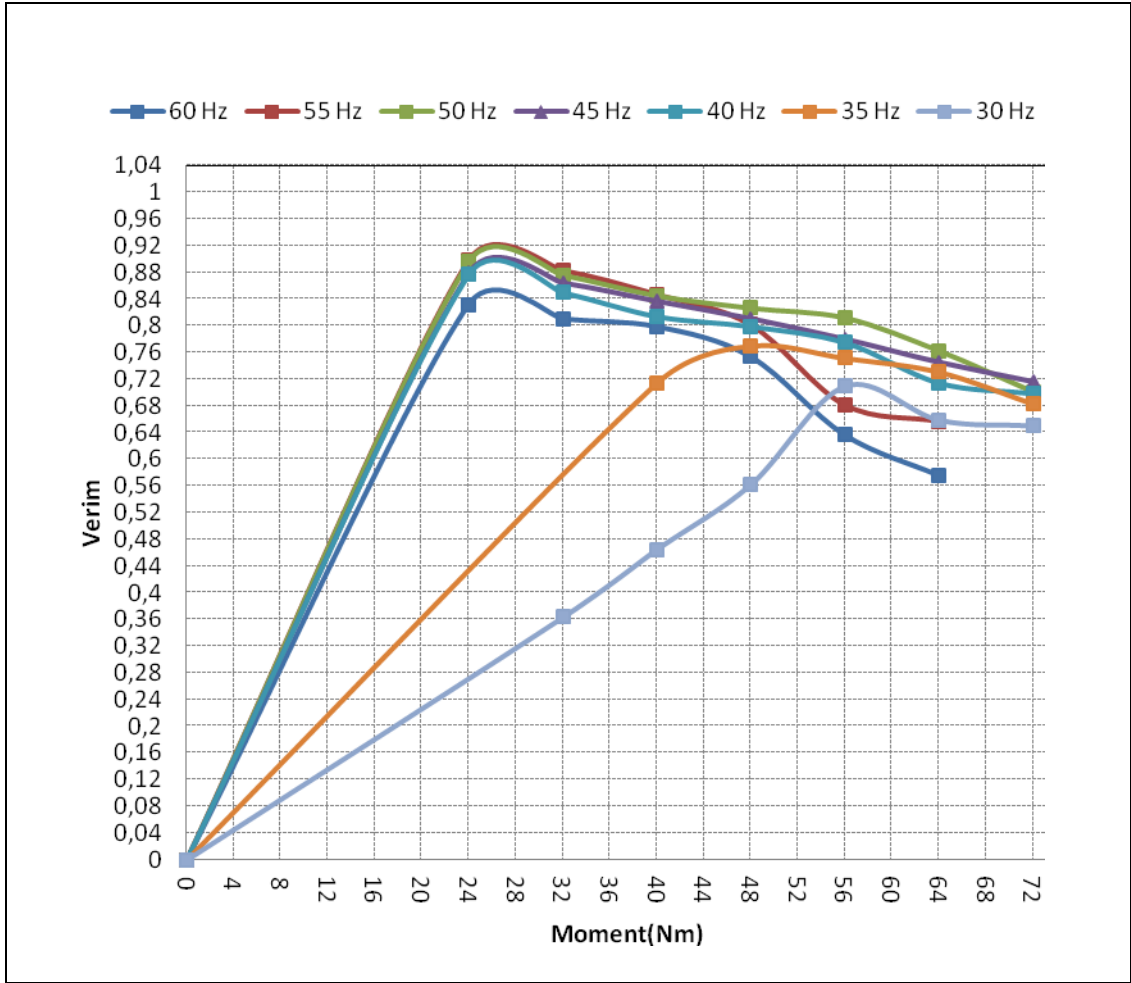
Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Uh (V)	Ih (A)	Pgiriş (W)	Sgiriş (VA)	Cos(ϕ)	Verim (μ)
32	861	210	6,59	2370	2394	0,990	0,363
40	1076	210	6,38	2315	2317	0,999	0,464
48	1291	210	6,33	2297	2299	0,999	0,562
56	1507	188	6,56	2125	2133	0,996	0,709
64	1722	210	7,21	2616	2619	0,999	0,658
72	1937	220	7,85	2981	2987	0,998	0,649

Şekil IV.16'da 30 Hz frekansında değişik momentlerde TEASMAO-NN tip motorun verimi verilmiştir. Verimin maksimum olduğu nokta 56 Nm değerine karşılık gelmektedir.



Şekil IV.16 TEASMAO-NN Tip Motorun 30 Hz Moment-Verim Grafiği

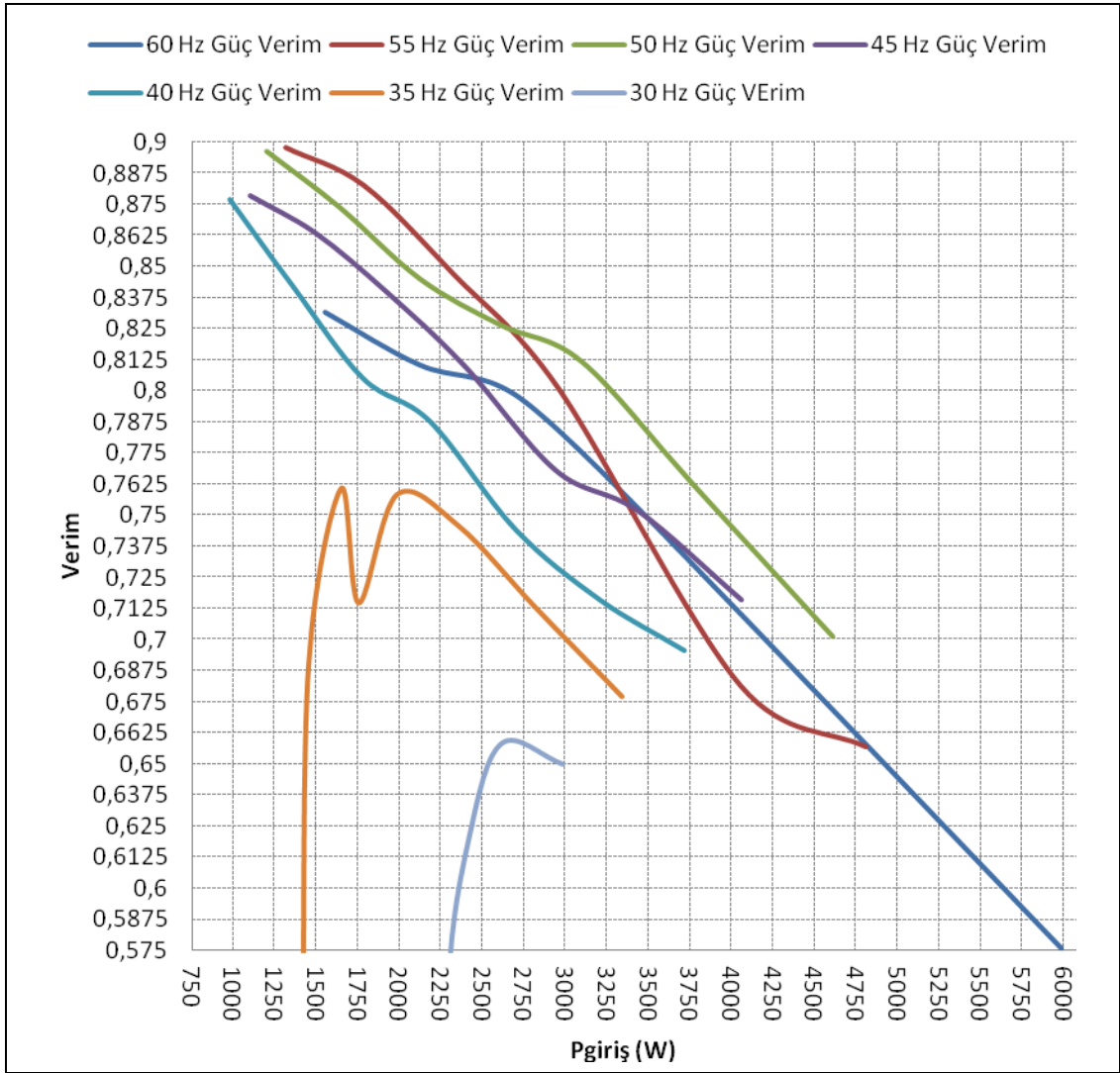
Yukarıda verilen şekil IV.10-16 ve tablo IV.4-10'daki verilere göre aşağıdaki şekil IV.17 çizilmiştir. Şekil IV. 17'den görüldüğü gibi 60 Hz, 55 Hz, 50 Hz, 45 Hz ve 40 Hz değerleri için maksimum verimli çalışma noktaları 24 Nm ve 32 Nm'dir. Momentin artmasıyla birlikte çekilen İh artmakta ve verim düşmektedir. Daha düşük frekanslarda ise verimin azalmasına karşın moment miktarı yüksektir.



Şekil IV.17 TEASMAO-NN Tip Motorun Değişik Frekanslardaki Moment-Verim Grafiği

Aşağıdaki şekil IV.18'de ise değişik frekans değerleri için giriş gücüne bağlı olarak verim değişimi verilmiştir. Grafikte 35 Hz ve 30 Hz için çok düşük güç değişimindeki verim değişiminin sebebi sürücü tarafından kaynaklanmaktadır. Sürücüde ayarlanabilen gerilim değerinin minumum değeri 210 voltur. Bu yüzden tablo IV.9-10'dan da görüldüğü gibi motora uygulanan gerilim 210 volt civarındeyken

mil yükü değiştirilmiştir. Dolayısıyla diğer frekans aralıklarına göre grafiklerin başlangıç noktaları farklıdır.



Şekil IV.18 TEASMAO-NN Tip Motorun Değişik Frekanslardaki Pgiriş-Verim Grafiği

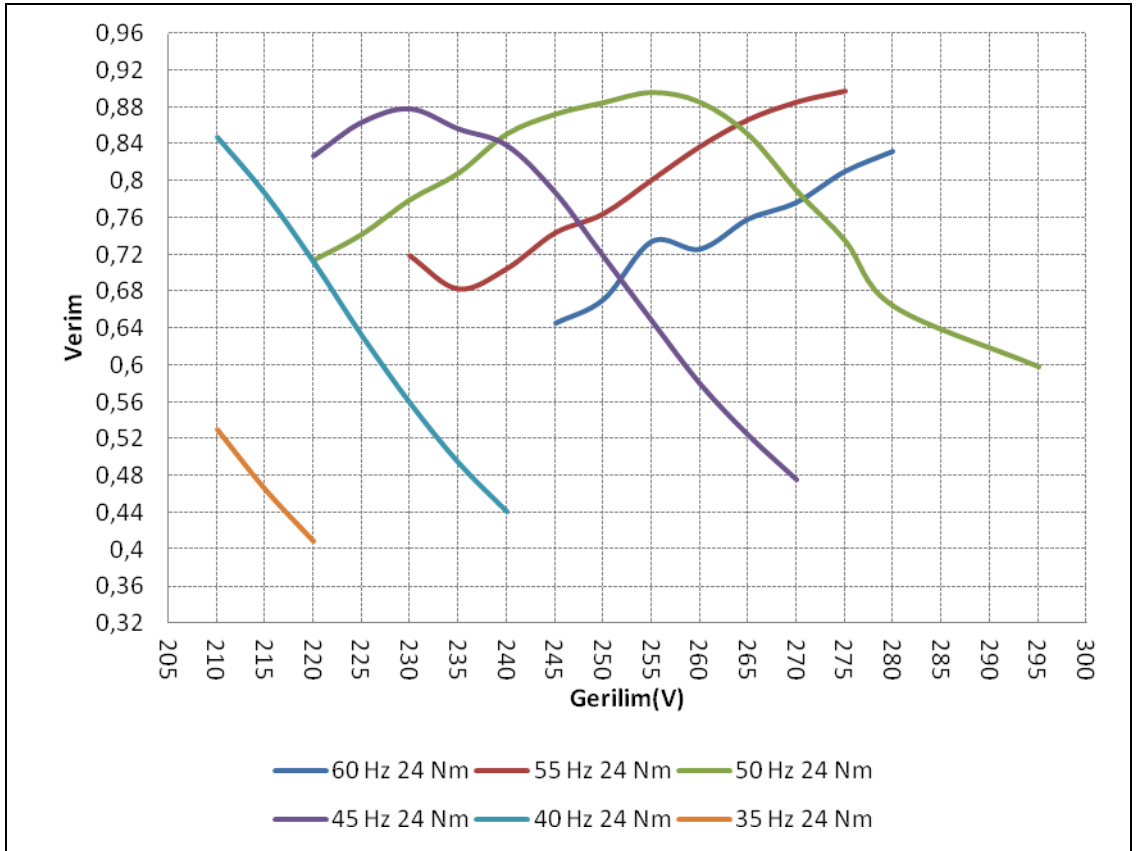
Şekil IV.18’de her bir frekans için verimin maksimum olduğu noktada giriş gücüne bakarsak 60 Hz’de tablo IV.4’den %83.1 verimde 1553 watt giriş gücü, 55 Hz’de tablo IV.5’den %89.7 verimde 1318 watt giriş gücü, 50 Hz’de tablo IV.6’dan %89,6 verimde 1201 watt giriş gücü, 45 Hz’de tablo IV.7’den %87.8 verimde 1102 watt giriş gücü, 40 Hz’de tablo IV.8’den %87.7 verimde 981 watt giriş gücü, 35 Hz’de tablo IV.9’dan %76,9 verimde 1757 watt giriş gücü ve 30 Hz’de tablo

IV.10'dan %70,9 verimde 2125 watt giriş gücü elde edilmiştir. Dolayısıyla maksimum verim noktası 55 Hz'de % 89,7 verimde 1318 watt giriş gücüdür.

IV.2.5.2. TEASMAO-NN Tip Motorun Sabit Yükte Gerilim Verim Eğrilerinin Çıkartılması

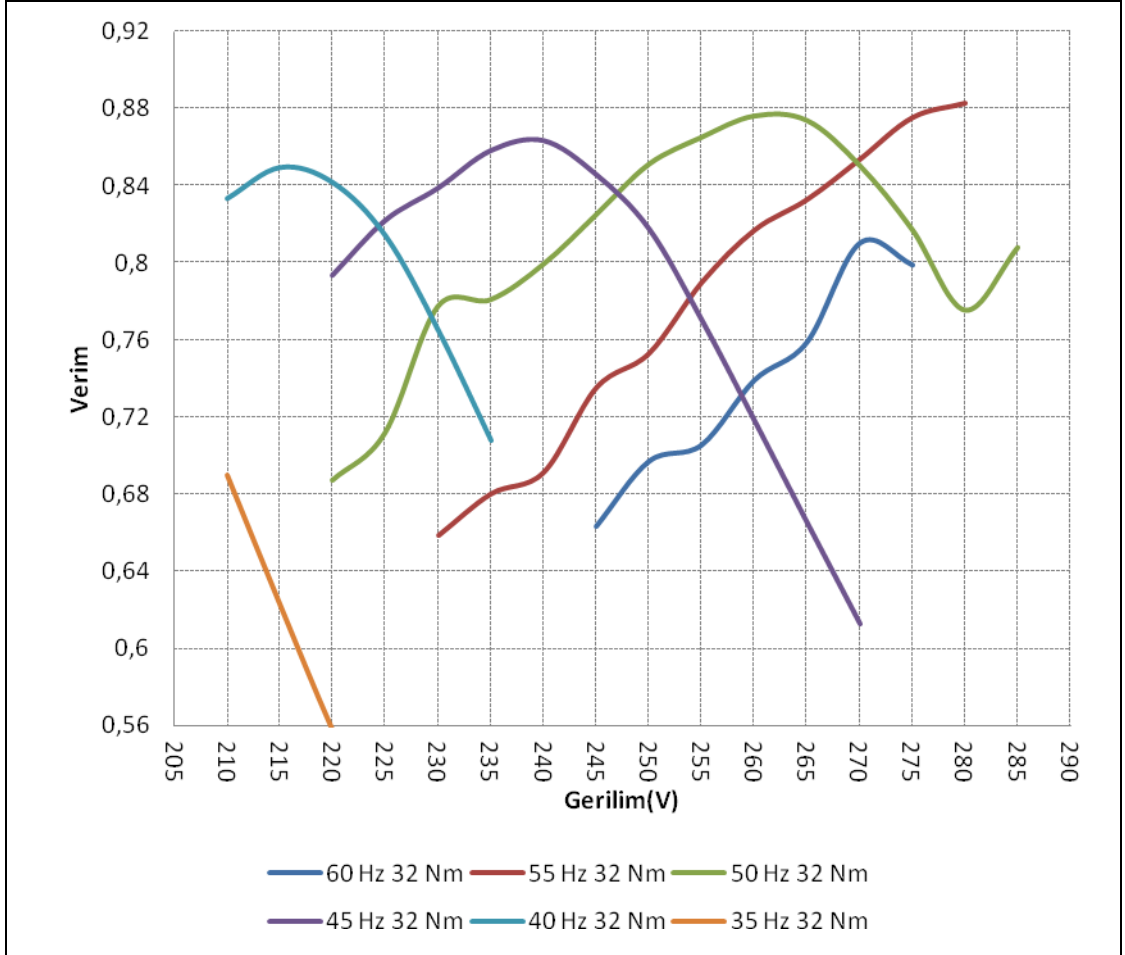
Tasarımı yapılan TEASMAO-NN tip motor senkron motor olarak çalışmaktadır. Bu yüzden yol vermek için asenkron motor sürücü sistemi olarak ACS800 serisi sürücü kullanılmıştır. Bu yüzden tasarımı yapılan bu motorun değişik farklı sürme parametreleri için karakteristikleri ortaya çıkartılarak ileriki çalışmalarda sürücü tasarımında faydalanması amaçlanmıştır. Bundan dolayı bu bölümde farklı moment değerleri için değişik frekanslardaki gerilim ve verim eğrileri verilmiştir.

Aşağıdaki şekil IV.19'da 24 Nm'de 60 Hz, 55 Hz, 50 Hz, 45 Hz, 40 Hz ve 35 Hz durumları için gerilim ve verim eğrisi çıkartılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi artan frekansa karşın yüksek verim noktası için uygulanan gerilimde artmıştır.



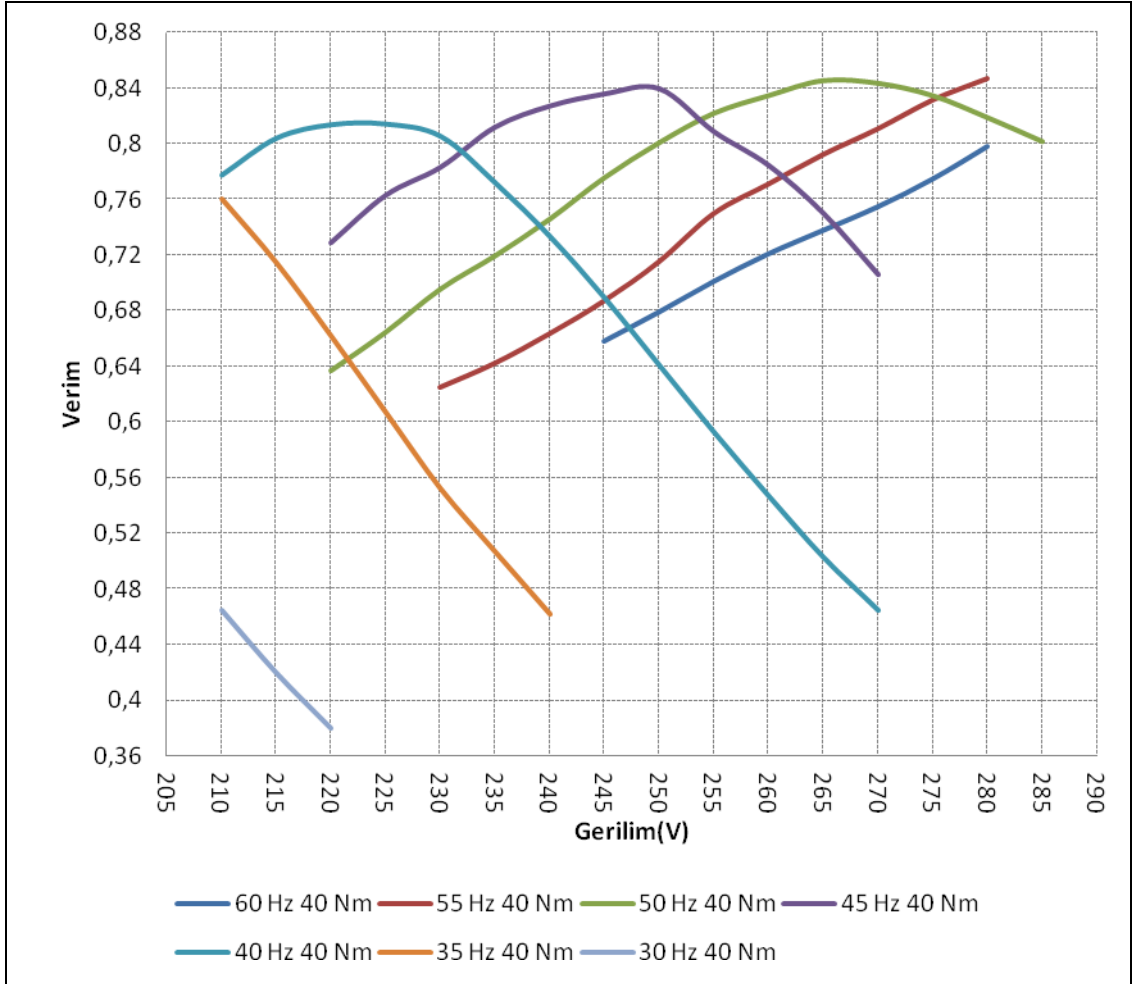
Şekil IV.19 TEASMAO-NN Tip Motorun 24 Nm'de Gerilim-Verim Eğrisi

Aşağıdaki şekil IV.20’de 32 Nm’de 60 Hz, 55 Hz, 50Hz, 45 Hz, 40 Hz ve 35 Hz durumları için gerilim ve verim eğrisi çıkartılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi artan frekansa karşın yüksek verim noktası için uygulanan gerilimde artmıştır. Ayrıca şekil IV.19’la karşılaştırıldığında ise aynı frekans değerleri için maksimum verim için daha yüksek gerilim uygulandığı görülmektedir.



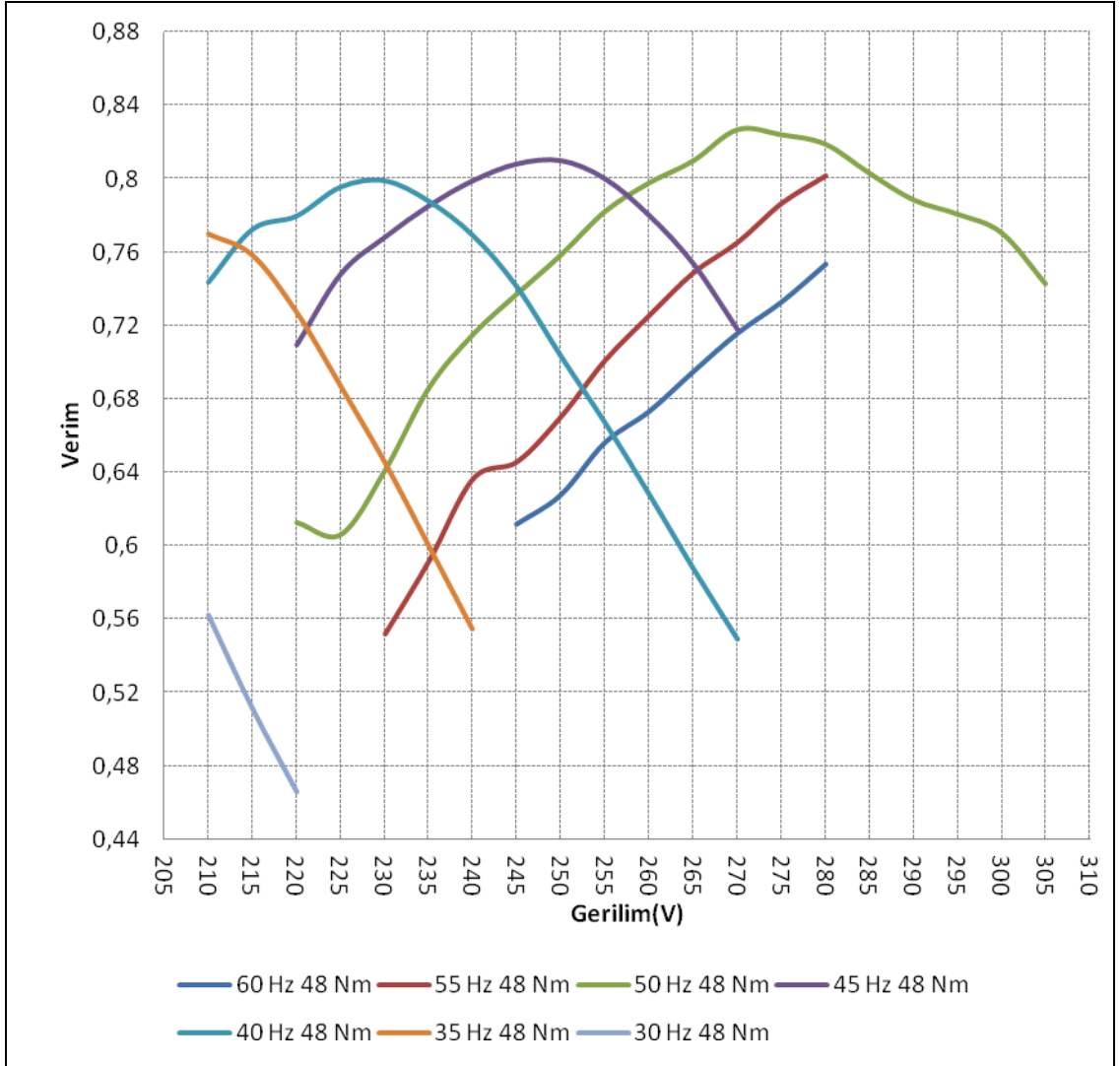
Şekil IV.20 TEASMAO-NN Tip Motorun 32 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi

Şekil IV.21’de 40 Nm sabit yük durumu için değişik frekanslardaki gerilim ve verim değişimi verilmiştir. Şekil IV. 21’de verilen eğri Şekil IV.19 ve 20 ile karşılaştırıldığında eğrilerin sağa doğru kaydığı görülmektedir. Bunun nedeni ise artan momente karşı uygulanan geriliminde artması gerekliliğidir.



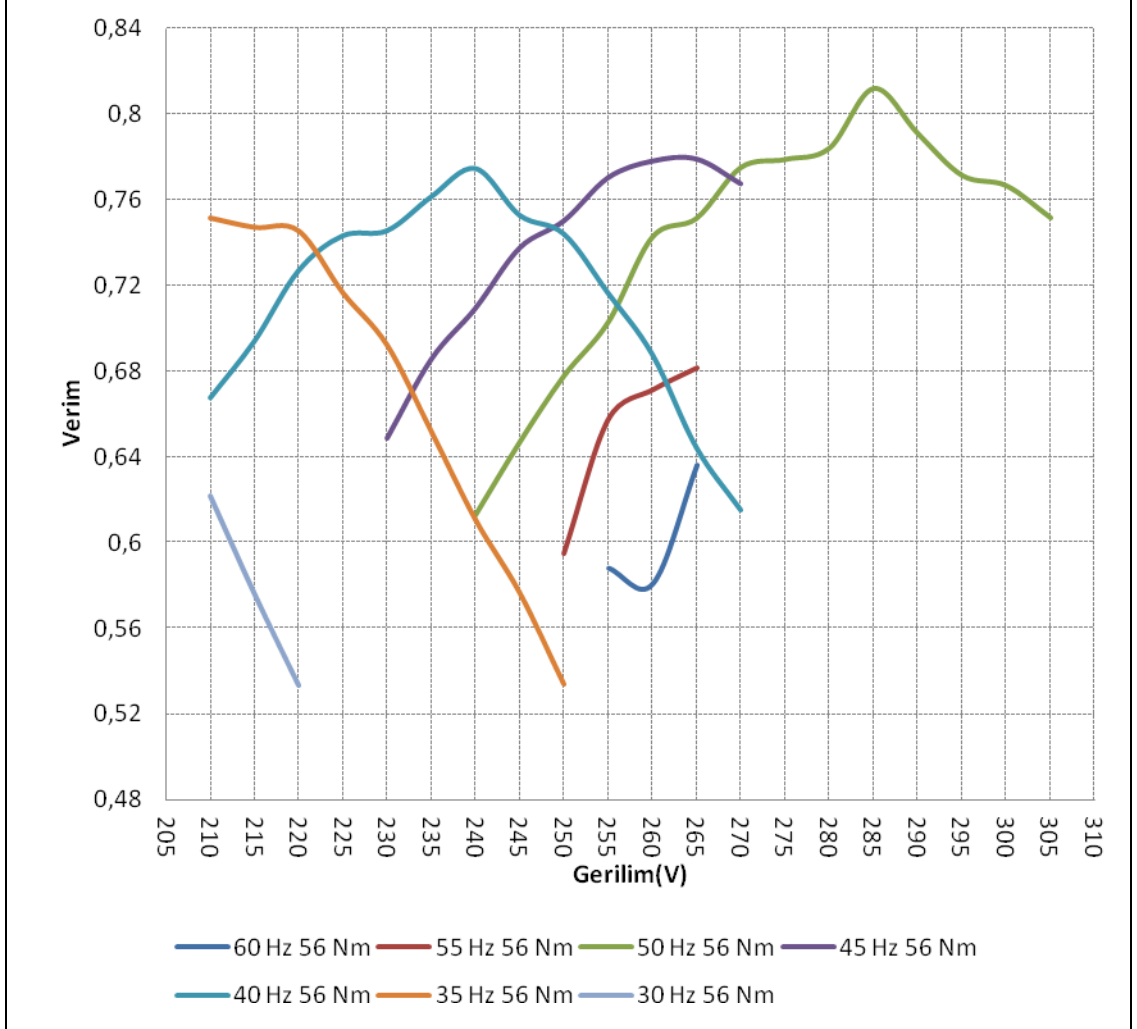
Şekil IV.21 TEASMAO-NN Tip Motorun 40 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi

Şekil IV.22’de 48 Nm sabit yük durumu için değişik frekanslardaki gerilim ve verim değişimi verilmiştir. Verim açısından şekil IV.19, 20, 21’ye göre düşme vardır. Bunun nedeni artan yükü karşılamak için çekilen akımın artmasıdır. Dolayısıyla akımın artışı ile birlikte bakır kayıpları artmakta ve verim düşmektedir.



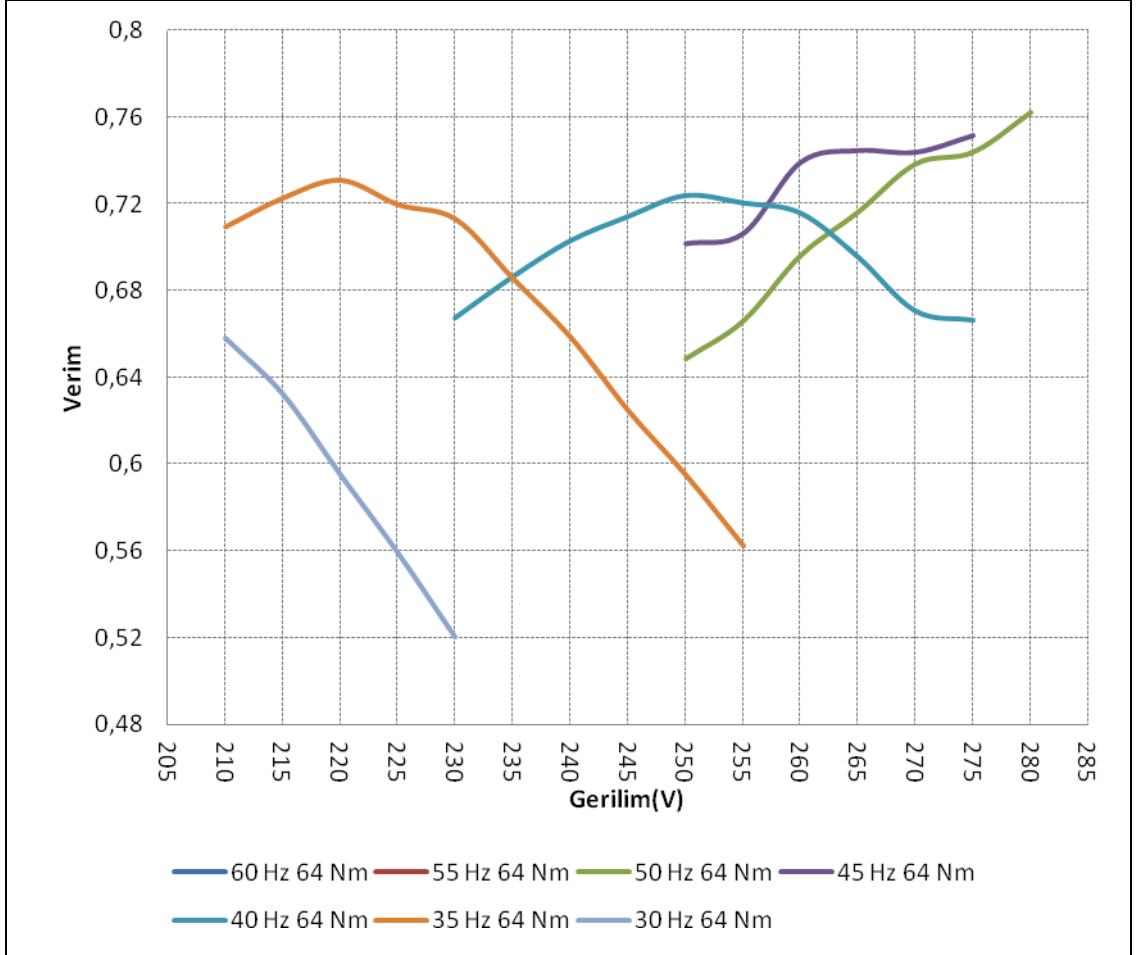
Şekil IV.22 TEASMAO-NN Tip Motorun 48 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi

Şekil IV.23’de 56 Nm sabit yük durumu için değişik frekanslardaki gerilim ve verim değişimi verilmiştir. 50 Hz, 45 Hz ve 40 Hz için şekil IV.22’deki yaklaşık %80 dolayındaki verim değeri 56 Nm’lik yükte %78 seviyesine gerilemiştir.



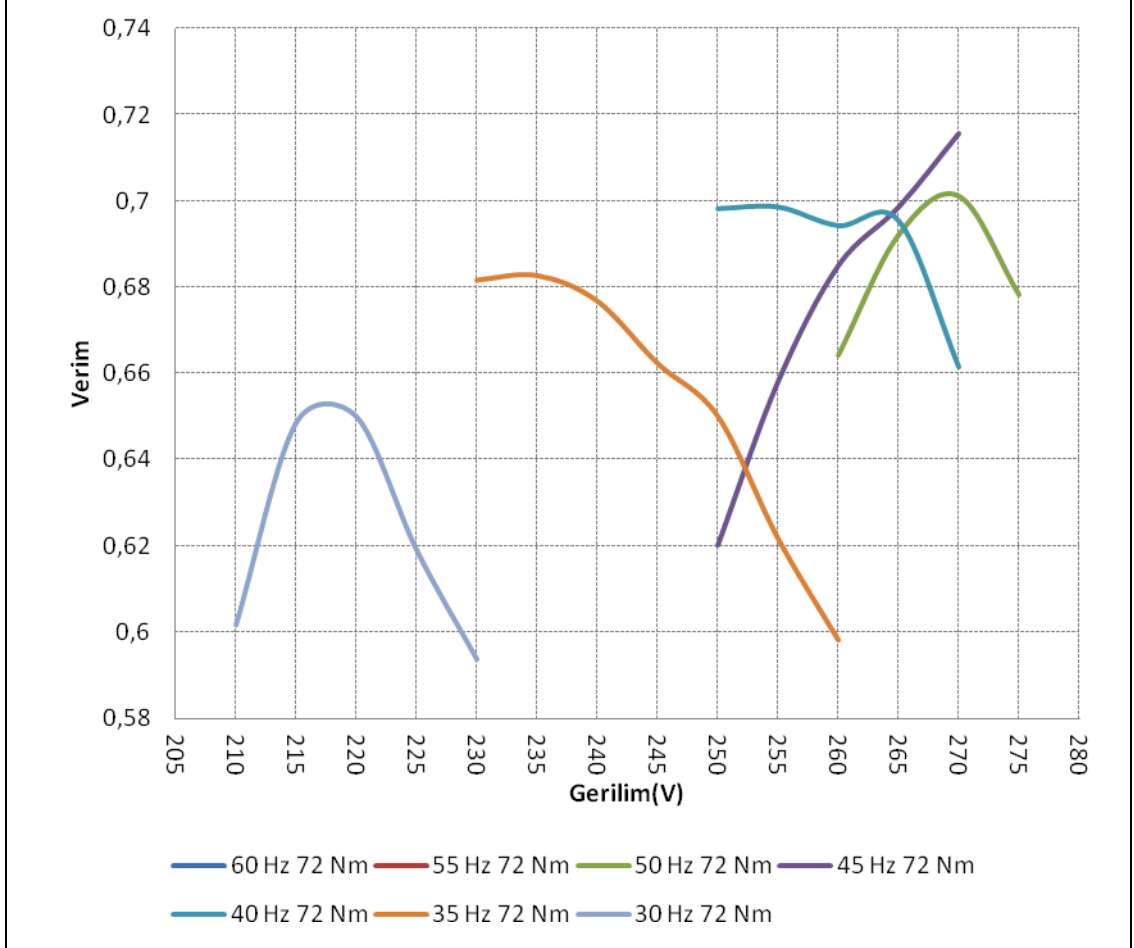
Şekil IV.23 TEASMAO-NN Tip Motorun 56 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi

Şekil IV.24’de 64 Nm sabit yük durumu için değişik frekanslardaki gerilim ve verim değişimi verilmiştir. Motor miline uygulanan moment 64 Nm’ye çıktığı için 60 Hz ve 55 Hz durumları için değer alınamamıştır. Ayrıca düşük frekans değerleri için verim değeri artmıştır.



Şekil IV.24 TEASMAO-NN Tip Motorun 64 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi

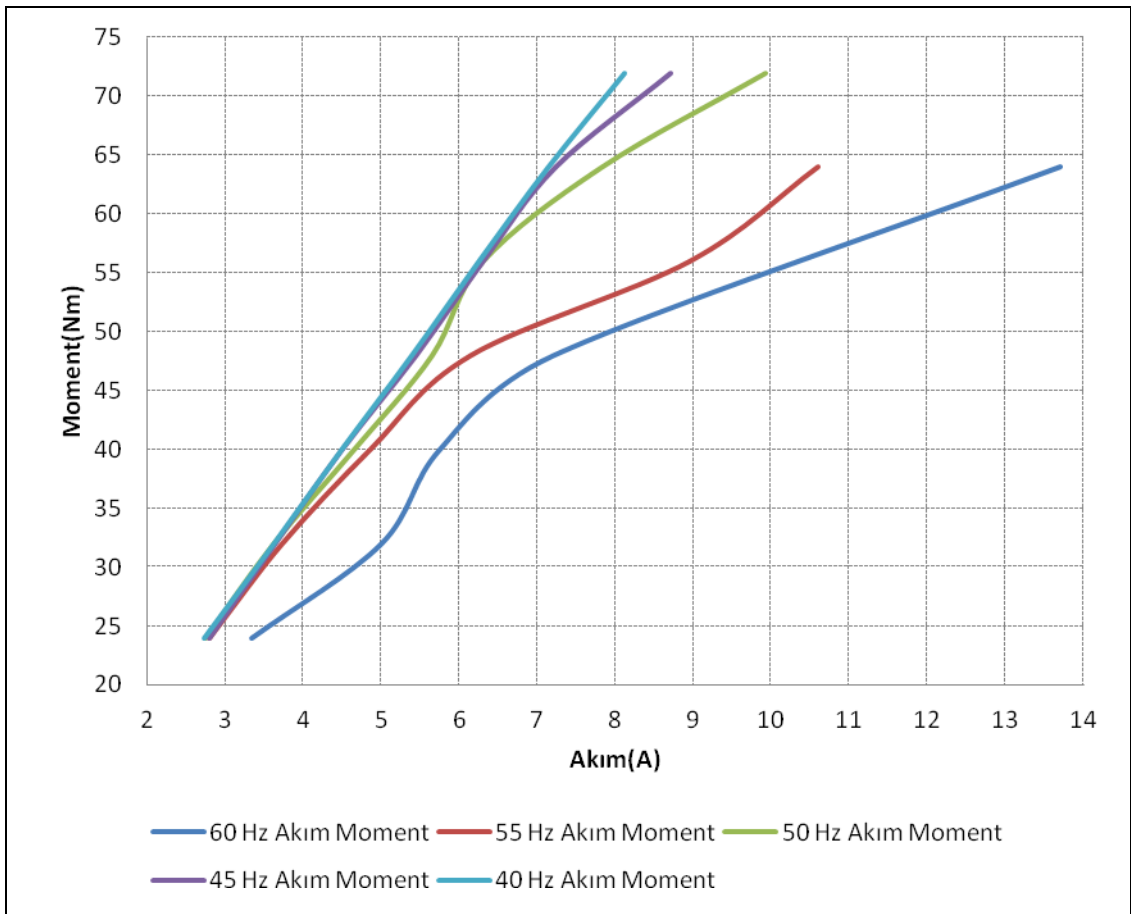
Şekil IV.25’de 72 Nm sabit yük durumu için değişik frekanslardaki gerilim ve verim değişimi verilmiştir. Bu yük durumu için verilen frekans değerleri için verim düşmüştür. Çünkü bakır kayıpları karşılanan yüke oranla daha fazladır.



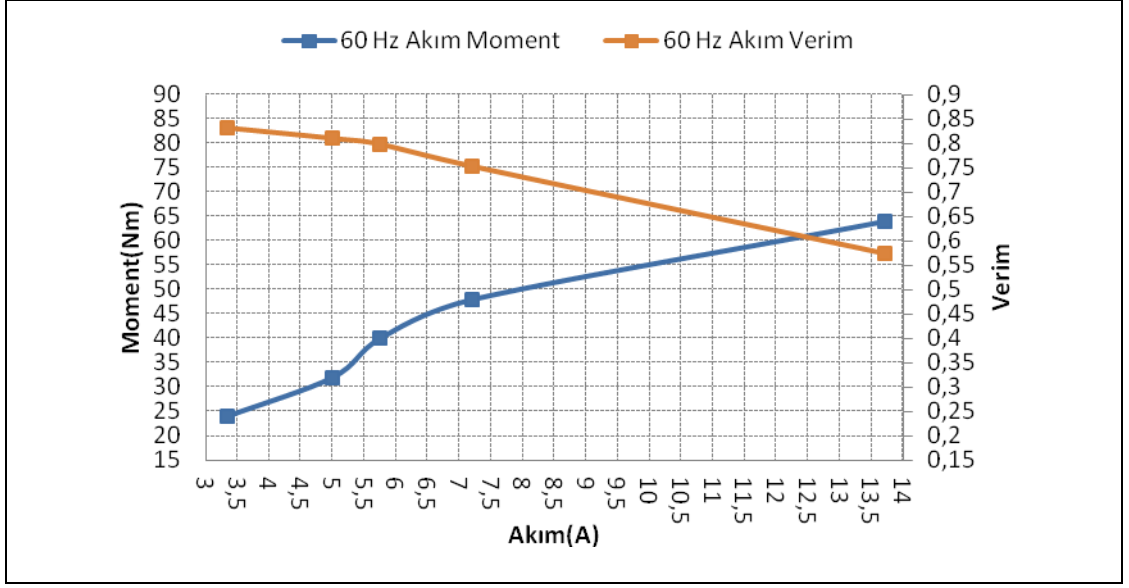
Şekil IV.25 TEASMAO-NN Tip Motorun 72 Nm’de Gerilim-Verim Eğrisi

IV.2.5.3. TEASMAO-NN Tip Motorun Akım Moment Grafiklerinin Çıkartılması

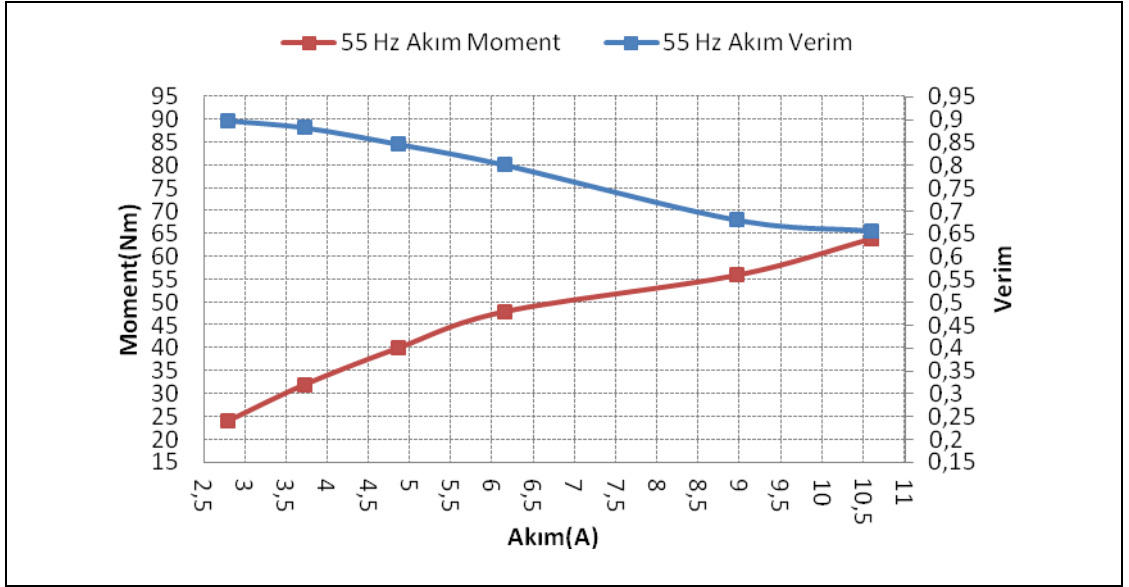
Aşağıdaki şekil IV.26’da değişik frekanslarda motor hat akımına bağlı olarak motorun ürettiği moment arasındaki deneysel veriler sunulmuştur. Şekil IV.26’dan görüldüğü gibi düşük frekanslarda daha düşük akımlarda daha yüksek moment elde etmek mümkündür. Ayrıca 60 Hz hariç diğer frekans aralıklarında 3-6 A aralığındaki değerlerde üretilen momentlerin aynı olduğu ve 6A’dan yüksek değerlerde frekans ve akıma bağlı olarak eğrinin sağa doğru yattığını görmekteyiz. Yani aynı moment değeri için yüksek frekanslarda daha yüksek akıma ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil IV.26 TEASMAO-NN Tip Motorun Değişik Frekans Durumları İçin Akım Moment Eğrileri



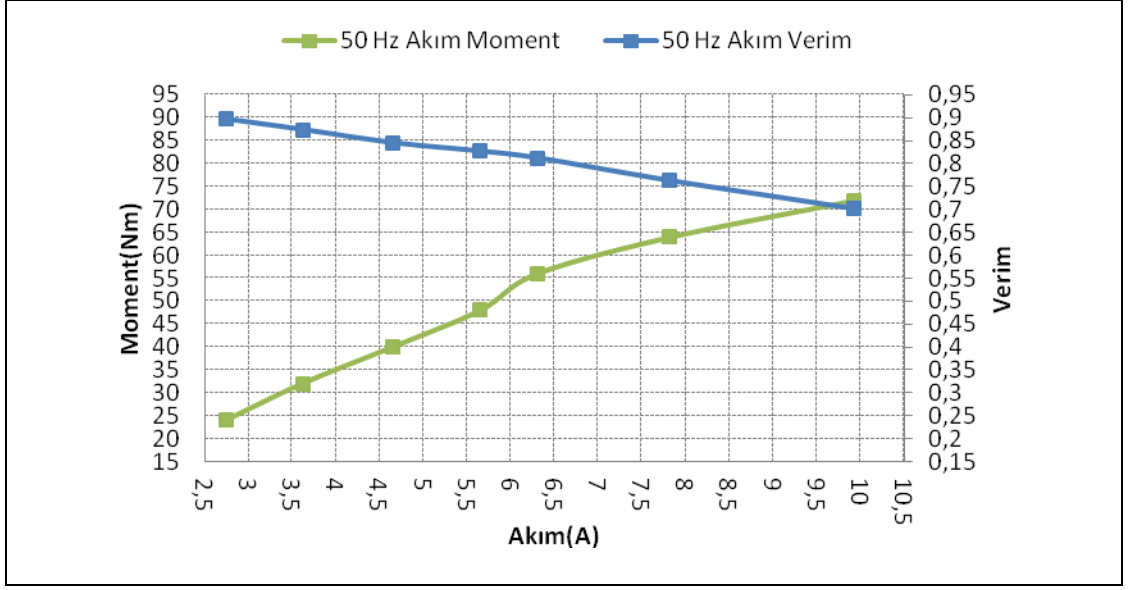
(a)



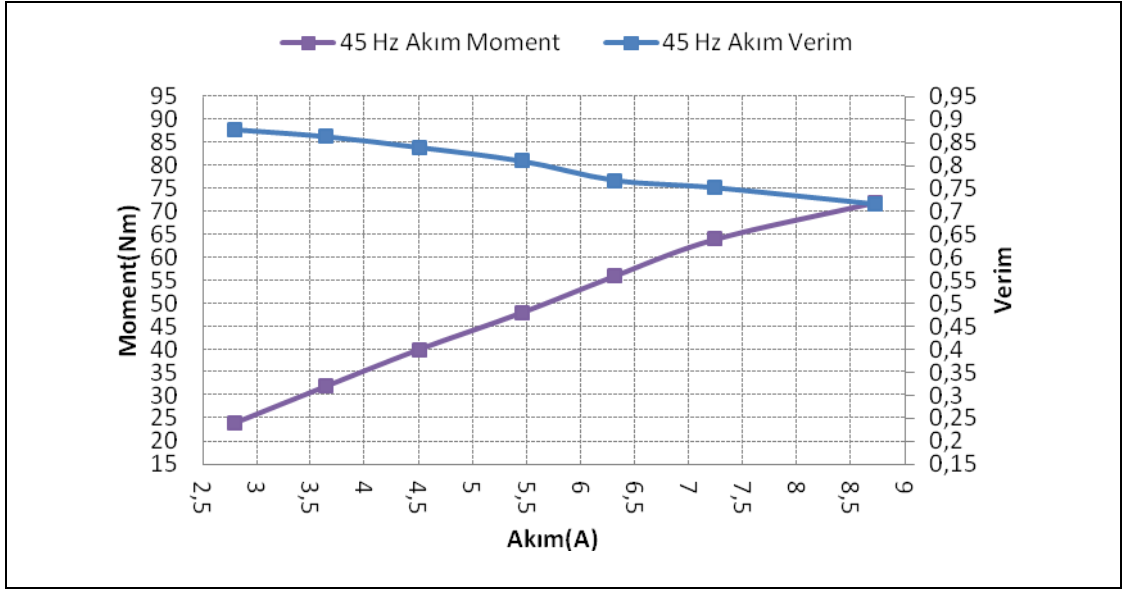
(b)

Şekil IV.27 TEASMAO-NN Tip Motorun **a)** 60 Hz’de Akım-Moment ve Verim Eğrisi **b)** 55 Hz Akım- Moment ve Verim Eğrisi

Şekil IV.27’den görüldüğü gibi 60 Hz ve 55 Hz durumları için TEASMAO-NN tip motorun çekilen hat akımına karşın ürettiği moment ve verim eğrileri verilmiştir. Akımın artışına bağlı olarak moment değişiminin doğrusala yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı şekilde akımın artışına bağlı olarak doğrusal bir şekilde verim de ters yönde etkilenmektedir. Bunun nedeni akımın artışı ile birlikte $P_{cu}=I^2 \cdot R$ formülüne göre bakır kayıplarının artmasıdır.



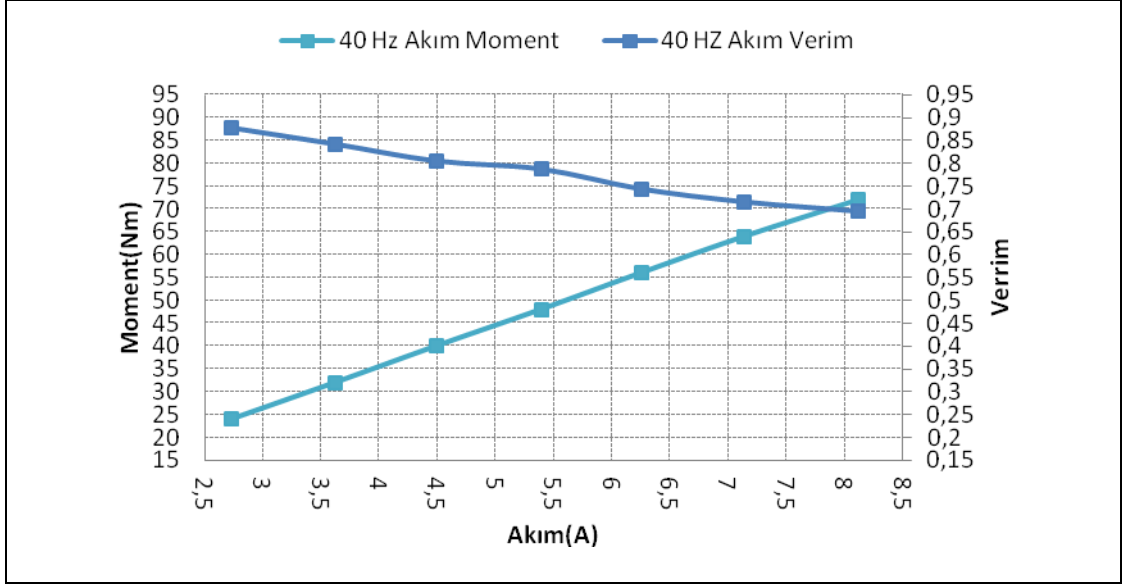
(a)



(b)

Şekil IV.28 TEASMAO-NN Tip Motorun **a)** 50 Hz’de Akım-Moment ve Verim Eğrisi **b)** 45 Hz Akım- Moment ve Verim Eğrisi

Şekil IV.28’den görüldüğü gibi 50 Hz ve 45 Hz durumları için TEASMAO-NN tip motorun çekilen hat akımına karşın ürettiği moment ve verim eğrileri verilmiştir. Akımın artışına bağlı olarak moment değişiminin doğrusala yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı şekilde akımın artışına bağlı olarak doğrusal bir şekilde verim de ters yönde etkilenmektedir. Bunun nedeni akımın artışı ile birlikte $P_{cu}=I^2 \cdot R$ formülüne göre bakır kayıplarının artmasıdır.



Şekil IV.29 TEASMAO-NN Tip Motorun 40 Hz'de Akım-Moment ve Verim Eğrisi

Yukarıdaki Şekil IV.27,28 ve 29'da 60 Hz, 55 Hz, 50 Hz, 45 Hz ve 40 Hz için akım moment ve akım verim eğrileri verilmiştir. Tüm eğrilerde akım moment ve akım verim değişimleri doğrusala yakındır. 40 Hz, 45 Hz ve 50 Hz'de 6 A akım için 52,5 Nm moment elde edilmiştir. Aynı frekans değerlerinde 4 A akım için ise 35 Nm moment elde edilmiştir. Görüldüğü gibi moment değişimi farklı frekanslarda doğrusal değişen bölgelere sahiptir. % 80 verim için 60 Hz'de 6 A, 55 Hz'de 6 A, 50 Hz'de 6,2 A ve 45 Hz'de 5,5 A akım çekmektedir. % 70 verim için 60 Hz'de 9 A, 55 Hz'de 8,5 A, 50 Hz'de 10 A, 45 Hz'de 8,8 A, 40 Hz'de ise 8,2 amper akım çekmektedir. Görüldüğü gibi aynı verim değerleri içinde çekilen akım değerleri doğrusala yakındır. Dolayısıyla tasarlanan TEASMAO-NN tip motorun akım moment ve akım verim değişimlerinin değişik frekanslarda da doğrusala yakın olduğunu söyleyebiliriz.

IV.2.5.4. TEASMAO-NN Tip Motorun Sıcaklık Deney Sonuçları

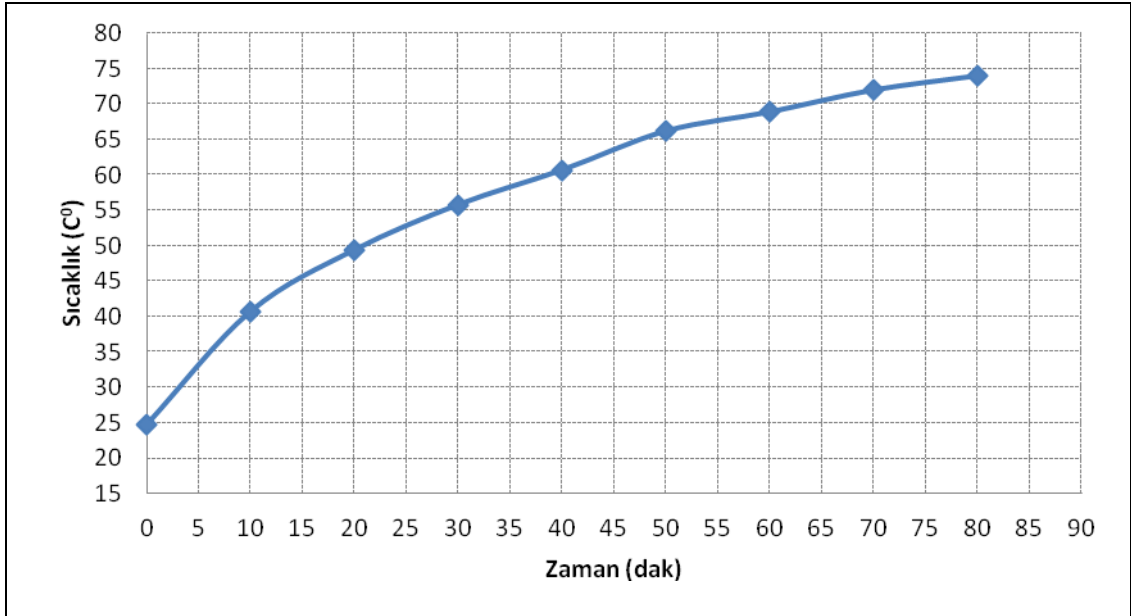
Eksenel akıllı makinelerde düşük devirlerde sıcaklık önemli bir problemdir. Bu yüzden bazı çalışmalarda soğutma sistemleri tasarlanmıştır. Yapılan bu çalışmada da en yüksek verim değeri için sıcaklık testi yapılmıştır. Sıcaklık testinde herhangi bir soğutma sistemi kullanılmamıştır. Tasarlanan TEASMAO-NN tip motor sabit yük altında 80 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Aşağıdaki tablo IV.11’de sıcaklık testi sonucunda alınan değerler ile ortam koşulları kaydedilmiştir. Değerlerden görüldüğü gibi 80 dakika sonucunda motor sıcaklığı 72 C⁰’ye yükselmiştir. Ortam sıcaklığı ise 29,4 C⁰’dir.

Tablo IV.11 24 Nm Moment Değeri için TEASMAO-NN Tip Motorun Zamanla Sıcaklık Değişimi

f=50 Hz 24 Nm μ =%89,6 V _h =255 V Değerleri İçin Sıcaklık Değişimi			
Zaman (dakika)	Motor Sıcaklık (C ⁰)	Ortam Sıcaklık (C ⁰)	Ortam Nem
0	24,7	28	%56
10	40,7	28,2	%56
20	49,4	28,5	%54
30	55,8	28,6	%54
40	60,7	28,6	%53
50	66,2	28,8	%52
60	68,9	28,8	%52
70	72	29,3	%50
80	74	29,4	%50

Aşağıdaki şekil IV.30’da ise tablo IV.11’de verilen değerlere göre motorun sıcaklığı zamana bağlı olarak çizdirilmiştir. Şekil IV.30’da zaman bağlı olarak değişimin azaldığı görülmektedir. 70-80 dakika aralığında ise sıcaklık 70-75 C⁰ aralığına oturmuştur. Dolayısıyla bu yük için motor sıcaklığı için harici bir soğutma sistemine gerek yoktur.



Şekil IV.30 TEASMAO-NN Tip Motorun 24 Nm’de Sıcaklık Zaman Grafiği

BÖLÜM V SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada son yıllarda önemli çalışma konusu haline gelen sabit mıknatıslı motor tasarımı ele alınmıştır. Özellikle neodyum mıknatısların bulunmasından sonra büyük gelişim gösteren sabit mıknatıslı motorlarda son yıllarda özellikle eksenel akılı motorlar üzerine durulmuştur. Yapılan çalışmalara bakıldığında basit yapısı, yüksek güç yoğunluğu ve elektrikli araçlar için ideal bir yapıda olması nedeniyle eksenel akılı makineler önem kazanmıştır. Bununla birlikte literatür incelendiğinde eksenel akılı makineler üzerine yapılan çalışmalar yeni tip makinelerin geliştirilmesi, değişik malzemelerin kullanılması(yumuşak manyetik malzemeler), değişik geometrideki mıknatısların kullanılması, farklı stator yapısına sahip eksenel akılı makinelerin performanslarının iyileştirilmesi ve dezavantajlarının giderilmesi üzerine olmuştur.

Eksenel akılı makine tasarımında iki aşama vardır. Birincisi rotor yapısının tespiti, ikincisi stator yapısının tespitidir. Stator ve rotor geometrilerine ve kullanılan malzemelere göre makine imalatında özel yöntemlere gereksinim duyulmakta ve bununda makine maliyeti üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır.

Yapılan bu çalışmada da özellikle maliyeti düşük performansı yüksek bir eksenel akılı motor tasarımı üzerinde durulmuştur. Özellikle oluksuz nüveli tipte makine tasarımları incelenerek performanslarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Nüveli oluksuz tip eksenel akılı motorların sargı yapısı toroidal tiptedir. Stator nüvesinde oluklar bulunmadığı için nüve yüzeyine sargılar toroidal bir şekilde sarılarak bobinler oluşturulur. Bundan dolayı yapılan çalışmalar irdelendiğinde tek katlı sarımların kullanıldığı görülmektedir. Dolayısıyla nüveye sarılan sipir sayısı nüve yüzeyi ve tel kesiti ile sınırlıdır. Bu da elde edilecek güç yoğunluğu üzerine olumsuz etki yaratmaktadır. Bununla birlikte üst üste sarım yapmakta mümkündür. Fakat üst üste yapılan sarımda hava aralığı artacağı için belirli bir limiti vardır. Bu nedenlerden dolayı nüveli oluksuz geometrideki eksenel akılı makineler üzerine yapılan çalışmalar çok sınırlıdır. Yapılan çalışmalar daha çok oluklu eksenel akılı makineler üzerine yoğunlaşmıştır. Oluklu makinelerde de en önemli problem oluk kenarları ile mıknatısların etkileşimi sonucu ortaya çıkan vurutu momentidir. Bu

yüzden oluklu makine tasarımı üzerine yapılan çalışmalar genellikle vurutu momentini giderici yöntemlerin bulunması üzerinedir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı bu çalışmada nüveli oluksuz çok katmanlı eksenel akılı motor geometrisi ile oluklu makine geometrisinin birleşiminden oluşan yeni bir makine geometrisi oluşturulmuştur. Yeni tasarlanan toroidal tipte eksenel akılı sabit mıknatıslı açık oluklu NN tip (TEASMAO-NN) motor geometrisi sayesinde oluksuz motor performansı artırılmış ve oluklu makinelerin vurutu momenti sorunu ortadan kaldırılmıştır.

2005 yılında Crescimbeni ve arkadaşları tarafından hibrid elektrikli araçlar için sabit mıknatıslı eksenel akılı toroidal ve nüveli tipte su soğutmalı bir generatör tasarlanmıştır. Yapılan geratörede oluksuz nüve kullanılarak her bir bobin 4 sipirden oluşmuştur. Tasarlanan genaratörün 50 Hz’de faz gerilimin etkin değeri 7,5 volt, nüvenin dış çapı 260 mm ve sargı sayısı 48’dir[35]. Bu çalışmada tasarımı yapılan TEASMAO-NN tip motorun 50 Hz’de ürettiği faz elektro motor kuvveti 132 volt, nüve dış çapı 210 mm ve sargı sayısı 42’dir. Dolayısıyla daha düşük nüve çapından aynı akım değerleri için 17,6 kat daha faz güç üretebilmektedir. Bu yapılan tasarımın en öne çıkan özelliğidir.

2007 yılında Rahim ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada toroidal tipte eksenel akılı makine tasarlamışlardır. Oluksuz tipteki bu makinede sargı sayısı 48, dış çap 230 mm iç çap 130 mm, her bir bobin sipir sayısı 21, mıknatıs geometrisi trapezodial, 50 Hz ürettiği ters elektro motor kuvvet 30 volt ve kutup sayısı 16’dır[50]. Bu çalışmada ise nüve dış çapı 210 mm, mıknatıs geometrisi dikdörtgen ve sargı sayısı 42’dir. Elde edilen 50 Hz’de faz elektromotor kuvveti ise 132 voltur. Dolayısıyla aynı akım değerleri için daha düşük mıknatıs yüzeyine ve dış çapa sahip tasarlanana TEASMAO-NN tip motordan 4,4 kattan fazla güç elde etmek mümkün olmuştur.

2008 yılında Marignetti ve arkadaşları kesirli sargılı açık oluklu rombodial sargılı iki rotor ve bir statora sahip eksenel akılı motorun direk sürülmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Üzerinde çalışılan açık oluk yapısına sahip eksenel akılı motorun dış çapı 274 mm, iç çapı 172 mm, sargı sayısı 48, kutup sayısı 40 ve 50 Hz’de ürettiği ters emk kuvveti 14 voltur. Sargılar rombodial olarak nüve yüzeyini geçmeyecek şekilde yerleştirilmiştir[55]. Bu çalışmada tasarlanan TEASMAO-NN tip motorda ise daha düşük dış çap için 9,42 kat daha fazla ters elektro motor kuvveti

elde edilmiştir. Dolayısıyla aynı akım değerleri içinde daha düşük dış çaptan 9,42 kat daha fazla güç elde etmek mümkün olmuştur.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar ışığında tasarlanan TEASMAO-NN tip motorun nüveli oluksuz tek katlı sargı yapısı ile çok katlı sargı yapısını ve açık oluklu nüve yapısının birleşimini sağlayan hibrid bir yapısı vardır. Bu yapı sayesinde oluksuz tipteki nüve parametrelerini geliştirmektedir. Ayrıca oluklu tipteki motorlarda oluşan vurutu momentini de gidermektedir. Bu açılardan yeni bir tasarım modeli sunulan bu çalışmadaki TEASMAO_NN tip motor elektrikli araçlarda olabileceği gibi birçok alanda kullanılabilecek yeni bir tasarımıdır.

BÖLÜM VI DEĞERLENDİRMELER VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma ile yeni bir toroidal eksenel akılı sabit mıknatıslı açık oluklu NN tip (TEASMAO-NN) motor tasarlanmıştır. Tasarlanan bu motor öncelikle elektrikli araçlar için önemli bir seçenektir. Elektrikli araçlar dışında yüksek güç yoğunluğu ve direkt sürülmesi istenen yerlerde de rahatlıkla kullanılabilir.

Tasarlanan TEASMAO-NN tip motor tek katlı sargı yapısına sahip nüveli eksenel akılı motor ile çok katlı sargı yapısına sahip eksenel akılı motorun performanslarını önemli ölçüde geliştirmenin yanı sıra oluklu makinelerdeki olumsuz yönleride minimize etmiştir. Ayrıca oluklu makinelerde maliyeti yüksek tekniklere gerek kalmadan hava aralığının ayarlanması ile bu mümkün olmuştur. Tasarımı ve uygulaması yapılan TEASMAO-NN tip motorun olumlu ve olumsuz yönlerini aşağıda maddeler halinde sıralayabiliriz.

Olumlu yönleri;

Yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verime sahiptir.

Vuruntu momenti minimize edilmiştir.

Tek katlı ve çok katlı oluksuz nüveli yapıdaki eksenel akılı makinelerin performansını arttırmıştır.

Laboratuar uygulaması için tasarlandığından farklı stator ve rotor yapılarını tek bir düzeneğe denemek mümkün olmuştur.

Statorda açık oluk kullanılmasından dolayı nüvenin işleme maliyeti düşüktür.

Rotorda kullanılan mıknatıslar dikdörtgen geometrilidir. Mıknatıs ölçüleride kolaylıkla bulunabilecek standarttır. Bu durumda maliyet üzerinde avantaj sağlamaktadır.

Olumsuz yönleri ise;

Yüksek hava aralığından dolayı moment olumsuz yönde etkilenmektedir.

Yukarıda bahsedilen TEASMAO-NN tip motorun olumlu ve olumsuz yönleri ile getirdiği yeniliklerin dışında bundan sonraki çalışmalarda aşağıdaki alanlarda yoğunlaşılabilir.

TEASMAO-NN tip motorun rotor yapısında mıknatıs ölçüleri ve geometrileri üzerinde çalışılarak motor performansı iyileştirilebilir.

TEASMAO-NN tip motorun alternatör çalışma durumu için sargı yapısında adım ve dağıtım katsayıları değiştirilerek daha düşük harmonik yapısına sahip TEASMAO-NN tip alternatör tasarlanabilir.

Tasarımı yapılan TEAMAO-NN tip motorun mekanik aksamı yeniden tasarlanarak elektrikli araçlarda kullanılabilecek duruma getirilebilir.

Ayrıca bu tip motorlarda özellikle düşük hızlarda harici soğutma sistemlerine gereksinim duyulmaktadır. Bundan dolayı TEASMAO-NN tip motora sıvı soğutmalı bir sistem tasarlanıp motor performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.

Tasarımı yapılan TEASMAO-NN tip motora uygun bir sürücü tasarlanabilir.

Tasarımı yapılan TEASMAO-NN tip motor farklı uygulamalar içinde kullanılabilir.

Tasarımda statoru oluşturan paket saç yapısı yerine yumuşak manyetik malzemeler ile oluşturulmuş stator kullanılarak performanslar karşılaştırılabilir.

Tasarımda yapılan tek stator iki rotor yapısı yerine çok diskli makine yapısı kullanılarak yüksek güçlü TEASMAO-NN tip makine tasarımları gerçekleştirilebilir.

Tasarımı gerçekleştirilen motorun generatör olarak çalıştırılması sonucu elde edilen gerilim eğrisinin sinüzoidal formuna bakılarak yenilenebilir enerji uygulamalarından rüzgar türbinlerinde de rahatlıkla kullanılabileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Shimizu, H.; Harada, J.; Bland, C.; Kawakami, K.; Chan, L.: “Advanced Concepts in Electric Vehicle Design”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, February, Vol. 44, No.1, **(1997)** 14-18.
- [2]. Lovatt, H.C.; Ramsden, V.S.; Mecrow, B.C.: “Design of an In-Wheel Motor for a Solar Powered Electric Vehicle”, *IEE EMD97*, September, **(1997)** 234-238.
- [3]. Patterson, D.; Spee, R.: “The Design and Development of an Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Wheel Drive in a Solar Powered Vehicle”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31, No.5, September, **(1995)** 1054-1061.
- [4]. Profumo, F.; Zhang, Z.; Tenconi, A.: “Axial Flux Machines Drives: A New Viable Solution for Electric Cars”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.44, No.1, **(1997)** 39-45.
- [5]. Hredzak, B.; Gair, S.: “Elimination of Torque Pulsations in a Direct Drive EV Wheel Motor”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.32, No.5, September, **(1996)** 5010-5012.
- [6]. Caricchi, F.; Crescimbeni, F.; Mezzetti, F.; Santini, E.: “Multistage Axial Flux PM Machine for Wheel Direct Drive”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32, No.4, July/August, **(1996)** 882-888.
- [7]. Wallace, R.R.; Lipo, T.A.; Moran, L.A.; Tapia, J.A.: “Design and Construction of a Permanent Magnet Axial Flux Synchronous Generator”, *IEEE Electric Machines and Drives Conference Record*, **(1997)**.
- [8]. Terashima, M.; Ashikaga, T.; Mizuno, T.; Natori, K.; Fujiwara, N.; Yada, M.: “Novel Motors and Controllers for High Performance Electric Vehicle with Four In Wheel Motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.44, No.1, **(1997)** 28-38.
- [9]. Hsu, J.S.: “A Machine Approach for Field Weakening of Permanent Magnet Motors”, *Society of Automotive Engineers*, **(1998)**.

- [10]. Profumo, F.; Tenconi, A.; Zhang, Z.; Cavagnino, A.: “Novel Axial Flux Interior PM Synchronous Motor Realized with Powdered Soft Magnetic Materials”, *IEEE Industry Applicaitons Conference*, Vol.1, **(1998)** 152-158.
- [11]. Huang, S.; Luo, J.; Leonardi, F.; Lipo, T.A.: “A Comprasion of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.14, No.2 **(1999)** 185-192.
- [12]. Sakai, S.I; Sado, H.; Hori, Y.: “Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.4, No.1, March, **(1999)** 9-16.
- [13]. Parviainen, A.; Pyrhönen, J.; Niemela, M.: “Axial Flux Interior Permenant Magnet Synchronous Motor With Sinusoidally Shaped Magnets”, *ISEF 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*, Cracow, Poland, **(2001)**.
- [14]. Aydın, M.; Huang, S.; Lipo, T.A.: “Design and 3D Electromagnetic Field Analysis of Non-slotted and Slotted Torus Type Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Machines”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **(2001)**.
- [15]. Huang, S.; Aydın, M.; Lipo, T.A.: “TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies”, *IEEE Industry Applicaitons Conference*, Vol.3, Chicago, October, **(2001)** 1619-1625.
- [16]. Aydın, M.; Huang, S.; Lipo, T.A.: “A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control”, *IEEE Annual Meeting*, Vol.2, **(2002)** 1250-1257.
- [17]. Gieras, J.F.; Gieras, I.A.: “Performance Analysis of a Coreless Permanent Magnet Brushless Motor”, *IEEE Industry Applicaitons Conference*, Vol.4, **(2002)** 2477-2482.
- [18]. Yang, Y.P.; Cheung, C.H.; Wu, S.W.; Wang, J.P.: “Optimal Design and Control of Axial Flux Brushless DC Wheel Motor for Electrical Vehicles”, *Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation*, **(2002)**.

- [19]. Caricchi, F.; Capponi, F.G.; Crescimbin, F.; Solero, L.: “Experimental Study on Reducing Cogging Torque and Core Power Loss in Axial Flux Permanent Magnet Machines with Slotted Winding”, *IEEE Industry Applications Conference*, Vol.2, **(2002)** 1295-1302.
- [20]. Yang, Y.P.; Luh, Y.P.; Cheung, C.H.; Wang, J.P.; Wu, S.W.: “Multi-Objective Optimal Design and Current Waveforms Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motors for Electric Vehicles”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol.1, **(2003)** 621-626.
- [21]. Aydın, M.; Qu, R.; Lipo, T.A.: “Cogging Torque Minimization Technique for Multiple-Rotor, Axial-Flux, Surface-Mounted-PM Motors : Alternating Magnet Pole-Arcs in Facing Rotors”, *Industry Applications Conference*, Vol.1, **(2003)** 555-561.
- [22]. Liu, C.T.; Chiang, T.S.; Zamora, D.; Lin, S.C.: “Field Oriented Control Evaluations of a Single Sided Permanent Magnet Axial Flux Motor for an Electric Vehicle”, *IEEE Transactions on Magntecis*, Vol.39, No.5, September, **(2003)** 3280-3282.
- [23]. Espanet, C.; Tekin, M.; Bernard, R.; Miraoui, A.; Kauffmann, J.M.: “A New Structure of an High Torque In-wheel Motor”, *Electrical Machines and Systems ICEMS*, Vol.1, **(2003)** 158-162.
- [24]. Parviainen, A.; Niemela, M.; Pyrhönen, J.: “A Novel Axial Flux Permanent Magnet Machine To Laboratory Use”, *The 11th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*, Maribor, Slovenia, September, **(2003)** 333-336.
- [25]. Yinghui, GE.; Chunsheng, LI.; Guangzheng, NI.: “A Novel Control System of Brushless In-Wheel Motors Used for EVs”, *Electrical Machines and Systems ICEMS Sixth International Conference on*, Vol.2, **(2003)** 592-595.
- [26]. Mendrela, E, A.; Jagiela, M.: “Analysis of Torque Developed in Axial Flux, Single-Phase Brushless DC Motor With Salient-Pole Stator ”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.19, No.2, **(2004)** 271-277.
- [27]. Rahman, K.; Patel, N.; Caricchi, F.; Crescimbin, F.: “Application of Direct Drive Wheel Motor for Fuel Cell Electric and Hybrid Electric Vehicle

- Propulsion System”, *Proc. Of 39th Annual Meeting of IEEE-IAS Industry Applications Society*, Seattle, Washington(USA), **(2004)** 1420-1426.
- [28]. Upadhyay, P.R.; Rajagopal, K.R.; Singh, B.P.: “Design of a Compact Winding for an Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor Used in an Electric Two Wheeler”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.40, No.4, July, **(2004)** 2026-2028.
- [29]. Caricchi, F.; Capponi, F.G.; Crescimbin, F.; Solero, L.: “Experimental Study on Reducing Cogging Torque and No-Load Power Loss in Axial Flux Permanent Magnet Machines With Slotted Winding”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.40, No.4, July/August, **(2004)** 1066-1075.
- [30]. Liu, C.T.; Lin, S.C.; Chiang, T.S.: “On the Analytical Flux Distribution Modeling of an Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Motor for Control Applications”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.282 **(2004)** 346-350.
- [31]. Hori, Y.: “Future Vehicle Driven by Electricity and Control Resaerch on Four Wheel Motored UOT Electric March II”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.51, No.5, **(2004)** 954-962.
- [32]. Fujimoto, H.; Saito, T.; Tsumasaka, A.; Naguchi, T.: “Motion Control and Road Condition Estimation of Electric Vehicles with Two In-Wheel Motors”, *IEEE International Conference on Control Applications*, Taipei, Taiwan, September, **(2004)**.
- [33]. Oh, S.C.; Emadi, A.: “Test and Simulation of Axial Flux Motor Characteristics for Hybrid Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.53, No.3, May, **(2004)** 912-919.
- [34]. Bolognani, S.; Tomasini, M.; Zigliotto, M.: “Control Design of a Steer-by-Wire System with High Performance PM Motor Drives”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, **(2005)** 1839-1844.
- [35]. Crescimbin, F.; Di Napoli, A.; Solero, L.; Caricchi, F.: “Compact Permanent-Magnet Generator for Hybrid Vehicle Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applicaitons*, Vol.41, No.5, September/October, **(2005)** 1168-1177.

- [36]. He, P.; Hori, Y.; Kamachi, M.; Walters, K.; Yoshida, H.: “Future Motion Control to be Realized by In-Wheel Motored Electric Vehicle”, *IEEE Industrial Electronics Society*, November, **(2005)** 2632-2637.
- [37]. Yang, Yee-Pin.; Wang, T.J.: “Electronics Gears for Electric Vehicles with Wheel Motor”, *IEEE Industrial Electronics Society*, **(2005)**.
- [38]. Locment, F.; Semail, E.; Piriou, F.: “Design and Study of a Multiphase Axial-Flux Machine”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.42, No.4, April, **(2006)** 1427-1430.
- [39]. Upadhyay, P.R.; Rajagopal, K.R.: “FE Analysis and Computer Aided Design of a Sandwiched Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.42, No.10, October, **(2006)** 3401-3403.
- [40]. Park, J.C.; Choi, H.R.; Choe, G.H.: “A Study on AFPM(Axial Flux Permanent Magnet) Motor without Stator Core”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, **(2006)** 1-6.
- [41]. Tapia, J.A.; Gonzalez, D.; Wallace, R.R.; Valenzuela, M.A.: “Axial Flux Surface Mounted PM Machine with Field Weakening Capability”, *Springer Recent Developments of Electrical Drives*, **(2006)** 321-334.
- [42]. Jo, W.; Cho, Y.; Chun, Y.; Koo, D.: “Characteristic Analysis on Overhang Effect in Axial Flux PM Synchronous Motors with Slotted Winding”, *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference*, **(2006)**.
- [43]. Mardaneh, M.; Mirsalim, M.; Aliahmadi, M.: “Modeling and Design of Axial-Flux Permanent Magnet Machines: A New Approach”, *Power Electronics, Machines and Drives, The 3rd IET International Conference*, **(2006)** 346-348.
- [44]. Yang, Y.P.; Chuang, D.S.: “Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.43, No.1, January, **(2007)** 51-61.
- [45]. Aydin, M.; Zhu, Z.Q.; Lipo, T.A.; Howe, D.: “Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent Magnet Machines Design Concepts”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.43, No.9, September **(2007)** 3614-3622.

- [46]. Yang, Y.P.; Liu, J.J.; Wang, T.J.; Kuo, K.C.; Hsu, P.E.: “An Electric Gearshift With Ultracapacitors for the Power Train of an Electric Vehicle With a Directly Driven Wheel Motor”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.56, No.5, September, **(2007)** 2421-2431.
- [47]. Kurronen, P.; Pyrhönen, J.: “Analytic Calculation of Axial Flux Permanent Magnet Motor Torque”, *IET Electr. Power Appl.*, Vol.1, No.1, January, **(2007)** 59-63.
- [48]. Lopez, J.; Lloberas, J.; Matnou, R.; Granados, X.; Bosh, R.; Obradors, X.; Torres, R.: “AC Three-Phase Axial Flux Motor With Magnetized Superconductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, June, Vol. 17, No.2, **(2007)** 1633-1636.
- [49]. Belicova, Eva.; Hrabovcova, V.: “Analysis of an Axial Flux Permanent Magnet Machine (AFPM) Based on Coupling of Two Separated Simulation Models (Electrical and Thermal Ones)”, *Journal of Electrical Engineering*, Vol.58, No.1, **(2007)** 3-9.
- [50]. Rahim, N.A.; Ping, H.W.; Tadjuddin, M.: “Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June, **(2007)**.
- [51]. Letelier, A.B.; Gonzalez, D.A.; Tapia, J.A.; Wallace, R.; Valenzuela, M.A.: “Cogging Torque Reduction in an Axial Flux PM Machine via Stator Slot Displacement and Skewing”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.43, No.3, May/June, **(2007)** 685-693.
- [52]. Hüner, E.; Ekren, N.; Akıncı, T.Ç.: “Teker Motorlar ve Teker Motorların Elektrikli Araçlarda Kullanımına İlişkin Bir İnceleme”, *e-Journal of New World Sciences Academy*, Vol.3, No.2, March, **(2008)** 298-309.
- [53]. Gonzalez-Lopez, D.A.; Tapia, J.A.; Wallace, R.; Valenzuela, A.: “Design and Test of an Axial Flux Permanent Magnet Machine With Field Control Capability”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.44, No.9, September, **(2008)** 2168-2173.
- [54]. Marignetti, F.; Colli, V.D.; Coia, Y.: “Design of Axial Flux PM Synchronous Machines Through 3-D Coupled Electromagnetic Thermal and Fluid Dynamical Finite Element Analysis”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.55, No.10, October, **(2008)** 3591-3601.

- [55]. Marignetti, F.; Colli, V.D.; Cancelliere, F.; Scarano, M.; Boldea, I.; Topor, M.: "A Fractional Slot Axial Flux PM Direct Drive", *IEEE* (2008) 689-695.
- [56]. Fei, W.; Luk, P.C.K.; Jinupun, K.: "A New Axial Flux Permanent Magnet Segmented Armature Torus Machine for In Wheel Direct Drive Applications", *IEEE*, (2008).
- [57]. Sadeghierad, M.; Lesani, H.; Mosef, H.; Darabi, A.: "Air Gap Optimization of High-Speed Axial Flux PM Generator", *Journal of Applied Sciences*, (2009) 1915-1921.
- [58]. Choi, J.H.; Kim, J.H.; Kim, D.H.; Baek, Y.S.: "Design and Parametric Analysis of Axial Flux PM Motors With Minimized Cogging Torque", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.45, No.6, June, (2009) 2855-2858.
- [59]. Hüner, E.; Aküner, C.: "Eksenel Akıllı Motorlarda Uygulanan Kontrol Yöntemlerine İlişkin Bir İnceleme", *5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu İATS'09*, Mayıs, Karabük, (2009).
- [60]. Fan, C.Z.; Huang, M.X.; Ye, Y.Y.: "Research and Industrial Application of a Novel Compound Permanent Magnet Synchronous Machine", *Journal of Zhejiang University*, Vol.10, No.4, (2009) 471-477.
- [61]. Al Zaher, R.; de Groot, S.; Polinder, H.; Wieringa, P.: "Comparison of an Axial Flux and a Radial Flux Permanent Magnet Motor for Solar Race Cars", *ICEM XIX International Conference on Electrical Machines*, Rome, (2010) 1-6.
- [62]. Seo, J.M.; Rhyu, S.H.; Kim, J.H.; Choi, J.H.; Jung, I.S.: "Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Robot Joint Module", *IEEE Power Electronics Conference (IPEC)*, (2010) 1336-1340.
- [63]. Gieras, J.F.; Wang, R.J.; Kamper, M.J.: "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", *Kluwer Academic Publishers*, (2005) 6-55.
- [64]. Aydın, M.: "Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors for Smooth Torque Traction Drive Applications", PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison, (2004) 1-60.
- [65]. Challa, S.K.: "Comparative Study of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor Operating With The Winding Connected in Single-Phase and

- Two-Phase System”, Master of Science, Louisiana State University, USD, **(2006)** 1-70.
- [66]. Sahin, F.: “Design and Development of a High-Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Machine”, PhD Thesis, Eindhoven, Avusturalya, **(2001)** 1-60.
- [67]. Parviainen, A.: “Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machines”, PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, **(2005)** 1-60.
- [68]. Sezenoğlu, C.: “Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Motorun Benzetimi ve Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, **(2009)** 1-60.
- [69]. Kurt, Ü.: “Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar için Yeni Tasarım Modeli Geliştirme”, Doktora Tezi, Samsun, **(2006)** 1-60.
- [70]. Valtonen, M.: “Performance Characteristics of an Axial-Flux Solid Rotor Core Induction Motor”, PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, **(2007)** 1-60.
- [71]. Sakarya, H.: “Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar için Alan Yönlendirmeli Sürücü Düzeneği Tasarımı ve Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, **(2009)** 1-60.
- [72]. Furlani, E.P.: “Permanent Magnet and Electromechanical Devices”, Academic Press Series in Electromagnetism, Academic Press, New York, **(2001)** 14-55.
- [73]. <http://www.kimyasanal.net/konugoster.php?yazi=s2bw0r4lhl> (19.04.2011).
- [74]. <http://sciart.karaelmas.edu.tr/bolumler/fizik/Ders%20Notlari/E10.pdf> (19.04.2011).
- [75]. Cullity, B.D.; Graham, C.D.: “Introduction to Magnetic Materials”, Wiley, United States of America, Second Editon, **(2009)** 485-492.
- [76]. <http://www.mceproducts.com/knowledge-base/article/article-dtl.asp?id=2> (20.04.2011)
- [77]. Ansoft Corporation.: “Maxwell 3D Technical Notes”, **(2008)**
- [78]. Gürdal, O.: *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, 1. Basım, İstanbul, Türkiye, **(2001)** 405-442.

- [79]. Fenercioğlu, A.: “Helisel Yapılı Anahtarlama Relüktans Motorun(HY-ARM) Tasarımı ve Analizi”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, **(2006)** 42-60.
- [80]. Ansoft Corporation.: “Maxwell 3D User Guide”, **(2008)**
- [81]. Jussila, H.; Nerg, J.; Pyrhönen, J.; Parviainen, A.: “Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Motor for Industrial Use”, *IEEE XIX International Conference on Electrical Machines*, Vol.14, No.2, Rome, **(2010)** 1-5.
- [82]. Locment, F.; Semail, E.; Piriou, F.: “Soft Magnetic Composite Axial Flux Seven-Phase Machine”, **(2010)**
- [83]. Qiu-ling, D.; Feng, X.; Wen-tao, H.: “Design of New-Type Axial Flux Permanent Magnet In-Wheel Machine”, *IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering*, **(2010)** 5831-5834.
- [84]. Luise, F.; Odorico, A.; Tessarolo, A.: “Extending the Speed Range of Surface Permanent Magnet Axial Flux Motors by Flux Weakening Characteristic Modification”, *IEEE XIX International Conference on Electrical Machines*, Rome, **(2010)** 1-7.
- [85]. Akuner, C.; Huner, E.: “The Air Gap and Angle Optimization in the Axial Flux Permanent Magnet Motor”, *Electronics and Electrical Engineering*, No.4, **(2011)** 25-28.
- [86]. Nguyen, T.D.; Tseng, K.J.: “Comprasion of Axial Flux Permanent Magnet Machines with Fractional and Integral Slot per Pole”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, **(2011)** 1-5.
- [87]. Mahmoudi, A.; Ping, H.W.; Rahim, N.A.: “A Comprasion Between the Torus and AFIR Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Using Finite Element Analysis”, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, **(2011)** 242-247.
- [88]. Akuner, C.; Huner, E.: “Theoretical and experimental analysis of open-slotted axial-flux permanent magnet electrical machine”, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, Vol.29, No.2, **(2012)**.
- [89]. De Donato, G.; Capponi, F.G.; Caricchi, F.: “Fractional-Slot Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Machine With Core Wound

Coils”, *Industry Applications IEEE Transactions on*, Vol.48, No.2, **(2012)** 630-641.

- [90].** Jian, L.; Choi, D.W.; Cho, Y.H.: “Development of a natural cooled axial flux permanent magnet generator for wind turbine”, *Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium on*, May, **(2012)** 635-640.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Engin HÜNER

Doğum Tarihi: 15 Şubat 1980

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Elektrik Eğitimi Bölümü	A.İ.B.Ü	1998-2002
Y. Lisans	Elektronik Mühendisliği	G.Y.T.E	2002-2005
Doktora	Elektrik Eğitimi ABD	M.Ü	2007-

Yüksek Lisans Tez Başlığı ve Tez Danışmanı: Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun Bulanık Mantıkla Kontrolü, Yrd. Doç. Dr. Şeref Naci ENGİN

Doktora Tezi/S.Yeterlik Çalışması/Tıpta Uzmanlık Tezi Başlığı ve Danışmanı: Eksenel Akıllı Motor Tasarımı, Uygulaması ve Kontrolü, Doç. Dr. Caner AKÜNER

Görevler

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Ar. Grv.	T.E.F Kırklareli Üniversitesi	2005-2007
Ar. Grv.	T.E.F M.Ü (35. Madde)	2007.....

Görevler:

Projelerde Yaptığı Görevler:

1. *Eksenel Akıllı Motor Tasarımı, Uygulaması ve Kontrolü*, Marmara Üniversitesi Rektörlüğü, Bilimsel Araştırma Projeleri, 2008/FEN-C-DRP-181208-0292, **Proje Araştırmacısı**, (devam ediyor).

ESERLER

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler(SSCI, AHCI, SCI-Expanded gibi eser sonuna eklenecek):

A1. Akuner, C.; **Huner E.:** “The Air Gap and Angle Optimization in the Axial Flux Permanent Magnet Motor” *Electronics and Electrical Engineering- Kaunas: Technologija*, (2011) 25-29.

A.2. Aküner, C.; **Huner, E.:** “Theoretical and experimental analysis of open-slotted axial-flux permanent magnet electrical machine”, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, Vol.29, No.2, (2012).

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler :

B1. **Hüner, E.;** Aküner, C.: “Eksenel Akıllı Motorlarda Uygulanan Kontrol Yöntemlerine İlişkin Bir İnceleme” *5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük/Türkiye*, (2009)

C. Yazılan uluslararası kitaplar veya kitaplarda bölümler:

D. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

E. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

E1. **Hüner, E;** Engin, Ş.N.: “Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun Modellenmesi” *11. Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Ulusal Kongresi, Eylül*, (2005)

F. Diğer yayınlar :

F1: **Hüner, E;** Ekren, N.; “Teker Motorlar ve Teker Motorların Elektrikli Araçlarda Kullanımına İlişkin Bir İnceleme” *e-Journal of New World Sciences Academy*, (2008)

