



YÜKSEK VERİMLİ VE STANDART VERİMLİ SİNCAP KAFESLİ ASENKRON
MOTORLARIN PERFORMANS ANALİZİ

Orhan GÖK

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2015

YÜKSEK VERİMLİ VE STANDART VERİMLİ SİNCAP KAFESLİ ASENKRON
MOTORLARIN PERFORMANS ANALİZİ

Orhan GÖK

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Asım Gökhan YETGİN

Kasım - 2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Orhan GÖK' ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı Yüksek verimli ve standart verimli sincap kafesli asenkron motorların performans analizi başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

12 /11/2015

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa TURAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali İhsan ÇANAKOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Asım Gökhan YETGİN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 16 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Yrd. Doç. Dr. Asım Gökhan YETGİN

Orhan GÖK

YÜKSEK VERİMLİ VE STANDART VERİMLİ SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARIN PERFORMANS ANALİZİ

Orhan GÖK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2015

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Asım Gökhan YETGİN

ÖZET

Asenkron motorlar geçmişten günümüze kadar her yönden büyük bir aşama kaydetmiştir. Motor hacmi, motor parçaları ve kullanılan malzemelerde teknolojinin gelişmesiyle birlikte büyük aşamalar kaydedilmiştir. Motor teknolojisi geliştikçe standart verimli motorlar yerini yüksek verimli motorlara bırakmıştır.

Bu tez çalışmasında her ikisi de 1.5 kW gücünde sincap kafesli olan standart verimli motor ile yüksek verimli motorun verim değerleri incelenmiş ve karşılaştırması yapılmıştır. Standart verimli ve yüksek verimli motorlar 9 başlık altında mukayese edilmiş ve bu parametrelerin ayrıntılı açıklaması yapılmıştır. Ayrıca AGM 90 S 2 tipinde standart verimli motor ile AGM2E 90 S 2 tipindeki yüksek verimli motorun boşa çalışma, kısa devre çalışma ve yüklü çalışma deneyleri yapılarak karşılaştırmaları yapılmıştır. Her iki motor de monte edilerek her bir aksamı teker teker incelenmiştir. Her iki motorun nüvesi çıkarılarak kayıp değerleri ve B-H değerleri bulunarak ayrıntılı analizi yapılmıştır. Tüm bu çalışmalarla yüksek verimli motorların standart verimli motorlardan çok daha verimli oldukları tekrar ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: B-H Değerleri, Fiziksel Boyutlar, Performans Analizi, Standart Verimli Motor, Yüksek Verimli Motor.

PERFORMANCE ANALYSIS OF STANDARD AND HIGH EFFICIENCY SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS

Orhan GÖK

Electrical and Electronics Engineering, M.S.Thesis, 2015

Thesis Supervisor: Assistant Professor Asım Gökhan YETGİN

SUMMARY

Induction motors has made a huge step up from the past in every way. Motor size, motor parts have made major strides with the development of technology and the materials used in. As the motor technology has improved, standard motors have been replaced with high efficiency motors.

In our study, both 1.5 kW squirrel cage standard motor and 1.5 kW high efficiency motors have been analyzed and compared in terms of efficiency. Standard and high efficiency motors have been compared under the 9 categories and detailed explanations of these parameters have been made. Furthermore, AGM 90 S 2 standard efficiency motor and AGM2E 90 S 2 high efficiency motor have been compared by experimenting the motors' performance during no load, short circuit operation and load operation. Both motors were dismantled and every piece was analyzed one by one after the test. The motors' cores have been extracted and analyzed in detail power loss (W/kg) and B-H value. High efficiency motors have been proven again to be much more efficient than standard efficiency motors in this study.

Keywords: B-H Values, Standard Efficiency Motor, Dimension of Construction, High Efficiency Motor, Performance Analysis.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana yardımcı olan başta danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Asım Gökhan Yetgin'e, desteğini hep yanımda hissettiğim babam İbrahim Gök, annem Umahan Gök, kardeşim Fatma Nur Gök'e, deneylerin yapımında tezgâh ve teçhizat imkânı sağlayan Dumlupınar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümüne ve emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
 1. LİTERATÜR TARAMASI.....	 1
 2. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORUN ÇALIŞMASI	 5
2.1. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi	5
2.2. Asenkron Motorlarda Üç Fazlı Döner Alan Oluşumu.....	6
2.2.1. Döner alanın analitik ifadesi	10
2.3. Döner Makinalarda Eşdeğer Devre	14
2.3.1. Asenkron motorun eşdeğer devresi.....	14
2.3.2. Asenkron motorun boşa çalışması	18
2.3.3. Asenkron motorun kısa devre çalışması	20
2.3.4. Asenkron motorun yüklü çalışması	21
 3. YÜKSEK VERİMLİ MOTORLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	 22
3.1. Yüksek Verimli Motorların Avantajları	22
3.2. Yüksek Verimli Motorların Maliyeti.....	22
3.3. Mikro ve Makro Ekonomik Faydalar	23
 4. ASENKRON MOTORUN VERİMİNİ ARTIRMAK İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	 24
4.1. Malzeme Çeşidinin Etkisi.....	24
4.2. Kayıpların Etkisi.....	25

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.3. Sargıların Durumu ve Türü.....	26
4.4. Harmoniklerin Etkisi	27
4.5. FEMM, GA, PSO Programları İle Yapılan Optimizasyonlar	28
4.6. Hava Aralığının Etkisi.....	29
4.7. Standart İle İlgili Yapılan Çalışmalar	30
4.8. Sıcaklığın Etkisi.....	31
4.9. Nüve Boyutunun Etkisi	32
 5. STANDART VERİMLİ MOTOR İLE YÜKSEK VERİMLİ MOTOR ARASINDAKİ FİZİKSEL FARKLILIKLAR	 33
5.1. Yüksek Verimli ve Standart Verimli İki Motorun Demonte Edilmesi.....	33
5.1.1. Standart verimli motorun demonte edilmesi.....	33
5.1.2. Yüksek verimli motorun demonte edilmesi	33
5.1.3. Rotor kesme işlemi	39
5.2. Yüksek Verimli Motor İle Standart Verimli Motorun İşletme Değerleri Yönünden Farklarının Ortaya Konulması	40
5.2.1. Standart verimli motorun işletme değerleri	40
5.2.2. Yüksek verimli motorun işletme değerleri	40
5.3. Yüksek Verimli Motor İle Standart Verimli Motorun Fiziksel Boyutları Yönünden Farklarının Ortaya Konulması	42
5.3.1. Motor boyut parametrelerinin açıklanması	43
5.4. Yüksek Verimli Motor Ve Standart Verimli Motorda Bulunan Nüve Malzemesinin Tanıtılması, Açıklanması, Farklarının Ortaya Konulup Yorumlanması.....	45
5.4.1. Nüve malzemesinin analizi ve farklarının ortaya konulması.....	45
5.4.2. ETİAL 7E malzemesinin tanıtımı	46
5.4.3. M700-50A malzeme kodunun açıklanması	47
5.4.4. Analiz edilen nüve parçasının B-H değerlerinin ve B-H eğrisinin gösterilmesi.....	49
 6. STANDART VERİMLİ MOTOR İLE YÜKSEK VERİMLİ MOTOR DENEYLERİ.....	 52
6.1. Deney Bağlantıları.....	52
6.2. Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	57
6.2.1. Elde edilen sonuçlar (Standart verimli motor).....	57

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.2.2. Elde edilen sonuçlar (Yüksek verimli motor)	58
6.3. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması.....	59
6.3.1. Standart verimli motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması	59
6.3.1.1. Boşta çalışma deneyi.....	59
6.3.1.2. Kısa devre deneyi.....	60
6.3.1.3. Yüklü çalışma deneyi.....	61
6.3.2. Yüksek verimli motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması	62
6.3.2.1. Boşta çalışma deneyi.....	62
6.3.2.2. Kısa devre deneyi.....	63
6.3.2.3. Yüklü çalışma deneyi.....	64
7. YORUMLAR VE SONUÇ	69
KAYNAKLAR DİZİNİ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Üç fazlı alternatif akımın değişim eğrisi.	6
2.2 Çeşitli anlarda stator sargılarından geçen üç fazlı alternatif akımların meydana getirdiği kutuplar.....	7
2.3. Esas alını bozan iletkenin dışarı itilmesi.	9
2.4 N-S daimi mıknatıs kutupları ile kısa devreli rotorun döndürülüşü.	9
2.2.1. Döner alanın analitik ifadesi	10
2.5 Aralarında 120° faz farkı olan eksenler üzerinde üç bobin ile gösterilen a,b,c fazı.	10
2.6. a) Üç fazlı asenkron motorun sargılarındaki manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu değerleri b) aa' sargısındaki manyetik alan şiddeti vektörü.	12
2.7 $\omega t=0^\circ$ ve $\omega t=90^\circ$ anı için statordaki manyetik akı yoğunluğu vektörleri için statordaki net manyetik akı vektörünün konumu.	13
2.8. Üç fazlı asenkron motorun bir faz eşdeğer devresi a) Transformatör devresi b) Primere indirgenmiş tam eşdeğer devresi.	15
2.9. Rotor eşdeğer devresi a) Herhangi bir s kaymasında b) Durma anında.	16
2.10. Üç fazlı asenkron motorun bir faz yaklaşık eşdeğer devresi.....	17
2.11. Stator ve rotor akımı.....	18
4.1. Harmonik derecesi-sıcaklık eğrisi.	28
5.1. Standart verimli motorun etiketi.	33
5.2. Yüksek verimli motorun etiketi.	34
5.3. Motor ön panellerinin dıştan görünümü.	35
5.4. Motorların üstten görünümü.	35
5.5. Motor stator görünümleri.	36
5.6. Motor sargı görünümleri.	36
5.7. Motor sargılarının üstten görünümü.....	37
5.8. Motor kanatçıklarının görünümü.	37
5.9. Motor rotor görüntüleri.	38
5.10. Motor mili görünümleri.....	38
5.11. Rotorun enine kesme işlemi.	39
5.12. Rotor kesme işlemi.....	39
5.13. Rotorun kesilmiş hali.	40
5.14. Motorlara ait fiziksel parametrelerin gösterimi.....	42
5.15. Stator nüvesinin gösterimi.....	45
5.16. M700-50A malzemesinin kayıp güç-manyetik akı yoğunluğu eğrisi.	47
5.17. B-H eğrisi.....	50
6.1. Boşta çalışma deneyi bağlantı şeması.	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.2. Boşta çalışma deney düzeneği.	53
6.3. Kısa devre deneyi bağlantı şeması.	54
6.4. Yüklü çalışma deneyi bağlantı şeması.	55
6.5. Yüklü çalışma deney düzeneği.....	56
6.6. Standart verimli motora ait devir sayısı-moment grafiği.	62
6.7. Yüksek verimli motora ait devir sayısı-moment grafiği.	65
6.8. Her iki motora ait devir sayısı-moment grafiği.....	67



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bobin akımlarının t anlarında almış oldukları akım değerleri.	11
4.1. Farklı rotor yapıları için performans değerlendirmesi.	25
4.2. Sargı türlerinde kayıpların ve diğer parametrelerin gösterimi.	26
4.3. Sargı türlerinde çeşitli parametrelerin gösterimi.	27
4.4. Harmonik derecesi-sıcaklık artışı ilişkisinin gösterimi.	27
4.5. Hava aralığı-stator ve rotor sargı direnci değerleri ilişkisi.	29
4.6. Hava aralığı-reaktans ilişkisi.	30
4.7. Hava aralığı-verim ilişkisi model ve deneysel sonuç değerleri.	30
5.1. Standart verimli ve yüksek verimli motorun işletme değerleri.	41
5.2. Standart verimli ve yüksek verimli motora ait boyut ile ilgili parametreler.	43
5.3 M700-50A malzemesinin B-W/kg değerleri.	46
5.4 Çelik sınıflarına ait parametrelerin gösterimi.	48
5.5. M700-50A malzemesinin diğer parametre değerleri.	49
5.6. Nüvenin B-H değerleri.	49
6.1. Standart verimli motor boşta çalışma deneyi (ölçülen değerler).	57
6.2 Standart verimli motor kısa devre deneyi (ölçülen değerler).	57
6.3. Standart verimli motor yüklü çalışma deneyi (ölçülen değerler).	58
6.4. Yüksek verimli motor boşta çalışma deneyi (ölçülen değerler).	58
6.5. Yüksek verimli motor kısa devre deneyi (ölçülen değerler).	58
6.6. Yüksek verimli motor yüklü çalışma deneyi (ölçülen değerler).	59
6.7 Standart verimli motorda boşta çalışma deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.	60
6.8. Standart verimli motorda kısa devre deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.	61
6.9 Yüksek verimli motorda boşta çalışma deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.	63
6.10. Yüksek verimli motorda kısa devre deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.	64
6.11. Yüksek ve standart verimli motorlara ait eşdeğer devre parametre değerleri.	65
6.12. Yüksek ve standart verimli motorlara ait kayıp güç değerleri.	66
6.13. Yüksek ve standart verimli motorlara ait moment değerleri.	66
6.14. Yüklü çalışma deneyinden elde edilen verim değerleri.	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
H	Rotorun tam ortasından başlayarak tabana kadar olan mesafe
HD	Motorun toplam yüksekliği
HA	Motor ayak yüksekliği
A	Motor kapak çapı
AA	Motor ayak ön kesit genişliği
AB	Motorun ön kesit genişliği
ϕ AC	Motor ön kesit çapı
ϕ AK	Ek koruyucu kapağın çapı
K	Motor ayak genişliği
K1	Motor kapak çapının bitiş noktasıyla motor ayağının ucu arasındaki mesafe
B	Motor ayağındaki vidalı kısım haricinde kalan kısmın uzunluğu
BA	Motor ayağında bulunan vidalı kısmın bulunduğu bölümün genişliği
L	Rotorun ucundan başlayarak motor kapağı sonuna kadar olan mesafe
LC	İki mil ucu arası mesafe
LK	Pervane mahfaza tası ile kanopi arası mesafe
DB''-DC	Motor rotor mili parçası
Φ D- Φ DA	Mil çapı
A	Alüminyum alaşımdan yapım
G	Üç fazlı, kafes rotorlu asenkron motor
M	Tam kapalı, dış yüzeyden soğutmalı
L	Gövde uzunluğu
C	Motor kapak genişliği
h_s	Stator oluk yüksekliği
h_{cs}	Stator sırt yüksekliği
b_{s2}	Oluk üst genişliği
I_m	Mıknatıslanma akımı
P_o	Demir kayıpları
P_{sv}	Sürtünme ve vantilasyon güç kayıpları

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$P_{in,nl}$	Faz başına güç
V_{pnl}	Faz başına gerilim
I_{pnl}	Hat akımı
I_2	Rotor akımı
R_c	Demir direnci
S_{pnl}	Faz başına görünür güç
pf	Güç faktörü
X_m	Mıknatıslanma reaktansı
P_k	Bakır kayıpları
P_{ilave}	İlave yük kayıpları
$P_{toplaml}$	Toplam kayıp güç
$P_{giriş}$	Giriş gücü
$P_{çıkış}$	Çıkış gücü
R_k	Eşdeğer direnç
R_1	Stator direnci
R_2	Statora indirgenmiş rotor direnci
Z_k	Eşdeğer empedans
X_k	Eşdeğer reaktans
X_1	Stator kaçak reaktansı
X_2	Rotor kaçak reaktansı
M_N	Nominal moment
M_{ya}	Yol alma momenti
M_d	Devrilme momenti
s_d	Devrilme kayması
n_s	Senkron hız
n_r	Rotor hızı
D	Rotor çapı
e	İndüklenen gerilim
n_2	Dönme hızı farkı
F	Manyetik kuvvet
M_M	Döndürme momenti

I_{aa}'	a fazı bobin akımı
I_{bb}'	b fazı bobin akımı
I_{cc}'	c fazı bobin akımı
I_M	Maksimum akım
H_{aa}'	a fazı manyetik alan şiddeti
H_{bb}'	b fazı manyetik alan şiddeti
H_{cc}'	c fazı manyetik alan şiddeti
B_{aa}'	a fazı manyetik akı yoğunluğu
B_{bb}'	b fazı manyetik akı yoğunluğu
B_{cc}'	c fazı manyetik akı yoğunluğu
f_1	Şebeke frekansı
f_2	Rotor frekansı
B_{net}	Net manyetik akı yoğunluğu
B_M	Maksimum manyetik akı yoğunluğu
H_M	Maksimum manyetik alan şiddeti
p	Kutup sayısı
ϕ_M	Maksimum akı
l	Uzunluk
v	Hız

Kısaltma

Pre-EPAAct
NEMA Premium
Premium Plus
PSO
Fuzzy PSO
GEDA
RMA
EFF1
EFF2
EFF3
ALBar
ADC

Açıklama

Enerji politikası yasası yürürlüğe girmeden önce ki motor standardı
Ulusal elektrik üreticileri derneği; motor standardı
Çok yüksek verimli motor
Parçacık sürü optimizasyonu
Bulanık mantık parçacık sürü optimizasyonu
Gujarat enerji gelişimi ajansı
Yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip elektriksel çelik
Asenkron motorda verim sınıfı; 1.sınıf
Asenkron motorda verim sınıfı; 2.sınıf
Asenkron motorda verim sınıfı; 3.sınıf
Fabrikasyon alüminyum çubuk
Alüminyum döküm yapısı

CuDC	Bakır çubuklu rotor
CuBar	Fabrikasyon bakır çubuklar
EmLook	Asenkron motorlardaki elektrik ve manyetik alanların analitik ve nümerik kombinasyonlarının hesaplanma prosedürü
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
YSA	Yapay sinir ağları



1. LİTERATÜR TARAMASI

Bugüne kadar asenkron motorların performansını iyileştirebilmek amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Literatürde bu konu ile ilgili birçok çalışma mevcut olup bazıları aşağıda verilmiştir.

Burt ve arkadaşları (2008) 1.00 HP güçten 200 HP güce kadar olan çeşitli motorlar kullanmış ve Pre-EPA, EPA ve NEMA Premium standartları için verim karşılaştırmaları yapmışlardır. Tüm güç değerinde NEMA Premium standardında verimin diğer iki standarda oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Van ve arkadaşları (2009) 15 kW, 11 kW, 7.5 kW ve 3 kW güçlerindeki standart ve premium plus motorları 4 saat boyunca yapılan deneylere göre karşılaştırmışlar ve her bir motor için ölçülen en yüksek termal denge sıcaklıklarını tespit etmişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre tüm güç değerlerinde standart verimli motorların premium plus motorlara oranla daha yüksek termal sıcaklık değerlerine sahip olduklarını göstermişlerdir. Ayrıca her bir motor için sıcaklık azalmalarını yüzde olarak tespit etmişlerdir. Buna göre sıcaklık azalmaları 15 kW için % 9.42, 11 kW için % 27.20, 7.5 kW için % 8.50 ve 3 kW için % 19.58 olarak tespit etmişlerdir. Al ve arkadaşları nominal yükte çalışan standart verimli motorun toplam kayıp oranlarını beş değişik kayıp çeşidi (Nüve kayıpları, Sürtünme ve vantilasyon kayıpları, Stator bakır kayıpları, Rotor bakır kayıpları, İlave yük kayıpları) için irdelenmişlerdir. Al ve arkadaşları 3 kW'lık standart verimli ve yüksek verimli motorları karşılaştırdıklarında nüve kayıplarının standart verimli motorda daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra sürtünme vantilasyon kayıplarının, yüksek verimli motorda daha yüksek çıktığını, stator bakır kayıplarının, rotor bakır kayıplarının ve ilave yük kayıplarının standart verimli motorda daha yüksek çıktığını göstermişlerdir.

Ranjith ve arkadaşları (2010) PSO ile bulanık mantık modeli tanımlayarak optimal mıknatıslanma akımını hesap ederek asenkron motorun kayıplarını azaltmışlar ve buna bağlı olarak verim değerini yükseltmişlerdir. Önerilen Fuzzy PSO yöntemini, Genetik Algoritma, Fuzzy Logic ve optimizasyon olmadan elde edilen değerler ile karşılaştırmışlardır. Değişik yükler için yapılan modellemelerde Fuzzy PSO yönteminin GA yöntemine göre % 7.76, Fuzzy Lojik yöntemine göre; 0.20 yükte 0.12, 0.40 yükte 0.12, 0.60 yükte 0.11, 0.80 yükte 0.11, nominal yükte ise 0.11 verim değerleri bulunmuştur. Optimizasyon olmadan elde edilen değerlere göre; 0.20 yükte 0.34, 0.40 yükte 0.34, 0.60 yükte 0.32, 0.80 yükte 0.30, nominal yükte ise 0.28 daha iyi verim elde edildiği göstermişlerdir.

Kirtley ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada yüksek verimli CER motorları için alüminyum rotor ile bakır rotoru kıyaslamışlardır. Toplam stator ve rotor kayıpları irdelenmiştir. Buna göre nominal yükte kayıp miktarı alüminyum rotor için toplam kaybın % 46' sı, bakır rotor için toplam kaybın % 26' sı olduğu görülmüştür. Bakır rotor kullanılarak yükte rotor kaybında önemli bir azalma olduğu görülmüştür. Buna göre yükteki kaybın alüminyum rotorda % 37, bakır rotorda % 17 olduğu görülmüştür. Bakır rotor kullanılması ile toplam motor kaybında önemli bir düşüş görülmüştür. James ve arkadaşları stator yüzeysel alanı başına motor kayıp oranını alüminyum rotor ve bakır rotoru karşılaştırarak incelemişler; alüminyum için yaklaşık % 25, bakır için ise yaklaşık % 32 oranında kayıp yüzde oranları elde etmişlerdir.

Yoon ve arkadaşları (2002) çalışmalarında motordaki bobinlerin soğutulması ile meydana gelen sıcaklık değişiminin motor performansına etkilerini incelemişlerdir. Bobin sıcaklığının 10°C düşürülmesiyle nominal yükte % 0.25 oranında verim artışı ve % 125 yükte % 0.50 oranında verim artışı sağlamışlardır.

Pyrhönen ve arkadaşları standart verimli motorlar ile yüksek verimli motorları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucu yüksek verimli motorların standart verimli motorlara nazaran % 35 daha fazla çelik, % 15 daha fazla bakır ve % 15 daha fazla alüminyum içerdiğini tespit etmişlerdir. İlave malzemeler ile birlikte yüksek verim, yüksek soğutma alanı ve yüksek sıcaklık zaman sabiti elde edilmiş; elde edilen bu sonuçlar ile daha düşük sargı işletme sıcaklığı sağlanarak motorların daha uzun ömürlü olduğu sonucuna varmışlardır

Singh ve arkadaşları (2010) enerji verimli endüstriyel motorlar ile ilgili çalışma yapmışlardır. GEDA (Gujarat Energy Development Agency) adlı çalışma ile asenkron motorlardaki toplam verimde % 5 oranında gelişim sağlanmıştır. Motorun optimize edilmesi ile geniş aralıktaki yüklerde ve besleme geriliminde yüksek verim sağlamışlardır. Buda aynı ölçülerde ki yeni motorlarda nominal yükteki verimliliğin standart verimli motorlardan % 2.50 daha fazla olduğunu ve girişteki görünür gücün ise standart verimli motora oranla % 3 daha az olduğunu göstermişlerdir.

Ishida ve arkadaşları (2003) yaptıkları çalışmada, elektrik ve hibrid araçlar için kullanılan asenkron motorlarda nüve malzemelerinin özelliklerini irdelenmiştir. Üç fazlı asenkron motorlarda yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip RMA kullanılarak yüksek verim sağlanabileceğini ifade etmişlerdir.

Yanawati ve arkadaşları (2012) 0.35 mm ve 0.50 mm sac kalınlığına sahip çelik sacların motor performansına etkilerini analiz etmişlerdir. Analizlere göre; 0.35 mm' de verim % 6

oranında artmış, toplam kayıp miktarı % 18.80 azalmış ve eddy akım kayıplarında ise % 19.52 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Manyetik yapıda daha ince sac malzeme kullanılması ile nüve kayıplarının azaldığını buna bağlı olarak verimin arttığını ifade etmişlerdir.

Mach (2012) çalışmasında asenkron motorun nüve uzunluğu değişiminin motor performansına nasıl etki ettiğini incelemiştir. Çalışmasında nüve uzunluğunu 60 mm' den 80 mm' ye çıkardığında stator nüve kayıplarında yaklaşık % 15 azalma ve demir kayıplarında yaklaşık % 13 azalma elde etmiş buna bağlı olarak da motor veriminde % 1.25 oranında bir iyileştirme sağlamıştır.

Parasiliti ve arkadaşları (2004) yaptıkları çalışmada asenkron motorlarda döküm bakır rotor kafesleri ve elektriksel çelik kullanılarak yapılan test sonuçlarını sunmuşlardır. Üç adet standart verimli motor çeşidi referans motor olarak seçilmiştir. İki motor düşük verim sınıfı olan EFF3' e aittir. Üçüncü motor ise EFF2 sınıfındadır. 7.5 kW için 3.20 oranında, 15 kW için 0.9 oranında değişim göstermiştir. 5350 elektrik çelik kullanımı ile birlikte daha büyük motorlar ve daha küçük işletme değeriyle, verim 0.40, 0.70 ve 0.90 oranında artırılmıştır.

Yetgin ve Akbilek (2005) yaptıkları çalışmada endüstride yaygın bir şekilde kullanılan asenkron motorların stator oluk yüksekliği (h_s) değerinin % 40 oranında artırılıp azaltılması, stator sırt yüksekliğinin (h_{cs}) buna bağlı olarak değişimi ve oluk üst genişliği (b_{s2}) değerlerinin değişimi sonucu motorun stator kaçak reaktans değerinin değişimini incelenmişlerdir. Stator kaçak reaktans değerinin belirlenebilmesi için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde FEMM (Finite Element Method Magnetics) adlı paket program kullanılmıştır. Yapay sinir ağları modelinde ise back propagation metoduna dayanan pascal dilinde yazılmış bir bilgisayar programı yardımı ile modellemeler yapılmıştır. Analizler için 3 kW' lık sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak motor için en uygun stator oluk geometrisinin yapısı belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde yapay sinir ağlarından elde edilen değerler ile sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerin gerçek değerleri yakaladığı görülmüştür. Çalışma sonucunda, YSA yaklaşımı ile farklı oluk geometrileri için stator kaçak reaktansı değerlerinin tespit edilebilirliği ispatlanmıştır. Ayrıca karmaşık ve zaman alıcı bir proses olan SEY' e karşılık YSA ile yapılan modellemeyle daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşılmıştır. Ayrıca yapılan analizler sonucunda 3 kW' lık motor için stator kaçak reaktans değerinin stator oluk yüksekliği arttıkça büyüdüğü görülmüştür. Bunun için bu güçteki bir motor için seçilecek stator oluk yükseklik değeri 13–17 mm arasında yapılmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Çunkaş (2010) çok amaçlı bulanık genetik algoritma ile asenkron motorların tasarımı konulu çalışma yapmıştır. Tek amaçlı genetik algoritma optimizasyonu ile çok amaçlı bulanık genetik algoritma kıyaslanmıştır. Bu algoritmaların verileri ve motor performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada 30 HP gücünde, 380 volt, 3 fazlı, 4 kutuplu ve 1500 d/d asenkron motor kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda çok amaçlı bulanık algoritma yönteminin çözüm bulmak ve optimum tasarım sağlamak için daha uygun yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Yadav ve arkadaşları (2012) PSO' nun geliştirilmiş versiyonu olan SMPSO yöntemini asenkron motorda parametre ölçümü ve verim hesabı için kullanmışlardır. Bu yöntem ile asenkron motorun parametreleri modifiye edilmiş ve elde edilen yeni parametreler yardımı ile verim hesabı yapılmıştır. Elde edilen sonuca göre verimin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Verim hesabı yapıldığında PSO için verim % 85.50 olarak hesaplanırken SMPSO yöntemi kullanıldığında verimin artış gösterdiği ve % 85.90 olarak elde edildiği görülmüştür.

2. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORUN ÇALIŞMASI

Bir ve üç fazlı olarak imal edilen asenkron makineler duran kısım ve dönen kısımdan oluşur. Motorun duran kısmına stator, dönen kısmına ise rotor denir. İki çeşit asenkron motor vardır. Birinci tip; rotor üzerine açılmış oluklara yerleştirilmiş sargılar ve bu sargılardan çıkan uçlara bağlanmış, rotorla birlikte dönen bileziklerden oluşur. Bu tip asenkron motorlara bilezikli asenkron motor denilmektedir. İkinci tipte; rotora açılmış oluklara ya alüminyum ya da bakır iletkenler yerleştirilir. Bu iletkenler rotorun her iki başında bulunan iki çemberle her iki taraftan kısa devre edilir. Bu tip asenkron motorlara kısa devre kafesli veya sincap kafesli asenkron motorlar denir (Güzelbeyoğlu, 1998).

2.1. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi

Üç fazlı AC makinalarda üretilen üç fazlı gerilim, endüstride R-S-T (L_1 - L_2 - L_3) olarak bilinir. R-S-T gerilimleri, aralarında 120°'er derece faz farkı bulunan gerilimlerdir. Üç fazlı gerilim generatörlerde üretilir. Generatör bobinleri içeride yıldız bağlanırken dışarıya üç uç alınır. Yıldız noktasında gerilim sıfırdır. Bu noktadan nötr hattı alınır. Üç fazın da gerilimleri eşittir. Generatör fiziki yapısı gereği üç faz sinüs eğrisi şeklinde ortaya çıkar. Üç fazlı makinelerde nötr hattı kullanılmaz. Üç faz, kendi aralarında sıra ile nötr görevi görür. Zaman eğrisi akımın yön değişim noktasıdır. Zaman eğrisinin altında ve üstünde akım yönleri farklıdır. Üç faz gerilimde her fazın değeri ayrı olmak üzere, zamanla artı ve eksi maksimum değerleri arasında değişim gösterir (Altıntaş).

İndüksiyon prensibi:

"Dönen bir manyetik alan içerisinde bulunan iletkenlerde gerilim indüklenir."

"Dönen bir manyetik alan içerisinde bulunan iletkenlerden bir akım geçirilirse, iletkenler manyetik alan tarafından itilirler."

Asenkron motorların çalışması şu üç prensibe dayanır:

- 1- Alternatif akımın uygulandığı stator sargılarında dönen bir manyetik alan olmalıdır.
- 2- Manyetik alan içerisinde bulunan bir iletkenin akım geçirilirse o iletken, manyetik alanın dışına itilir.
- 3- Aynı adlı kutuplar birbirini iter, zıt kutuplar birbirini çeker.

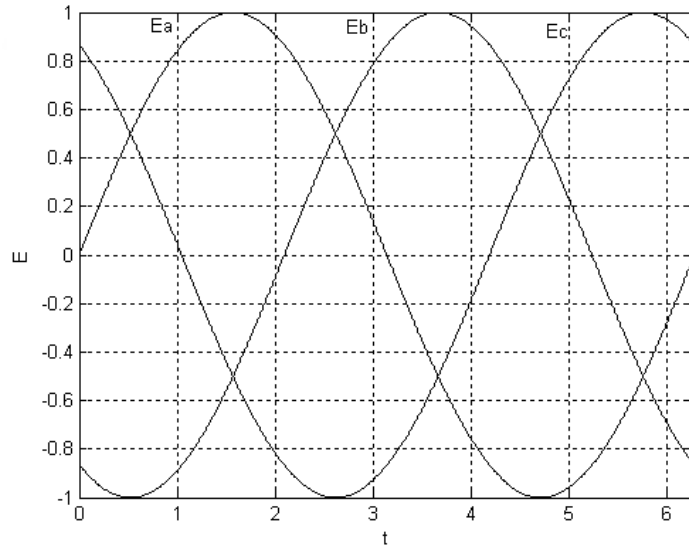
Döner manyetik alanın meydana gelmesi için birbirinden faz farklı en az 2 tane manyetik alana ihtiyaç vardır. Bunun için üç fazlı motorlarda:

a) Üç fazlı stator sargıları stator oyuklarına, birbirinden 120° ’lik elektriksel açı farkıyla yerleştirilir.

b) Üç fazlı stator sargılarına, aralarında 120° faz farkı olan alternatif gerilim uygulanmalıdır. Döner manyetik alan içerisinde bulunan iletkende bir emk indüklenir. İletkenin iki ucu kısa devre edilirse, iletkenden kısa devre akımı geçer. Geçen bu akımdan dolayı iletken, manyetik alanın dışına doğru itilir. Döner manyetik alan içerisine iletken yerine, iki ucundan yataklanmış mil üzerine sarılı bobin koyarsak, bobinlerin iki ucu kısa devre edildiğinden mil, döner manyetik alan yönünde dönmeye başlar (Altıntaş).

2.2. Asenkron Motorlarda Üç Fazlı Döner Alan Oluşumu

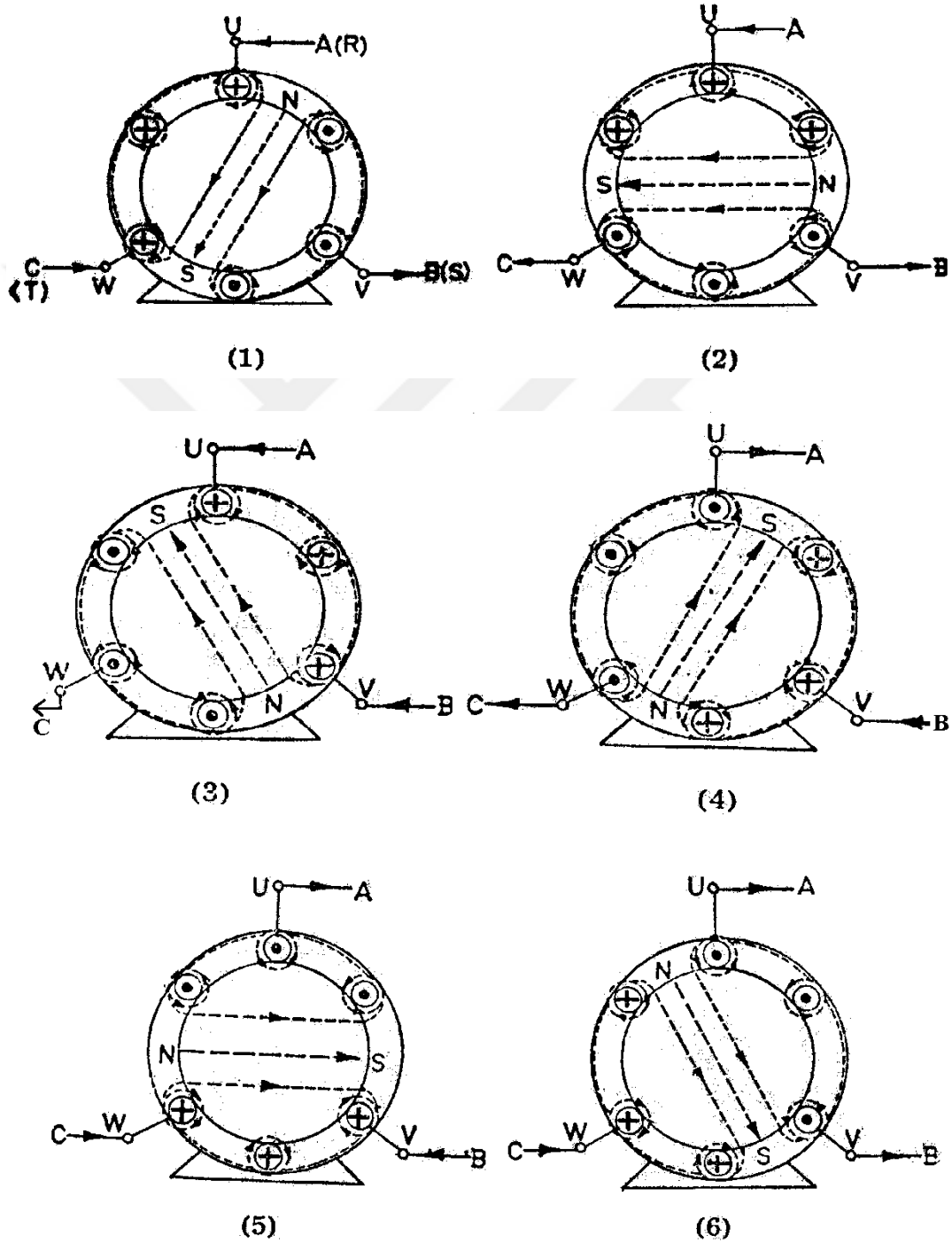
Üç fazlı asenkron motorun statoruna birbirinden 120° ’şer derece faz farklı üç faz sargısı yerleştirilir. En basit bir statorda her biri bir faza ait olmak üzere üç tane bobin bulunur. Birinci faz bobininin başlangıç ucu U, son ucu X, ikinci faz bobinin başlangıç ucu V, son ucu Y ve üçüncü faz bobinin başlangıç ucu W, son ucu da Z ile gösterilir. Şekil 2.1’de statora uygulanan üç fazlı alternatif akımın değişim eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.1. Üç fazlı alternatif akımın değişim eğrisi.

RST faz akımları, aralarında 120° ’şer derecelik faz farkı olan sinüzoidal akımlardır. Bobin kenarlarından geçen akımların meydana getirecekleri manyetik alanlar sağ el kaidesi ile bulunarak işaretlendiğinde N ve S kutuplarının yerleri tespit edilir.

Şekil 2.2' de işaretli (1) anında R ve T fazlarındaki akımların yönleri pozitif, S fazının akım yönü negatiftir. Şekil 2.1' deki (1) nolu şekilde R ve T fazlarının akım yönleri giriş ve S fazının akım yönü çıkış olarak işaretlenir (Saçkan, 1996).



Şekil 2.2. Çeşitli anlarda stator sargılarından geçen üç fazlı alternatif akımların meydana getirdiği kutuplar.

(2) anında R fazından geçen akımın pozitif, S ve T fazlarından geçen akımların ise negatif yönlü oldukları görülmektedir. Şekil 2.2' deki (2) nolu şekilde R fazının akımı giriş, S ve T fazlarının akımları da çıkış olarak alınır.

(3), (4), (5) ve (6) anlarında RST fazlarından geçen akımların meydana getirdikleri N-S kutupları Şekil 2.2' deki (3), (4), (5) ve (6)' nolu şekillerde görülmektedir. Şekil 2.2' de (6) numaralı şekilden sonra gelen (7) anı (1) anı ile aynıdır.

Bu şekiller incelendiğinde, N-S kutuplarının saat ibresi yönünde döndüğü görülür. Statorda bir dönme yoktur. Alternatif akımdaki bir periyotluk değişme N-S kutuplarının bir devir yapmasına sebep olur. Alternatif akımın frekansı 50 Hz ise, saniyede 50 periyotluk bir değişme yapar. Dolayısıyla statordaki faz bobinlerinin meydana getirdiği N-S kutupları saniyede 50 devirle döner. Bu, dakikada 3000 d/d yapar. Devir sayısı, kutup sayısına ve frekansa bağlı olarak değişir. Senkron hız adı verilen bu değerin ifadesi;

$$n_s = \frac{60f_1}{p} \quad (2.1)$$

şeklinde yazılır. Kısacası, üç fazlı stator sargısı üç fazlı akımla beslenince, Amper Yasasına göre asenkron makinanın hava alığında n_s hızı ile dönen bir döner alan elde edilir. Asenkron makinanın çalışmasını bu döner alan sağlar, bu nedenle asenkron makina bir döner alan makinasıdır.

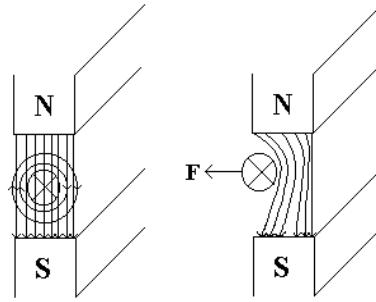
Hava aralığında statora göre n_s hızı ile dönen döner alan rotor iletkenlerini rotor dururken aynı hızla, rotor n_r hızı ile dönerken n_2 hız farkıyla keser. Faraday yasasına göre içinden akım geçen bir iletken etrafında manyetik alan oluşur ve bu değişken manyetik alan rotor iletkenleri üzerinde bir emk indükler. İndüklenen bu gerilimin genel ifadesi ise $e = Blv$ dir. İndükleme hızı v_2 döner alan ve rotor arasındaki n_2 dönme hızı farkı ile D rotor çapı tarafından belirlenir (Çetin, 1993).

$$n_2 = n_s - n_r \quad v_2 = \pi D n_2 \quad (2.2)$$

Rotor sargısının devresi bilezikli motorlarda bilezikler üzerinden, sincap kafesli motorlarda alüminyum halkalar tarafından iki taraftan kısa devre edilirler. Bu durumda rotor iletkenlerinde indüklenen E_2 gerilimleri Ohm yasasına göre bu kapalı devreler üzerinden yolunu tamamlayarak bu iletkenlerden I_2 akımlarının geçmesine neden olurlar.

$$I_2 = E_2 / Z_2 \quad (2.3)$$

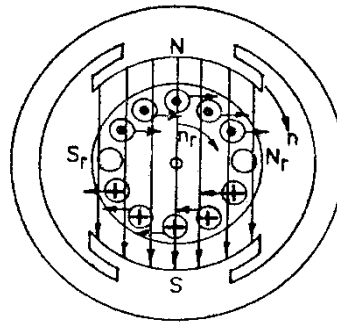
Manyetik alan içinde bulunan rotor çubuklarından indüksiyon akımı geçince, Biot-Sawart yasasına göre her bir iletkene manyetik kuvvetler etki eder. İletken üzerindeki manyetik indüksiyon esas alanı bozar ve zayıf alanın olduğu tarafa doğru F kuvveti ile itilirler. Bu durum Şekil 2.3’ de gösterilmiştir (Yetgin, 1998).



Şekil 2.3. Esas alanı bozan iletkenin dışarı itilmesi.

Bu F kuvveti rotorda bir M_M döndürme momenti meydana getirir. Oluşan bu döndürme momenti yük momentinden büyükse rotor hızlanabilir.

$$F = BIl \quad M_M = \frac{FD}{2} \quad (2.4)$$



Şekil 2.4. N-S daimi mıknatıs kutupları ile kısa devreli rotorun döndürülüşü.

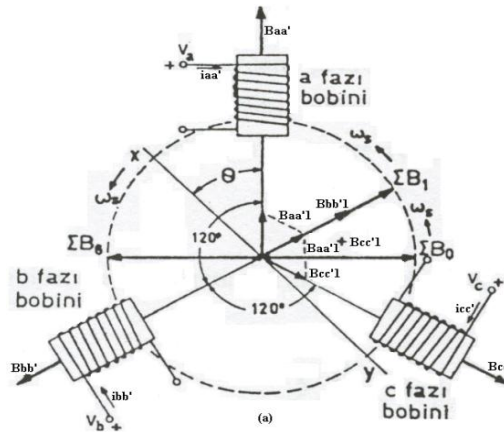
Şekil 2.4’ de görüldüğü gibi, N kutbunun altındaki çubuklarda akım yönü kağıt düzleminden bize doğru ($\oplus$), S kutbunun altındaki çubuklarda ise akımın yönü bizden kağıt düzlemine doğrudur ($\otimes$). Çubukların manyetik kuvvet çizgilerini kesme yönüne göre, sağ el kaidesi ile çubuklardan geçen akımların yönleri bulunur. Manyetik alan içinde bulunan bir iletkenin akım geçtiğinde iletkenin itiliş yönü, sol el kaidesi ile bulunur. Şekil 2.4’ de çubukların itiliş yönleri işaretlenmiştir. N kutbunun altındaki çubuklarda sağ tarafa, S kutbunun

altındaki çubuklarda sol tarafa doğru itilirler. Meydana gelen kuvvet çiftinin etkisi ile rotor saat ibresi yönünde dönmeye başlar (Saçkan, 1996) .

Rotorda indüklenen akımlar kendilerini oluşturan nedene, burada n_2 hız farkına karşı geldiklerinden, rotor bu hız farkını azaltacak yönde yani döner alan yönünde döner. Rotor dönmeye başlayınca, N-S kutupları manyetik akısının rotor çubuklarını kesme hızı azalacağı için rotor çubuklarında indüklenen emk' lar azalır. Dolayısıyla, çubuklardan geçen indüksiyon akımları da azalmış olur. Rotoru döndüren döndürme momenti de azalır. Rotor devir sayısı senkron devir sayısına ulaşırsa $n_r = n_s$ $n_2 = n_s - n_s = 0 \rightarrow U_2 = 0 \rightarrow I_2 = 0 \rightarrow F = 0 \rightarrow M_M = 0$ olur. Moment azaldığı için rotor devir sayısı azalır ve rotor hızı geri kalır. Rotor çubukları yeniden manyetik kuvvet çizgileri tarafından kesilmeye başlar ve çubuklarda emk' lar indüklenir böylece indüksiyon akımları tekrar geçmeye başlar. Rotor manyetik alan meydana getirir ve dönen N-S kutuplarının peşinden sürüklenerek dönmeye devam eder. Hiçbir zaman rotorun devir sayısı senkron devir sayısına eşit olmaz.

2.2.1. Döner alanın analitik ifadesi

Üç faz sargısı aralarında 120° şer derece faz farkı olacak şekilde toplu olarak üç bobin biçiminde Şekil 2.5' de gösterilmiştir (Özer, 2002).



Şekil 2.5. Aralarında 120° faz farkı olan eksenler üzerinde üç bobin ile gösterilen a,b,c fazı.

Bu üç bobin üç fazlı alternatif akımla beslendiğinde bu üç bobinin her birisi yalnız başına kendi eksenini üzerinde alternatif alanlar meydana getirir. Buna karşılık her üç bobinin toplam alanı ise, genliği sabit olan ve uzayda doğrultusunu değiştirerek senkron hızla dönen bir alandır. Çizelge 2.1’ de üç faza ait akımların, $t_0, t_1, t_2, \dots, t_6$ anlarında almış oldukları değerler gösterilmiştir (Özer, 2002).

Çizelge 2.1. Bobin akımlarının t anlarında almış oldukları akım değerleri.

t	I_{aa}'	I_{bb}'	I_{cc}'	θ
t_0	0	$-\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/2$	0
t_1	1/2	-1	1/2	$\pi/6$
t_2	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/2$	0	$\pi/3$
t_3	1	-1/2	-1/2	$\pi/2$
t_4	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	$2\pi/3$
t_5	1/2	1/2	-1	$5\pi/6$
t_6	0	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/2$	π

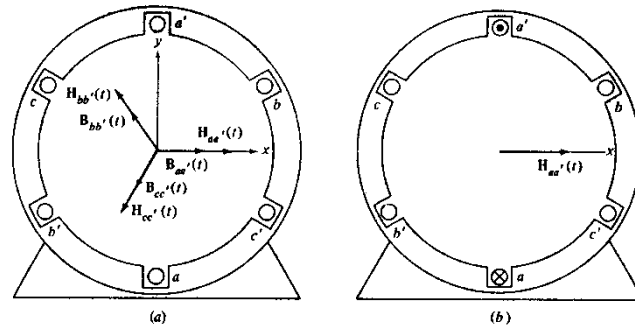
Pozitif değerde olan I_{aa}' , I_{bb}' , I_{cc}' akımlarının meydana getirdiği alanlar Şekil 2.5’ de gösterildiği gibi, B_{aa}' , B_{bb}' , B_{cc}' doğrultu ve yönlerinde olur.

Her üç bobindeki akımları aşağıdaki gibi ifade edebiliriz (Chapman, 1991).

$$\begin{aligned}
 I_{aa}'(t) &= I_M \sin \omega t \quad A \\
 I_{bb}'(t) &= I_M \sin(\omega t - 120^\circ) \quad A \\
 I_{cc}'(t) &= I_M \sin(\omega t - 240^\circ) \quad A
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Bu akımların oluşturduğu manyetik alan şiddeti değerleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned}
 H_{aa}'(t) &= H_M \sin \omega t \angle 0^\circ \quad \text{Asarım} / m \\
 H_{bb}'(t) &= H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad \text{Asarım} / m \\
 H_{cc}'(t) &= H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad \text{Asarım} / m
 \end{aligned} \tag{2.6}$$



Şekil 2.6. a) Üç fazlı asenkron motorun sargılarındaki manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu değerleri b) aa' sargısındaki manyetik alan şiddeti vektörü.

Sonuçta her fazın oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu değerleri;

$$\begin{aligned} B_{aa}' &= B_M \sin \omega t \angle 0^\circ \quad T \\ B_{bb}' &= B_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad T \\ B_{cc}' &= B_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad T \end{aligned} \quad (2.7)$$

şeklinde olacaktır.

$\omega t = 0^\circ$ anı için statordaki net manyetik akı yoğunluğunun hesabı için, her fazın oluşturduğu akı yoğunluğu değerlerini elde etmeliyiz.

$\omega t = 0^\circ$ anında aa' sargısında manyetik akı yoğunluğu sıfır değerindedir. $B_{aa} = 0$;

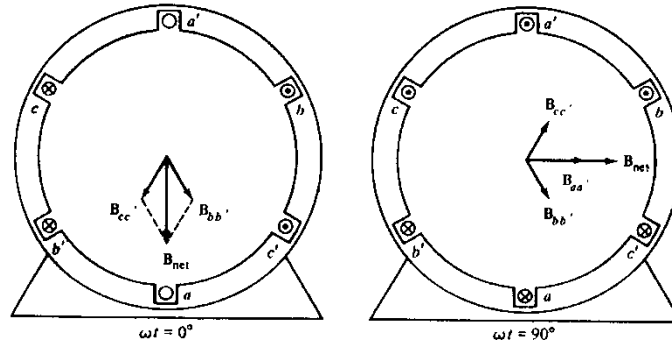
$\omega t = 0^\circ$ anında bb' sargısında manyetik akı yoğunluğu $B_{bb}' = B_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad T$;

$\omega t = 0^\circ$ anında cc' sargısında manyetik akı yoğunluğu $B_{cc}' = B_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad T$ değerinde olur.

Toplam net manyetik akı yoğunluğu ise;

$$B_{net} = B_{aa}' + B_{bb}' + B_{cc}' = 0 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} B_M \right) \angle 120^\circ + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} B_M \right) \angle 240^\circ \quad (2.8)$$

$B_{net} = 1.5 B_M \angle -90^\circ$ olarak elde edilir. Net manyetik akı yoğunluğu vektörel olarak Şekil 2.7' de gösterilmiştir (Chapman, 1991).



Şekil 2.7. $\omega t=0^0$ ve $\omega t=90^0$ anı için statordaki manyetik akı yoğunluğu vektörleri için statordaki net manyetik akı vektörünün konumu.

$\omega t=90^0$ anı için inceleme yapmada oluşacak akımlar ise şöyledir.

$$\begin{aligned} I_{aa}' &= I_M \sin 90^0 \\ I_{bb}' &= I_M \sin(-30^0) \\ I_{cc}' &= I_M \sin(-150^0) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$\omega t=90^0$ anı için statordaki net manyetik akı yoğunluğunun hesabı için, her fazın oluşturduğu akı yoğunluğu değerlerini $\omega t=0^0$ ' da olduğu gibi elde etmeliyiz.

$\omega t=90^0$ anında aa' sargısında manyetik akı yoğunluğu sıfır değerindedir. $B_{aa}' = B_M \angle 0^0$;

$\omega t=90^0$ anında bb' sargısında manyetik akı yoğunluğu $B_{bb}' = -0.5B_M \angle 120^0$;

$\omega t=90^0$ anında cc' sargısında manyetik akı yoğunluğu $B_{cc}' = -0.5B_M \angle 240^0$;

Toplam net manyetik akı yoğunluğu ise;

$$B_{net} = B_M \angle 0^0 + (-0.5B_M \angle 120^0) + (-0.5B_M \angle 240^0)$$

$$B_{net} = 1.5B_M \angle 0^0 \text{ olarak bulunur.}$$

Toplam manyetik akı yoğunluğunun genel ifadesi;

$$B_{net} = B_{aa}'(t) + B_{bb}'(t) + B_{cc}'(t) \quad (2.10)$$

$$= B_M \sin \omega t \angle 0^0 + B_M \sin(\omega t - 120^0) \angle 120^0 + B_M \sin(\omega t - 240^0) \angle 240^0 \quad T$$

$$B_{net}(t) = B_M \sin(\omega t \hat{x}) - [0.5B_M \sin(\omega t - 120^\circ)] \hat{x} + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_M \sin(\omega t - 120^\circ) \right] \hat{y} \\ - [0.5B_M \sin(\omega t - 240^\circ)] \hat{x} + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_M \sin(\omega t - 240^\circ) \right] \hat{y}$$

olarak elde edilir.

Bu ifadede ki x ve y bileşenleri açılıp toplandığı zaman;

$B_{net}(t) = (1.5B_M \sin \omega t) \hat{x} - (1.5B_M \cos \omega t) \hat{y}$ olarak toplam manyetik akı yoğunluğu değeri bulunur. İki fazın yeri değiştirildiği zaman toplam manyetik akı yoğunluğu değerinin genel ifadesi $B_{net}(t) = (1.5B_M \sin \omega t) \hat{x} + (1.5B_M \sin \omega t) \hat{y}$ olarak bulunur.

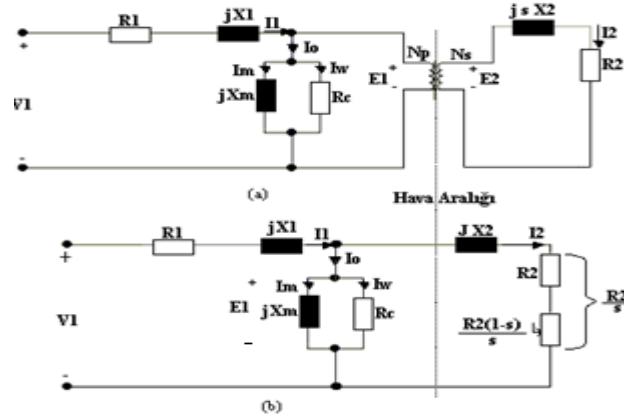
Bu iki ifade incelendiği zaman faz sargılarının yerlerinin değişmesi yani motorun dönüş yönünün değişmesi toplam manyetik akı yoğunluğu ve genlik değeri üzerinde herhangi bir değişiklik meydana getirmez.

2.3. Döner Makinalarda Eşdeğer Devre

Döner makinaların, güç, döndürme momenti, kalkınma akımı, güç katsayısı ve çeşitli yüklerde verim hesapları için motorun eşdeğer elektrik devresini bilmek çok büyük kolaylıklar sağlar. Aynı makina için birçok eşdeğer devre önerilebilir. Bir eşdeğer devrenin olabildiğince basit ve uygun olması, hesapların kolay bir şekilde yapılabilmesine olanak sağlar. Uygunluk ancak deney ölçümleri ve uygulama sonuçları ile kanıtlanabilir. Bir eşdeğer devre gerçek bir makinanın yerini hiçbir zaman alamaz, ancak davranışını belli sınırlar içinde temsil edebilir.

2.3.1. Asenkron motorun eşdeğer devresi

Bir asenkron motorun çalışabilmesi için stator sargısının rotor sargısında gerilimler indüklemesi ve bu sargılardan akım geçmesi gerekir. Transformatörün çalışabilmesi ise birincil sargının ikincil sargıda gerilim indüklemesine ve bu sargıdan akım geçmesine dayanır. Çalışma ilkesindeki bu benzerlik nedeniyle asenkron makinanın eşdeğer devresi de transformatörün eşdeğer devresine çok benzer. Dengeli üç fazlı gerilimin uygulandığı üç fazlı bir motor için bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.8’ de gösterilmiştir (Sarıyıldız, 2001).



Şekil 2.8. Üç fazlı asenkron motorun bir faz eşdeğer devresi a) Transformatör devresi b) Primere indirgenmiş tam eşdeğer devresi.

Statora V_1 geriliminin uygulanması ile mıknatıslanma reaktansı (X_m), primer ve sekonder devreyi bağlayan Φ_m akısını oluşturur ve I_m mıknatıslanma akımının geçmesini sağlar. Zamana göre değişen bu hava aralığındaki akı, rotorda I_2 akımını oluşturacak bir emk indükler. Toplam I_1 stator akımı I_2 rotor akımı ile boşa çalışma akımı olan I_0 ' ın fazör toplamıdır.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (2.11)$$

Asenkron motorlarda boşa çalışma akımı, hava aralığı boyuna bağlı olarak tam yük akımının % 20-% 60' ı kadardır.

Rotor büyüklüklerinin bulunması stator büyüklüklerine göre daha zordur. Çünkü rotor döner alana göre n_2 değişken hızı ile döner. Bunun sonucunda birçok büyüklük kaymanın fonksiyonu olur. Motor hızının etkisi eşdeğer devredeki $\frac{R_2}{s}$ parametresi ile belirlenir. Rotor dururken $s=1$ olduğu için bu gerilim de f_1 frekansında olur. Rotor dururken indüklenen gerilimi ve durmadaki diğer büyüklükleri "o" alt indisi ile gösterirsek, rotorda indüklenen gerilim ve rotor frekansı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$E_2 = 4.44 f_1 N_2 \Phi k_{w2} \quad (2.12)$$

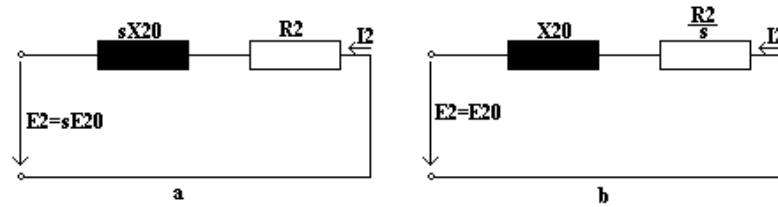
$$E_2 = sE_{20} \quad (2.13)$$

$n_r = n_s$ iken $s=0$ ve $E_2=0$

$n_r=0$ iken $s=1$ ve $E_2=E_{20}$

$$f_2 = s f_1 \quad (2.14)$$

Motorun herhangi bir kayma anındaki ve motorun durma anındaki rotor eşdeğer devresi ise Şekil 2.9' da verilmiştir (Çetin, 1993).



Şekil 2.9. Rotor eşdeğer devresi a) Herhangi bir s kaymasında b) Durma anında.

O halde hem rotorda indüklenen gerilim hem de rotor frekansı kayma ile orantılıdır. Normal işletmede özellikle nominal yüklerde kayma küçük ve yüzde birkaç değerinde olduğundan, rotorda indüklenen gerilim birkaç volt ve frekans birkaç hertz' tir (Çetin, 1993). Bu yüzden kısa devre çubukları rotor saç paketinden yalıtılmaz. Rotorda yalıtkan malzeme kullanılmadığı için sincap kafesli asenkron motorlarda birim hacme düşen güç, bilezikli asenkron motorlardakinden daha fazladır.

Kayma $s=0$ iken, motor mil hızı n_r , döner alanın hızı olan n_s ' e eşit olur. Hava aralığındaki döner alan rotor iletkenlerini kesemez ve böylece rotor iletkenlerinde indüklenen elektromotor kuvvet ve rotor akımı sıfır olur.

Şekil 2.8' deki eşdeğer devreden de görüleceği gibi $s = 0$ iken $I_2 = 0$ olur (sekonder açık devre).

Genel olarak I_2 ;

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{E}_1}{R_2/s + jX_2} \quad (2.15)$$

olarak hesaplanabilir. İndirgenmiş rotor akımının genliği,

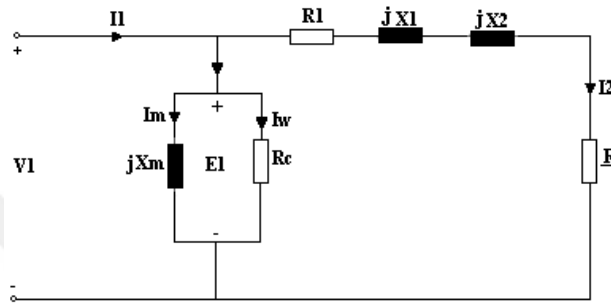
$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}} \quad (2.16)$$

formülüyle hesaplanabilir.

Şekil 2.8' deki eşdeğer devreden stator sargılarında indüklenen E_1 gerilimi stator gerilimi cinsinden yazılacak olursa;

$$\vec{E}_1 = \vec{V}_1 - \vec{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (2.17)$$

Pratikte $(R_1 + jX_1)$ ' deki gerilim düşümü oldukça küçüktür ve $E_1 = V_1$ alınabilir. Böylece Şekil 2.8' deki devre Şekil 2.10' daki devreye indirgenebilir.



Şekil 2.10. Üç fazlı asenkron motorun bir faz yaklaşık eşdeğer devresi.

Şekil 2.10' a göre motora uygulanan V_1 gerilimi, boşa çalışma bileşenlerinin üzerinde düşer. Mıknatıslanma ve demir kayıpları akımı;

$$I_m \cong \frac{V_1}{jX_m} \quad (2.18)$$

$$I_w \cong \frac{V_1}{R_c} \quad (2.19)$$

olur. Stator akımı I_1 ;

$$I_1 = \frac{V_1}{(((R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2)) // (jX_m // R_c))} \quad (2.20)$$

Bu durumda rotor akımı I_2 ;

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_1}{(R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2)} \quad (2.21)$$

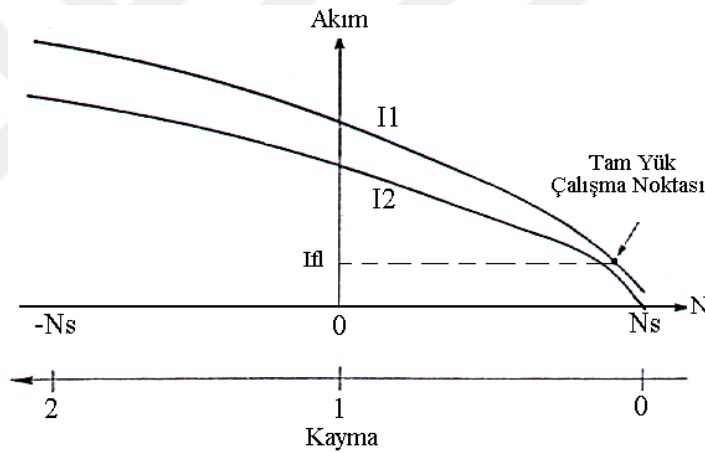
olarak hesaplanır.

Akımın genliği ise,

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2/s)^2 + j(X_1 + X_2)^2}} \quad (2.22)$$

olur. Herhangi bir sabit kaymada, (2.16) ve (2.22) eşitliklerindeki I_2 ' lerin arasındaki fark tam yük akımında bile küçüktür. I_1 ve I_2 ' nin sabit V_1 geriliminde kaymayla değişimi, Şekil 2.11' de gösterilmiştir.

$I_{f,1}$ noktası, tipik tam yük nominal hızda çalışma noktasını göstermektedir. Hızın azalmasıyla akım değerleri artmaktadır. Motorun durması durumunda akım, nominal akımın üç hatta daha fazla katına ulaşır (Sarıyıldız, 2001).



Şekil 2.11. Stator ve rotor akımı.

2.3.2. Asenkron motorun boşa çalışması

Bu deneyde asenkron motor anma gerilim değeriyle yüksüz olarak çalıştırılır. Motorun bağlantısı üçgen veya yıldız olabilir. Motor boşa çalışırken, şebekeden çekilen hat akımı, hat gerilimi ve şebekeden çekilen toplam güç ölçülür.

Normal frekanslı, şebeke gerilimi altında çalışan asenkron motorun şebekeden çektiği güç, stator demir kayıpları ile sürtünme ve rüzgâr (ventilasyon) kayıplarının toplamını verir. Boşa çalışan motorun devir sayısı döner alanın devrine yakın (kayma çok küçük) olduğundan, rotorun demir ve bakır kayıpları ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Normal şebeke gerilimi altında boşa çalışan asenkron motorun stator sargılarından geçen akımlar bu sargılarda ($I_o^2 R_l$) watt bakır kayıplarına neden olur. Bu kayıplar bulunduktan sonra motorun şebekeden çektiği

güçten çıkarılırsa, geriye kalan güç stator demir kayıpları ile sürtünme ve rüzgâr kayıplarının toplamını verir.

Asenkron motor boşta çalışırken rotor hızı senkron hıza çok yakın olduğundan motorun kayması çok küçük olup sıfıra yakındır. Kaymanın çok küçük olması nedeniyle $R_2(I-s)/s$ değeri empedans değerine eşittir ve R_2+X_2 ve değerinden çok büyüktür. Boş çalışmada rotor devresinden geçen akım, R_2+X_2 değerinin çok büyük olması nedeniyle oldukça küçüktür. Dolayısıyla boştaki rotor bakır kayıpları ihmal edilir. Stator bakır kayıpları ise $P_{scI}=3I_{nl}^2R_I$ ifadesi ile bulunur (Çolak, 2008).

Şebekeden çekilen toplam güç ise stator bakır kayıpları, demir kayıpları ve mekanik (sürtünme ve rüzgâr) kayıplarıdır. Boştaki giriş gücünden stator bakır kayıpları çıkartılırsa toplam mekanik ve demir kayıpları bulunur. Boşta çalışma deneyinden ölçülen değerler ile eşdeğer devre parametreleri hesaplanırken kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$P_{in,nl}=\frac{P_0}{3} \text{ (Faz başına güç)} \quad (2.23)$$

$$V_{pnl}=\frac{V_0}{\sqrt{3}} \text{ (Faz başına gerilim)} \quad (2.24)$$

$$R_c=\frac{V_{pnl}^2}{P_{pnl}} \text{ (Demir direnci)} \quad (2.25)$$

$$S_{pnl}=V_{pnl} \times I_{pnl} \text{ (Faz başına görünür güç)} \quad (2.26)$$

$$pf=\cos\theta=\frac{P_{in,nl}}{S_{pnl}} \text{ (Güç faktörü)} \quad (2.27)$$

$$I_m=I_{pnl} \times \sin\theta \text{ (Mıknatıslanma akımı)} \quad (2.28)$$

$$X_m=\frac{V_{pnl}}{I_m} \text{ (Mıknatıslanma reaktansı)} \quad (2.29)$$

Asenkron motorun stator-rotor arasındaki hava aralığı relüktansı büyük olduğundan, motor boşta yüksek akım çeker. Dolayısıyla X_m değeri kendisine paralel olan R_c değerinden çok küçüktür. Bundan dolayı asenkron motorun boştaki güç faktörü yaklaşık olarak 0.10 değerinde olup boşta çekilen akım stator sargılarında endüklenen gerilimden yaklaşık olarak 90° geridedir. Buna göre, boş çalışmadan elde edilen empedans yaklaşık olarak boş çalışma reaktansına eşittir (Çolak, 2008).

2.3.3. Asenkron motorun kısa devre çalışması

Asenkron motor anma sıcaklığına eriştikten sonra deney düzeneği kurulup, deney bağlantısı yapılır. Motorun rotoru özel bir mekanizma ile sabitleştirilerek dönmemesi sağlanır. Daha sonra, ayarlı alternatif güç kaynağından uygulanan gerilim yavaş yavaş artırılır. Statordan geçen akım dikkatlice ampermetreden okunarak, akım değeri anma değerine ulaşınca ölçü aletlerinden gerilim, akım ve güç değerleri okunarak kaydedilir. Bu deney esnasında dikkat edilecek en önemli hususlardan birisi, motora başlangıçta sıfır gerilim uygulayarak başlamaktır. Rotor kilitli durumda olduğundan, başlangıçta uygulanacak yüksek gerilim stator sargılarından çok büyük akım geçmesine neden olur. Diğer taraftan, rotor kalkınmaya başlarken kayma $s=1$ olduğundan, rotor frekansı stator frekansına eşit olup, etkin rotor direnci çok küçüktür. Asenkron motorun rotor etkin direncinin frekansa bağlı olarak değiştiği göz önünde bulundurularak, deneyi normal frekansından daha düşük frekans değerinde gerçekleştirmek gerekir. Bunun için öngörülen frekans değeri normal frekans değerinin % 25' i veya daha az bir değerdir. Rotor direnci değişken olan motorlar için problem yaşanabilir. Bundan dolayı düşük frekans değerinde yapılan kilitli rotor deneyinde hassas ölçüm gerekir. Kilitli rotor deneyinden hesaplanan reaktans değerleri f_s/f_{test} oranıyla çarpılarak normal çalışma frekans değerindeki reaktanslar bulunur (Çolak, 2008).

Motorun bir faz stator sargısından geçen akım değeri, her üç fazdan okunan akım değerlerinin ortalaması alınarak bulunur. Kısa devre deneyinde, motor bir trafo gibi çalıştığından, kayma $s=1$ olup, stator ve rotorda endüklenen gerilimlerin frekansları birbirlerine eşittirler. Kaymanın $s=1$ olması nedeniyle motorun bir faz eşdeğer devresindeki $R_2 (1-s)/s$ değeri sıfır olur. Buna bağlı olarak da, mekanik kayıpları sıfır olur. Dolayısıyla, rotor devresinin empedansı sadece $R_2 + X_2$ değerine eşit olur. Asenkron motorun uyartım devre empedansı $R_c//X_m$ ile rotor empedansı karşılaştırıldığında, $R_c//X_m \gg R_2 + X_2$ olur. Bundan dolayı uyartım devresi ihmal edilir. Geriye sadece stator ve rotor devre empedansları kalır (Çolak, 2008).

Kısa devre deneyinden elde edilen değerler ile R_k , Z_k , X_k değerleri hesap edilir.

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \text{ (Motor eşdeğer devre faz empedansı)} \quad (2.30)$$

$$R_k = \frac{P_k}{3 \times I_k^2} \text{ (Motor eşdeğer devre faz direnci)} \quad (2.31)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \text{ (Motor eşdeğer devre faz reaktansı)} \quad (2.32)$$

$$R_2 = R_k - R_l \text{ (Rotor direnci)} \quad (2.33)$$

$$X_l = X_2 = \frac{X_k}{2} \text{ (Stator ve rotor reaktansı)} \quad (2.34)$$

2.3.4. Asenkron motorun yüklü çalışması

Asenkron motorun milini, bir fren aracı veya bir iş makinası yardımıyla yüklediğimizde, motorun çok küçük olan boşta çalışma akımı bu mekanik yüke karşılık gelen döndürme momentini karşılayamaz. Bütün tahrik makinalarında olduğu gibi, yük artması sonucunda motor kendisinden istenen enerji artışını önce dönen kısımların kinetik enerjisinden karşılayacak ve böylece rotorun hızı düşecek, kayma büyüyecektir. Bu durumda döner alanın rotor sargılarının kesme hızı artar, rotorda daha büyük emk indüklenir, rotor akımı büyür (Altıntaş).

Verim (η), moment (M), kayma (s), devrilme kayması (s_d), hava aralığı (P_{AG}), nominal moment (M_N) değerlerini hesaplamak için kullanılması gereken formüller aşağıda verilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} \text{ (Verim)} \quad (2.35)$$

$$P_g = \sqrt{3} \times V_l \times I_l \times \cos\theta \text{ (Giriş gücü)} \quad (2.36)$$

$$M = \frac{P_{\text{çıkış}}}{2 \times \pi \times n} \times 60 \text{ (Moment)} \quad (2.37)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \text{ (Kayma)} \quad (2.38)$$

$$s_d = \frac{R_r'}{X_k} \text{ (Devrilme kayması)} \quad (2.39)$$

$$P_{AG} = 3 \times I_r'^2 \times \frac{R_r'}{s} \text{ (Hava aralığı gücü)} \quad (2.40)$$

$$M = \frac{3}{2} \times \frac{p}{\pi \times f} \times \frac{R_2}{s} \times \frac{V_l^2}{(R_{l+\frac{R_2}{s}})^2 + (X_l + X_2)^2} \text{ (Genel moment formülü)} \quad (2.41)$$

$$M_N = \frac{3}{2} \times \frac{p}{\pi \times f} \times \frac{R_2}{s} \times \frac{V_l^2}{(R_{l+\frac{R_2}{s_N}})^2 + (X_l + X_2)^2} \text{ (Nominal Moment)} \quad (2.42)$$

$$R_l = \delta_{co} \times \frac{l_c \times w_l}{A \times a_l} \text{ (Stator direnci)} \quad (2.43)$$

3. YÜKSEK VERİMLİ MOTORLARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Motorlarda yapılacak ufak bir verim artışı bile büyük miktarlarda enerji tasarrufuna sebep olur.

3.1. Yüksek Verimli Motorların Avantajları

Yüksek verimli motorların avantajları aşağıda verilmiştir (Pyrhönen vd.; Efficient Motor Use).

- Düşük enerji tüketimi sağlanır.
- Yüksek güç faktörüne sahiptir.
- Rulman ömürleri yüksektir.
- Bu motorlar standart verimli motorlara nazaran % 35 daha fazla çelik, % 20 daha fazla bakır ve % 15 daha fazla alüminyum içerir. İlave malzemeler ile yüksek verim, yüksek soğutma alanı ve yüksek sıcaklık zaman sabiti sağlanır. Ayrıca daha düşük sargı sıcaklıkları ve daha uzun ömür elde edilir.
- Düşük manyetik doyumu ve küçük soğutma fanı ile daha düşük ses seviyesi sağlanır.
- Motor akımları düşüktür.
- Daha az bakıma ihtiyaç duyarlar.
- Düşük kayıplar ile birlikte düşük ısı kayıpları sağlanır.
- Bakım ihtiyaçlarının daha az olması sebebiyle daha uzun kullanım süresi sağlanır.
- Kompakt boyut sayesinde kullanım kolaylığı sağlanır.
- Kaliteli alüminyum malzeme kullanılarak rotorun düşük dirence sahip olması sağlanır.
- Düşük sıcaklıklar nedeniyle, motor taşıyıcılarının ve sargıların ömrü standart verimli motorlara göre uzundur.

3.2. Yüksek Verimli Motorların Maliyeti

Juha ve arkadaşları standart verimli motorlar ile yüksek verimli motorları karşılaştırmışlar ve yüksek verimli motorların; motor yapısındaki gelişmeler, kalite ve malzeme miktarları sebebiyle daha pahalı olduklarını vurgulamışlardır. Yüksek verimli motorların daha pahalı olmalarını aşağıda verilen nedenlerle açıklamışlardır:

- Sargılardaki daha fazla bakır malzeme kullanılması.
- Motorun stator ve rotorunda daha kaliteli malzemenin kullanılması.
- Çelik miktarı ve kalitesinin daha iyi olması.
- Yüksek kalitede alüminyum kullanılarak yapılan rotor imalatı.

3.3. Mikro ve Makro Ekonomik Faydalar

Widell (2007) çalışmasında asenkron motorun mikro ve makro açıdan faydalarını sıralamıştır.

- Daha iyi süreç kontrolü.
- Geliştirilmiş ürün kalitesi.
- Artan rekabet.
- Fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması.



4. ASENKRON MOTORUN VERİMİNİ ARTIRMAK İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

Asenkron motorun verimini artırmak için birçok yöntem mevcut olup bu yöntemler aşağıda verilmiştir (Widell, 2007; Corino vd., 2008; Cassio ve Ricardo, 2008).

- Aktif madde miktarını artırmak. (Sargılarda % 20-60 daha fazla bakır)
- Daha uzun paket boyu kullanmak.
- Çift katmanlı sargılar kullanmak. (Sargı katsayılarını değiştirir)
- Yüksek performanslı laminasyon malzemeleri kullanmak. (% 35 daha fazla çelik)
- Rotor yüzeyinde daha kaliteli alüminyum malzeme kullanmak.
- Fan düzeneği verimini geliştirmek.
- Daha kaliteli ve daha düşük kayıplı elektriksel çelik kullanmak.
- Rotor tasarımını iyileştirerek daha verimli hale getirmek.
- Stator ve rotor arasındaki hava aralığını optimize etmek.

4.1. Malzeme Çeşidinin Etkisi

Kirtley ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada yüksek verimli CER motorları için alüminyum rotor ile bakır rotoru kıyaslamışlardır. Toplam stator ve rotor kayıpları irdelenmiştir. Buna göre nominal yükte kayıp miktarı alüminyum rotor için toplam kaybın % 46' sı, bakır rotor için toplam kaybın % 26' sı olduğu görülmüştür. Bakır rotor kullanılarak yükte rotor kaybında önemli bir azalma olduğu görülmüştür. Buna göre yükteki kaybın alüminyum rotorda % 37, bakır rotorda % 17 olduğu görülmüştür. Bakır rotor kullanılması ile toplam motor kaybında önemli bir düşüş görülmüştür. James ve arkadaşları stator yüzeysel alanı başına motor kayıp oranını alüminyum rotor ve bakır rotoru karşılaştırarak incelemişler; alüminyum için yaklaşık % 25, bakır için ise yaklaşık % 32 oranında kayıp yüzde oranları elde etmişlerdir.

William ve Finley çalışmalarında sincap kafesli asenkron motorun rotor yapısında 4 farklı malzeme kullanarak motorun performans değerlendirmesini yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar Çizelge 3.1' de verilmiştir. Tabloda verilen numaralardan daha küçük olanlar daha avantajlı olanı ifade etmektedir.

- Alüminyum döküm yapısı (ADC).
- Fabrikasyon alüminyum çubuklar (ALBar).
- Bakır çubuklu rotorlar (CuDC).
- Fabrikasyon bakır çubuklar (CuBar).

Çizelge 4.1. Farklı rotor yapıları için performans değerlendirmesi.

Parametreler	ADC	ALBar	CuDC	CuBar
Fiyat	1	2	2	4
Verim	2	3	1	1
Tasarım	2	4	1	2
Boyut	2	1	2	1
Malzeme	2	1	3	1
Yüksek atalet momenti	2	2	1	1
Onarılabilirlik	4	3	4	1

Çizelge 4.1 yorumlandığında fiyat yönünden alüminyum döküm yapısının daha avantajlı olduğu görülmektedir. Verim açısından bakır çubuklu rotorlar ve fabrikasyon bakır çubukların daha iyi olduğu, tasarım yönünden bakır çubuklu rotorların daha iyi olduğu görülmüştür. Boyut, malzeme, yüksek atalet momenti ve onarılabilirlik kavramları incelendiğinde fabrikasyon bakır çubukların daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir (William ve Finley, 2000).

Yanawati ve arkadaşları (2012) 0.35 mm ve 0.50 mm sac kalınlığına sahip çelik sacların motor performansına etkilerini analiz etmişlerdir. Analizlere göre; 0.35 mm’ de verim % 6 oranında artmış, toplam kayıp miktarı % 18.80 azalmış ve eddy akım kayıplarında ise % 19.52 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Manyetik yapıda daha ince sac malzeme kullanılması ile nüve kayıplarının azaldığını buna bağlı olarak verimin arttığını ifade etmişlerdir.

4.2. Kayıpların Etkisi

Van ve arkadaşları (2009) 15 kW, 11 kW, 7.5 kW ve 3 kW güçlerindeki standart ve premium plus motorları 4 saat boyunca yapılan deneylere göre karşılaştırmışlar ve her bir motor için ölçülen en yüksek termal denge sıcaklıklarını tespit etmişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre tüm güç değerlerinde standart verimli motorların premium plus motorlara oranla daha yüksek termal sıcaklık değerlerine sahip olduklarını göstermişlerdir. Ayrıca her bir motor için sıcaklık azalmalarını yüzde olarak tespit etmişlerdir. Buna göre sıcaklık azalmaları 15 kW için % 9.42, 11 kW için % 27.20, 7.5 kW için % 8.50 ve 3 kW için % 19.58 olarak tespit etmişlerdir. Al ve arkadaşları nominal yükte çalışan standart verimli motorun toplam kayıp oranlarını beş değişik kayıp çeşidi (Nüve kayıpları, Sürtünme ve vantilasyon kayıpları, Stator bakır kayıpları, Rotor bakır kayıpları, İlave yük kayıpları) için irdelenmişlerdir. Al ve arkadaşları 3 kW’ lık standart verimli ve yüksek verimli motorları karşılaştırdıklarında nüve kayıplarının

standart verimli motorda daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra sürtünme ventilasyon kayıplarının, yüksek verimli motorda daha yüksek çıktığını, stator bakır kayıplarının, rotor bakır kayıplarının ve ilave yük kayıplarının standart verimli motorda daha yüksek çıktığını göstermişlerdir.

4.3.Sargıların Durumu ve Türü

Hadziselimovic ve arkadaşları (2011) çalışmalarında sargı türünün asenkron motorun verimine etkisini araştırmışlardır. Asenkron motorda, minimum sargı kütlesi kullanarak en iyi verimi sağlayan stator sargı türünü seçmek için analizler yapmışlardır. Analizler sonucu 3 tip sargı türü bulunmuştur.

- Konsantrik tek katman sargı.
- Konsantrik çift katman sargı.
- Kesirli konsantrik sargı.

Çalışmalarında asenkron motorların bütün elektromanyetik ve mekanik karakterleri 3 çeşit sargı türü ile EmLook (Elektrik Motor Bakımı) kullanılarak hesaplanmıştır. EmLook asenkron motorlardaki elektrik ve manyetik alanların analitik ve nümerik kombinasyonlarının hesaplanma prosedürüdür.

Çizelge 4.2’ de nominal gerilimde boşa çalışma deney sonuçları gösterilmiştir. Yüksek mıknatıslanma akımı (I_m) sebebiyle çift katmanlı sargı joule güç kayıpları artar. Yüksek mıknatıslanma akımı sebebiyle çift tabakalı sargının sargı faktörü düşüktür. Demir kayıpları (P_o) üç sargı türünde de benzerdir. Sürtünme ve ventilasyon güç kayıplarının (P_{sv}) hesaplanması işlemi prototip deneysel ölçümler ile yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Sargı türlerinde kayıpların ve diğer parametrelerin gösterimi.

Sargı türü	Sargı adımı	Mıknatıslanma akımı (A)	Bakır kayıpları (W)	Demir kayıpları (W)	Sürtünme ve ventilasyon kayıpları (W)	Toplam kayıplar (W)	Güç faktörü
Konsantrik tek katmanlı	1-8,10,12	3.99	68.1	115.9	45	229	0.083
Konsantrik çift katmanlı	1-6,8,10	5.32	114	128.7	45	287.7	0.076
Kesirli konsantrik	1-7,9	4.02	66.5	116.2	45	227.7	0.082

Motorun nominal çalışma noktasından elde edilen sonuçlar ($V_N=400$ V, $P=4$ kW) Çizelge 4.3’ de gösterilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında değişik çeşitteki sargıların belirli değerlerde çok küçük değişimler gösterdiği görülmüştür. Çift tabakalı sargı kullanılması halinde, akım (I_s) ve devir sayısı (n) diğer iki sargı türüne nazaran daha iyidir. Diğer yandan güç faktörü, düşük sargı faktörü sebebiyle daha düşük seviyededir.

Çizelge 4.3. Sargı türlerinde çeşitli parametrelerin gösterimi.

Sargı türü	Sargı adımı	Aktif güç (W) (P_s)	Akım (A) (I_s)	Güç faktörü	Devir sayısı (d/d)	Kayma (% s)	Verim (% η)
Konsantrik tek katmanlı	1-8,10,12	4688.6	8.08	0.837	1433	4.47	85.3
Konsantrik çift katmanlı	1-6,8,10	4692.0	8.59	0.788	1442	3.87	85.3
Kesirli konsantrik	1-7,9	4676.6	8.07	0.836	1433	4.47	85.5

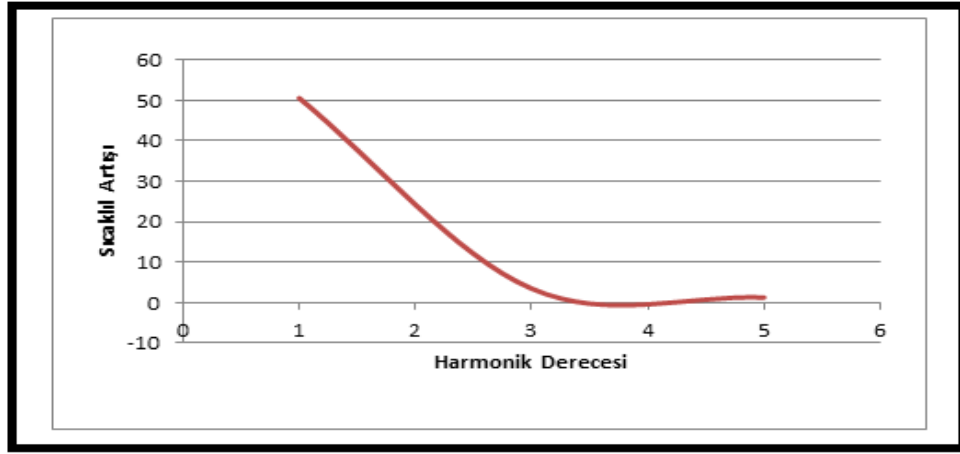
Kesirli konsantrik sargı türü kullanılması ile asenkron motor veriminin daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir.

4.4. Harmoniklerin Etkisi

Bu çalışmada Mirzamani ve Choobari (2005) asenkron motorlarda harmoniklerin motor performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Sıcaklığı ölçmek için kullanılan sensörler stator sargılarının yanında, stator oluklarının dibine konumlandırılmıştır. Motorun DC jeneratörü reostaya bağlanmıştır. Sinüzoidal dalga ile birlikte motor beslenmiş ve AC-DC-AC sürücü kullanılarak istenilen harmonik üretilmiştir. Sıcaklıklar 35 dakika sonra alındığında kararlı durumda kaldıkları görülmüştür. Aşağıdaki Çizelge 4.4’ de deney sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Harmonik derecesi-sıcaklık artışı ilişkisinin gösterimi.

Harmonik derecesi	1. Harmonik	3. Harmonik	5. Harmonik
Sıcaklık artışı °C	50.6	3.5	1.3



Şekil 4.1. Harmonik derecesi-sıcaklık eğrisi.

4.5. FEMM, GA, PSO Programları İle Yapılan Optimizasyonlar

Ranjith ve arkadaşları (2010) PSO ile bulanık mantık modeli tanımlayarak optimal mıknatıslanma akımını hesap ederek asenkron motorun kayıplarını azaltmışlar ve buna bağlı olarak verim değerini yükseltmişlerdir. Önerilen Fuzzy PSO yöntemini, Genetik Algoritma, Fuzzy Logic ve optimizasyon olmadan elde edilen değerler ile karşılaştırmışlardır. Değişik yükler için yapılan modellemelerde Fuzzy PSO yönteminin GA yöntemine göre % 7.76, Fuzzy Lojik yöntemine göre; 0.20 yükte 0.12, 0.40 yükte 0.12, 0.60 yükte 0.11, 0.80 yükte 0.11, nominal yükte ise 0.11 verim değerleri bulunmuştur. Optimizasyon olmadan elde edilen değerlere göre; 0.20 yükte 0.34, 0.40 yükte 0.34, 0.60 yükte 0.32, 0.80 yükte 0.30, nominal yükte ise 0.28 daha iyi verim elde edildiği göstermişlerdir.

Çunkaş (2010) çok amaçlı bulanık genetik algoritma ile asenkron motorların tasarımı konulu çalışma yapmıştır. Tek amaçlı genetik algoritma optimizasyonu ile çok amaçlı bulanık genetik algoritma kıyaslanmıştır. Bu algoritmaların verileri ve motor performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada 30 HP gücünde, 380 volt, 3 fazlı, 4 kutuplu ve 1500 d/d asenkron motor kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda çok amaçlı bulanık algoritma yönteminin çözüm bulmak ve optimum tasarım sağlamak için daha uygun yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Yadav ve arkadaşları (2012) PSO' nun geliştirilmiş versiyonu olan SMPSO yöntemini asenkron motorda parametre ölçümü ve verim hesabı için kullanmışlardır. Bu yöntem ile asenkron motorun parametreleri modifiye edilmiş ve elde edilen yeni parametreler yardımı ile verim hesabı yapılmıştır. Elde edilen sonuca göre verimin artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Verim hesabı yapıldığında PSO için verim % 85.50 olarak hesaplanırken, parametreler değiştirilerek verim hesabı yapıldığında yani SMPSO yöntemi kullanıldığında verimin artış gösterdiği ve % 85.90 olarak elde edildiği görülmüştür.

4.6. Hava Aralığının Etkisi

Dableh ve arkadaşları (1993) hava aralığının motor performansına etkilerini araştırmışlardır. Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7’ de bilgisayar simülasyonu ile elde edilen eşdeğer devre parametrelerinin karşılaştırılması ve aynı motorda kullanılan farklı hava aralığı uzunlukları için yapılan deneysel ölçümler verilmiştir. Mekanik sınırlamalar nedeniyle deneylerde 0.30 mm boyutundaki dar hava aralığında da, 0.66 mm boyutundaki geniş hava aralığında da yeterli performans elde edilememiştir. Model sonuçları da ölçülen sonuçlar kadar değişken görünüyorsa da, mıknatıslanma reaktansının uygun aralıkta olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.5. Hava aralığı-stator ve rotor sargı direnci değerleri ilişkisi.

Hava aralığı uzunluğu (mm)	R ₁ (ohm)		R ₂ (ohm)	
	Deney sonucu	Modelleme sonucu	Deney sonucu	Modelleme sonucu
0.305		3.94		3.09
0.368	2.73	3.94	3.57	3.09
0.406	2.73	3.94	3.98	3.08
0.508	2.73	3.94	3.65	3.08
0.572	2.73	3.94	3.57	3.08
0.660		3.94		3.08

Çizelge 4.5’ te hava aralığı-stator ve rotor sargı direnci değerleri ilişkisine ait, iki adet direnç değeri ve altı adet hava aralığı değeri baz alınarak elde edilen deney sonucu ve modelleme sonucu değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre R₁ direnç değerinde modelleme sonucu tüm hava aralığı değerleri için sabit iken R₂ direnç değerinde belli hava aralığı değerine kadar modelleme sonucu sabit kalırken belli bir değerden sonra sonuç azalmış ve sabit kalmıştır. R₁ direnç değerinde deneysel sonuç tüm hava aralığı değerleri için sabit iken, R₂ direnç değerinde ise belli bir hava aralığı değerinde artış görülmüş, söz konusu değerden sonra azalma tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6. Hava aralığı-reaktans ilişkisi.

Hava aralığı uzunluğu (mm)	X_1 (ohm)		X_2 (ohm)		X_m (ohm)	
	Deney sonucu	Modelleme sonucu	Deney sonucu	Modelleme sonucu	Deney sonucu	Modelleme sonucu
0.305		9.35		5.40		145
0.368	7.66	9.30	5.10	5.10	140	130
0.406	6.64	9.28	4.43	4.94	111	122
0.508	6.24	9.22	4.16	4.59	105	106
0.572	5.59	9.20	3.73	4.40	88	98.1
0.660		9.17		4.12		88.9

Çizelge 4.6’ da hava aralığı-reaktans değerleri ilişkisine ait deneysel sonuçları ve modelleme sonuçları verilmiştir. Altı adet hava aralığı değeri referans alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hava aralığı değeri attıkça reaktans değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7. Hava aralığı-verim ilişkisi model ve deneysel sonuç değerleri.

Hava aralığı uzunluğu (mm)	Verim	
	Deney sonucu	Modelleme sonucu
0.305		0.796
0.368	0.810	0.806
0.406	0.814	0.809
0.508	0.823	0.812
0.572	0.824	0.817
0.660		0.812

Çizelge 4.7’ de hava aralığı-verim ilişkisine ait deney sonuçları ve model sonuçları verilmiştir. Altı adet hava aralığı değeri referans alınmıştır. Elde edilen verilere göre hava aralığı arttıkça verimin arttığı görülmüş belli bir hava aralığı değerinden sonra ise verimin azalmaya başladığı tespit edilmiştir.

4.7. Standart İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Mzungu ve arkadaşları (2008) motor test standartları ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Motor verimliliği göz önüne alınarak uluslararası enerji verimliliği test standartlarının geliştirilmesi için çaba harcanmış ve var olan hataların giderilmesi için çalışmışlardır. Bu standartlar verim testi için kullanılır. En önemlileri aşağıda verilmiştir;

- IEEE 112.
- IEC 60034-2.
- CSA 390.
- JEC.
- SANS IEC 60034-2.
- AS 1 359. 1 02.

Çizelge 4.8. Değişik verim standartlarındaki motorların çeşitli güçlerdeki değerleri.

Verim sınıfı	4 kW	7.5 kW	11 kW	15 kW
EFF1	88.3	90.1	91	91.8
EFF2	84.3	87	88.4	89.4
EFF3	80	83	85	87

4 kW, 7.50 kW, 11 kW ve 15 kW güçlerindeki EFF1: yüksek verimli, EFF2: enerji verimli ve EFF3: standart verimli motorlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda EFF3: standart verimli motorlardan elde edilen verimin diğer motorlara oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Pyrhönen ve arkadaşları yüksek verimli motorlar ile standart verimli motorları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucu yüksek verimli motorların standart verimli motorlara nazaran % 35 daha fazla çelik, % 15 daha fazla bakır ve % 15 daha fazla alüminyum içerdiğini tespit etmişlerdir. İlave malzemeler ile birlikte yüksek verim, yüksek soğutma alanı ve yüksek sıcaklık zaman sabiti elde edilmiş; elde edilen bu sonuçlar ile daha düşük sargı işletme sıcaklığı sağlanarak motorların daha uzun ömürlü olduğu sonucuna varmışlardır.

4.8. Sıcaklığın Etkisi

Van ve arkadaşları (2009) 15 kW, 11 kW, 7.50 kW ve 3 kW güçlerindeki standart ve premium plus motorları 4 saat boyunca yapılan deneylere göre karşılaştırmışlar ve her bir motor için ölçülen en yüksek termal denge sıcaklıklarını tespit etmişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre tüm güç değerlerinde standart verimli motorların premium plus motorlara oranla daha yüksek termal sıcaklık değerlerine sahip olduklarını göstermişlerdir. Ayrıca her bir motor için sıcaklık azalmalarını yüzde olarak tespit etmişlerdir. Buna göre sıcaklık azalmaları 15 kW için % 9.42, 11 kW için % 27.20, 7.50 kW için % 8.50 ve 3 kW için % 19.58 olarak tespit etmişlerdir. Al ve arkadaşları nominal yükte çalışan standart verimli motorun toplam kayıp oranlarını beş değişik kayıp çeşidi (Nüve kayıpları, Sürtünme ve vantilasyon kayıpları, Stator

bakır kayıpları, Rotor bakır kayıpları, İlave yük kayıpları) için irdelemişlerdir. Al ve arkadaşları 3 kW' lık standart verimli ve yüksek verimli motorları karşılaştırdıklarında nüve kayıplarının standart verimli motorda daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra sürtünme ventilasyon kayıplarının, yüksek verimli motorda daha yüksek çıktığını, stator bakır kayıplarının, rotor bakır kayıplarının ve ilave yük kayıplarının standart verimli motorda daha yüksek çıktığını göstermişlerdir.

Yoon ve arkadaşları (2002) çalışmalarında motordaki bobinlerin soğutulması ile meydana gelen sıcaklık değişiminin motor performansına etkilerini incelemişlerdir. Bobin sıcaklığının 10°C düşürülmesiyle nominal yükte % 0.25 oranında verim artışı ve % 125 yükte % 0.50 oranında verim artışı sağlamışlardır.

4.9. Nüve Boyutunun Etkisi

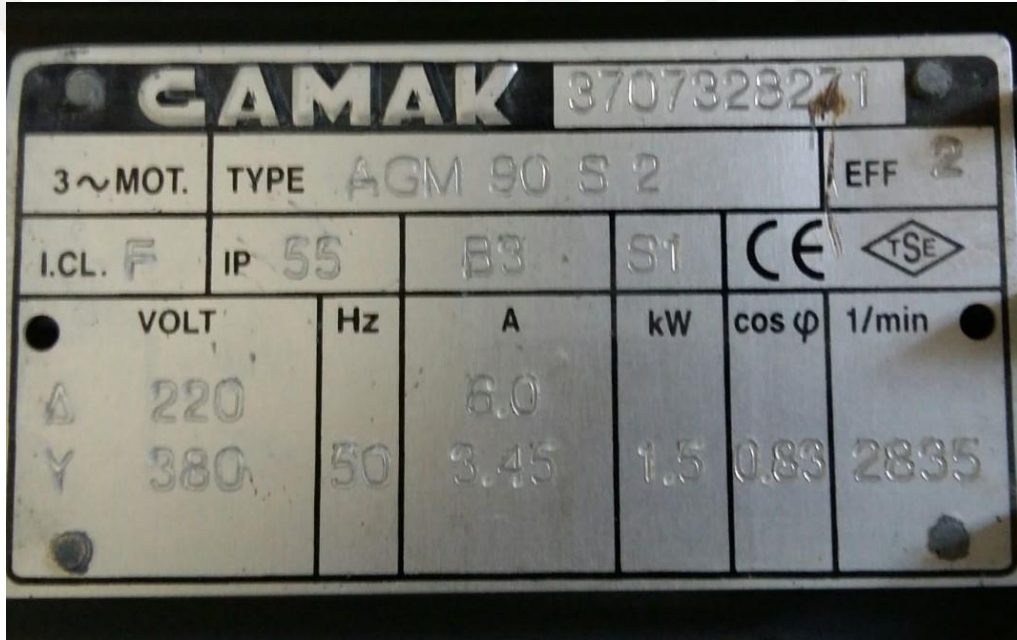
Mach (2012) çalışmasında asenkron motorun nüve uzunluğu değişiminin motor performansına nasıl etki ettiğini incelemiştir. Çalışmasında nüve uzunluğunu 60 mm' den 80 mm' ye çıkardığında stator nüve kayıplarında yaklaşık % 15 azalma ve demir kayıplarında yaklaşık % 13 azalma elde etmiş buna bağlı olarak da motor verimini % 1.25 oranında bir iyileştirme sağlamıştır.

5. STANDART VERİMLİ MOTOR İLE YÜKSEK VERİMLİ MOTOR ARASINDAKİ FİZİKSEL FARKLILIKLAR

5.1. Yüksek Verimli ve Standart Verimli İki Motorun Demonte Edilmesi

5.1.1. Standart verimli motorun demonte edilmesi

Çalışmamızda AGM 90 S 2 standart verimli motorun analizini yapmak ve yüksek verimli motorla farkını görebilmek amacıyla demonte işlemine tabi tutuldu. Motor demonte işleminde öncelikli olarak motor kapağı sökülerek motor fanı çıkartıldı. Ardından motor sargıları oluklarından çıkartıldı.



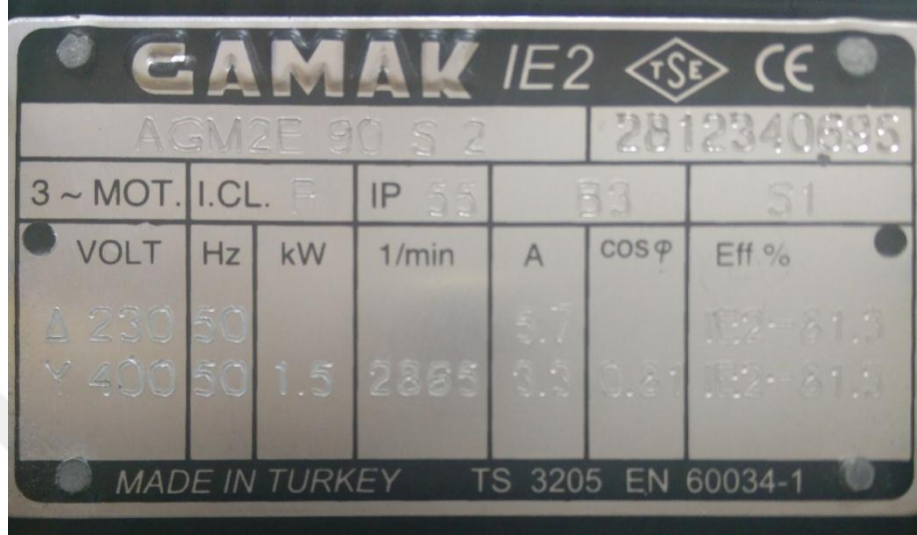
Şekil 5.1. Standart verimli motorun etiketi.

Yukarıdaki şekilde çalışmalarımızda kullanmış olduğumuz standart verimli motora ait etiket gösterilmiştir. Etiket değerlerinden görüldüğü üzere asenkron motorumuz 3 fazlı AGM 90 S 2 türüne ait EFF2 verim sınıfına giren motordur. Diğer ek bilgiler etiket üzerinde görülmektedir.

5.1.2. Yüksek verimli motorun demonte edilmesi

Çalışmamızda AGM2E 90 S 2 yüksek verimli motorun analizini yapmak ve standart verimli motorla farkını görebilmek amacıyla parçalanmıştır. Motor parçalama işleminde

öncelikli olarak motor kapağı sökülerek motor fanı çıkartıldı. Ardından motor sargıları ve rotor yuvalarından çıkartıldı. Sargılar ve nüve ayrı ayrı sökülüştür.



Şekil 5.2. Yüksek verimli motorun etiketi.

Yukarıdaki şekilde çalışmalarımızda kullanmış olduğumuz standart verimli motora ait etiket gösterilmiştir. Etiket değerlerinde görüldüğü üzere asenkron motor 3 fazlı AGM2E 90 S 2 türüne ait motordur. Diğer ek bilgiler etiket üzerinde görülmektedir.

Her iki motora ait gövde yapısı, stator oluk yapısı, sarım şekilleri, pervane yapısı, rotor ve mil fotoğrafları Şekil 5.3-5.10' da verilmiştir.



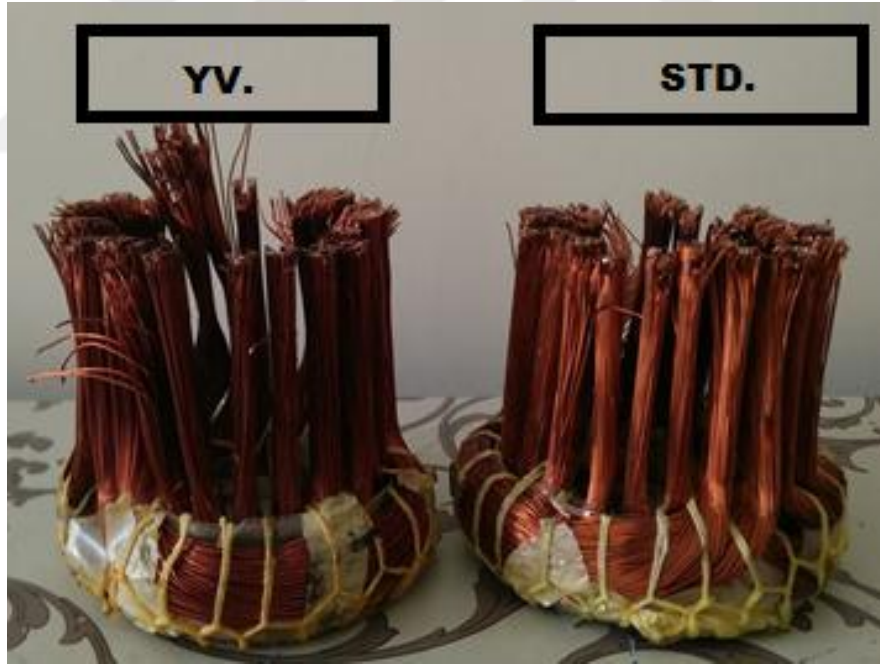
Şekil 5.3. Motor ön panellerinin dıştan görünümü.



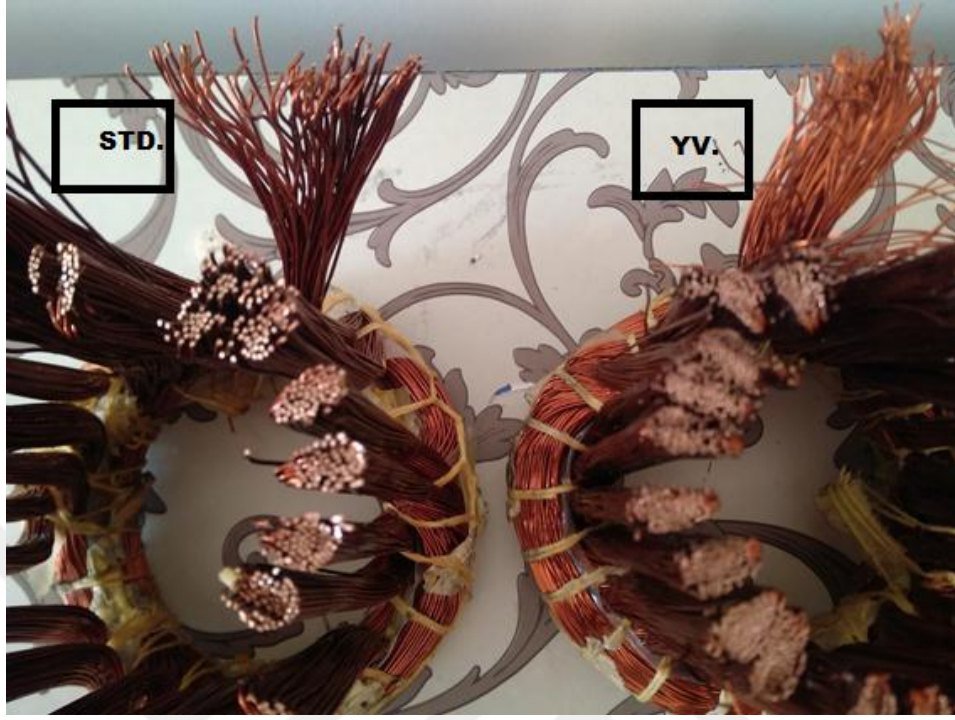
Şekil 5.4. Motorların üstten görünümü.



Şekil 5.5. Motor stator görünümleri.



Şekil 5.6. Motor sargı görünümleri.



Şekil 5.7. Motor sargılarının üstten görünümü.



Şekil 5.8. Motor kanatçıklarının görünümü.



Şekil 5.9. Motor rotor görüntüleri.



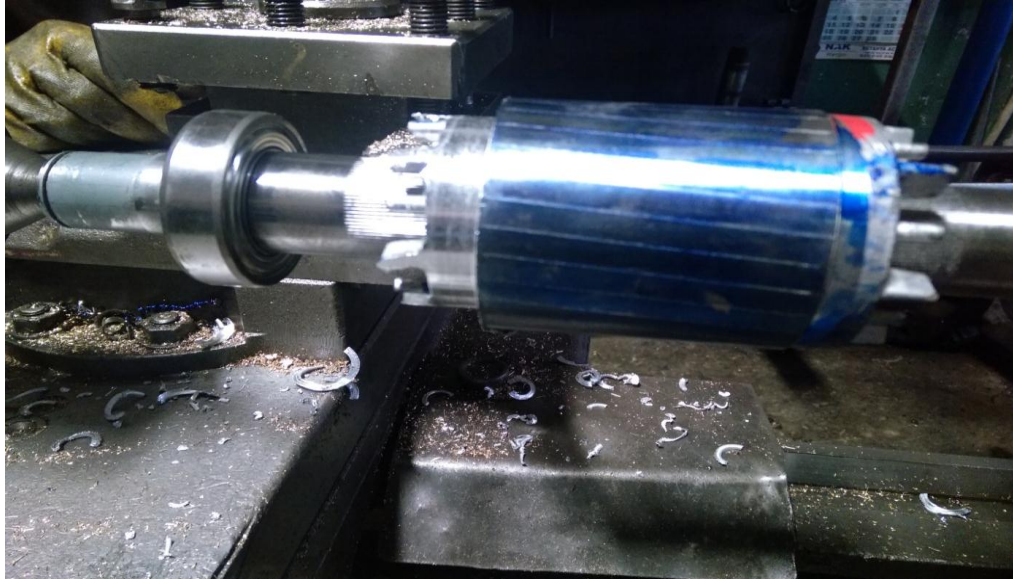
Şekil 5.10. Motor mili görünüşleri.

5.1.3. Rotor kesme işlemi

Son olarak rotorun enine kesitini daha iyi inceleyebilmek amacı ile rotor gerekli teçhizatın yer aldığı bir atölyede kesilmiştir. Rotorun kesme işlemi tamamlandıktan sonra ki görüntüleri Şekil 5.11, 5.12 ve 5.13’ de verilmiştir.



Şekil 5.11. Rotorun enine kesme işlemi.



Şekil 5.12. Rotor kesme işlemi.



Şekil 5.13. Rotorun kesilmiş hali.

5.2. Yüksek Verimli Motor İle Standart Verimli Motorun İşletme Değerleri Yönünden Farklarının Ortaya Konulması

5.2.1. Standart verimli motorun işletme değerleri

Çizelge 5.1’ de standart verimli AGM 90 S 2 tipindeki 2 kutuplu 3000 d/d çalışabilen motorlara ait işletme değerleri verilmiştir.

5.2.2. Yüksek verimli motorun işletme değerleri

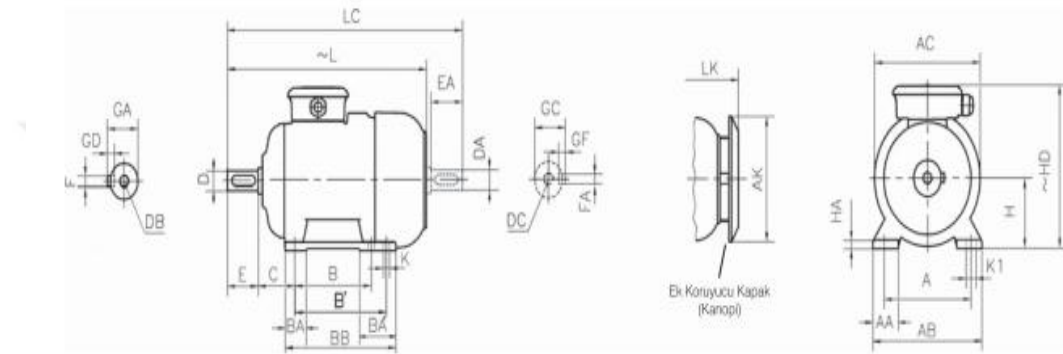
Çizelge 5.1’ de yüksek verimli AGM2E 90 S 2 tipindeki 2 kutuplu 3000 d/d çalışabilen motora ait işletme değerlerine yer verilmiştir.

Çizelge 5.1. Standart verimli ve yüksek verimli motorun işletme değerleri (www.gamak.com).

Anma gücü (kW)	Tip	Devir sayısı (d/d)	Akım (A)	Moment (Nm)	Güç katsayısı	Verim (%)			Yol alma akım oranı	Yol alma moment oranı	Devrilme momenti oranı	Eylemsizlik momenti	Yaklaşık ağırlık
						4/4	3/4	2/4					
1.5	AGM 90 S 2	2835	3.3	5.05	0.85	77.3	77.1	74.2	4.8	2.2	2.5	0.0011	11.5
Anma gücü (kW)	Tip	Devir sayısı (d/d)	Akım (A)	Moment (Nm)	Güç katsayısı	Verim (%)			Yol alma akım oranı	Yol alma moment oranı	Devrilme moment oranı	Eylemsizlik momenti	Yaklaşık ağırlık
						4/4	3/4	2/4					
1.5	AGM2E 90 S 2	2900	3.4	4.94	0.76	83	83	81.6	6.3	3.1	3.7	0.0014	13.5

Çizelge 5.1 incelendiğinde yüksek verimli motorda devir sayısının standart verimli motorlara oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Akım, devrilme momenti ve yol alma momentinin yüksek verimli motorda standart verimli motorlara göre daha düşük olduğu, eylemsizlik momentinin ise yüksek verimli motorda daha fazla olduğu görülmektedir.

5.3. Yüksek Verimli Motor İle Standart Verimli Motorun Fiziksel Boyutları Yönünden Farklarının Ortaya Konulması



Şekil 5.14. Motorlara ait fiziksel parametrelerin gösterimi (www.gamak.com).

Her iki motora ait fiziksel parametre değerleri Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Standart verimli ve yüksek verimli motora ait boyut ile ilgili parametreler (www.gamak.com).

Yapı büyüklüğü	Kutup sayısı	H	HD	H A	A	AA	AB	Φ AC	K	K1	B	BA	BB	L	LC	LK	C	E- EA	DB''- DC	Φ D- Φ DA	F*G D
AGM 90 S 2	2-4-6-8	90	216	12	140	43	180	176	10	15	100	35	130	309	364	338	56	50	M8	24	8*7
AGM2E 90 S 2	2-4-6-8	90	216	12	140	43	180	176	10	15	100	35	130	309	364	338	56	50	M8	24	8*7

5.3.1. Motor boyut parametrelerinin açıklanması

H	Rotorun tam ortasından başlayarak tabana kadar olan mesafe
HD	Motorun toplam yüksekliği
HA	Motor ayak yüksekliği
A	Motor kapak çapı
AA	Motor ayak ön kesit genişliği
AB	Motorun ön kesit genişliği
ΦAC	Motor ön kesit çapı
ΦAK	Ek koruyucu kapağın çapı
K	Motor ayak genişliği
K1	Motor kapak çapının bitiş noktasıyla motor ayağının ucu arasındaki mesafe
B	Motor ayağındaki vidalı kısım haricinde kalan kısmın uzunluğu
BA	Motor ayağında bulunan vidalı kısmın bulunduğu bölümün genişliği
BB	Motor ayak uzunluğu
L	Rotorun ucundan motor kapağının sonuna kadar olan mesafe
LC	İki mil ucu arası mesafe
LK	Pervane mahfaza tası ile kanopi arası mesafe
DB''	Motor rotor mili parçası
DC	Motor rotor mili parçası
ΦD	Mil çapı
ΦDA	Mil çapı
C	Motor kapak genişliği

Yukarıda asenkron motorlara ait fiziksel parametreler ve açıklamaları verilmiştir. Belirtilen parametre değerlerinin çalışmamızda kullanmış olduğumuz her iki motorda da aynı oldukları tespit edilmiştir (bkz. Çizelge 5.2). Bu noktada iki motor arasındaki performans farkının fiziksel parametre değerlerine bağlı olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

5.4. Yüksek Verimli Motor Ve Standart Verimli Motorda Bulunan Nüve Malzemesinin Tanıtılması, Açıklanması, Farklarının Ortaya Konulup Yorumlanması



Şekil 5.15. Stator nüvesinin gösterimi.

5.4.1. Nüve malzemesinin analizi ve farklarının ortaya konulması

Çalışmalarımızda AGM2E 90 S 2 tipindeki yüksek verimli motor ve AGM 90 S 2 tipindeki standart verimli motoru kullandık. Motorlarımızın daha iyi analizini yapabilmemiz amacıyla kendi çabalarımızla parçalarına ayırıp inceleme ve analiz işlemleri yaptık. Stator gövdesine yerleştirilmiş, üzerinde sargıların bulunduğu, manyetik akının aktarılmasını sağlayan kısacası asenkron motorun çalışmasında çok önemli işlevi bulunan nüve parçasının malzeme ve kayıplar yönünden analizini yaptık.

Aşağıda deneylerde kullanmış olduğumuz motor tiplerinin parametre açıklamaları verilmiştir:

- A:** Alüminyum alaşımdan yapım
- G:** Üç fazlı, kafes rotorlu asenkron motor
- M:** Tam kapalı, dış yüzeyden soğutmalı

2E: IE2 “yüksek verimli” motorlar

90: Mil ekseninin tabandan yüksekliği

L: Gövde uzunluğu

Analizlerde kullanmış olduğumuz motorların M700-50A kodlu çelik sacından yapıldığı görülmüştür. Nüve alüminyum alaşımından yapılmıştır. Nüvenin oluşturulduğu alüminyum alaşımının kodu Al 99.7 diğer bir ifadeyle ETİAL 7E’ dir.

ETİAL 7E = Alüminyum kodu = Al 99.7

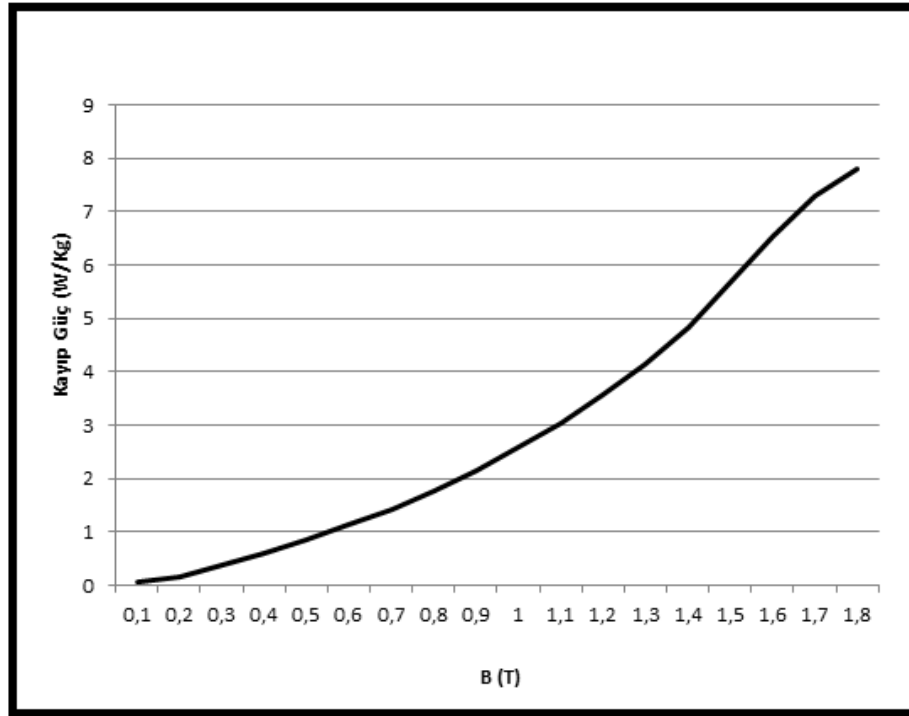
M700-50A sacı için W/kg [1.5 T] = 5,536

5.4.2. ETİAL 7E malzemesinin tanıtımı

ETİAL 7E çalışma yaptığımız motorların nüvelerinde kullanılan alüminyum malzemesinin kodudur. Al 99.7 olarak da ifade edilmektedir.

Çizelge 5.3 M700-50A malzemesinin B-W/kg değerleri (www.sura.se/sura/hp_products.nsf).

B (T)	Kayıp Güç (W/Kg)
0.1	0.05
0.2	0.16
0.3	0.37
0.4	0.59
0.5	0.84
0.6	1.12
0.7	1.43
0.8	1.77
0.9	2.15
1	2.57
1.1	3.03
1.2	3.55
1.3	4.13
1.4	4.83
1.5	5.68
1.6	6.54
1.7	7.29
1.8	7.81



Şekil 5.16. M700-50A malzemesinin kayıp güç-manyetik akı yoğunluğu eğrisi.

5.4.3. M700-50A malzeme kodunun açıklanması

Elektrik motorlarının rotor, stator sargılarının ve transformatör sargılarının çekirdeği elektriksel saclardan oluşmaktadır. Silisli sacların en önemli özelliği, taşıdığı alaşım elementleri sayesinde manyetik kayıpları minimuma indirmesi ve manyetik özellikleri maksimum seviyeye çıkararak motor, trafo gibi manyetik özelliklerin en üst seviyede olması istenen mamullerde verimi arttırmasıdır. Ayrıca demire katılan alaşım elementleri sayesinde, demirin manyetik özelliklerinde zamanla meydana gelebilecek değişiklikleri azaltarak, demiri daha kararlı hale getirir. Alaşım elementlerinin oranlarına göre ve kullanım yerlerine göre çeşitli kayıp sınıflarına ayrılırlar. Bazı çelik sınıfı sacların manyetik özellikleri aşağıda belirtilmiştir (www.assandemir.com/urunlerimiz/dinamo.aspx).

Çizelge 5.4. Çelik sınıflarına ait parametrelerin gösterimi (www.assandemir.com/urunlerimiz/dinamo.aspx).

Çelik sınıfı	Sac kalınlığı (mm)	Maksimum kayıp değeri (50 Hz, W/kg)		Mıknatıslanma (50 Hz, min. Değer)		
		1,00 T	1,50 T	2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m
M250-35A	0,35	1,00	2,50	1,49	1,60	1,70
M270-35A	0,35	1,10	2,70	1,49	1,60	1,70
M300-35A	0,35	1,20	3,00	1,49	1,60	1,70
M330-35A	0,35	1,30	3,30	1,49	1,60	1,70
M360-35A	0,35	1,45	3,60	1,49	1,60	1,70
M250-50A	0,50	1,05	2,50	1,49	1,60	1,70
M270-50A	0,50	1,10	2,70	1,49	1,60	1,70
M290-50A	0,50	1,15	2,90	1,49	1,60	1,70
M310-50A	0,50	1,25	3,10	1,49	1,60	1,70
M330-50A	0,50	1,35	3,30	1,49	1,60	1,70
M350-50A	0,50	1,50	3,50	1,49	1,60	1,70
M400-50A	0,50	1,70	4,00	1,53	1,63	1,73
M470-50A	0,50	2,00	4,70	1,54	1,64	1,74
M530-50A	0,50	2,30	5,30	1,56	1,65	1,75
M600-50A	0,50	2,60	6,00	1,57	1,66	1,76
M630-50A	0,50	2,80	6,30	1,58	1,68	1,76
M700-50A	0,50	3,00	7,00	1,60	1,69	1,77

Çizelge 5.5. M700-50A malzemesinin diğer parametre değerleri (www.sura.se/Sura/hp_products.nsf).

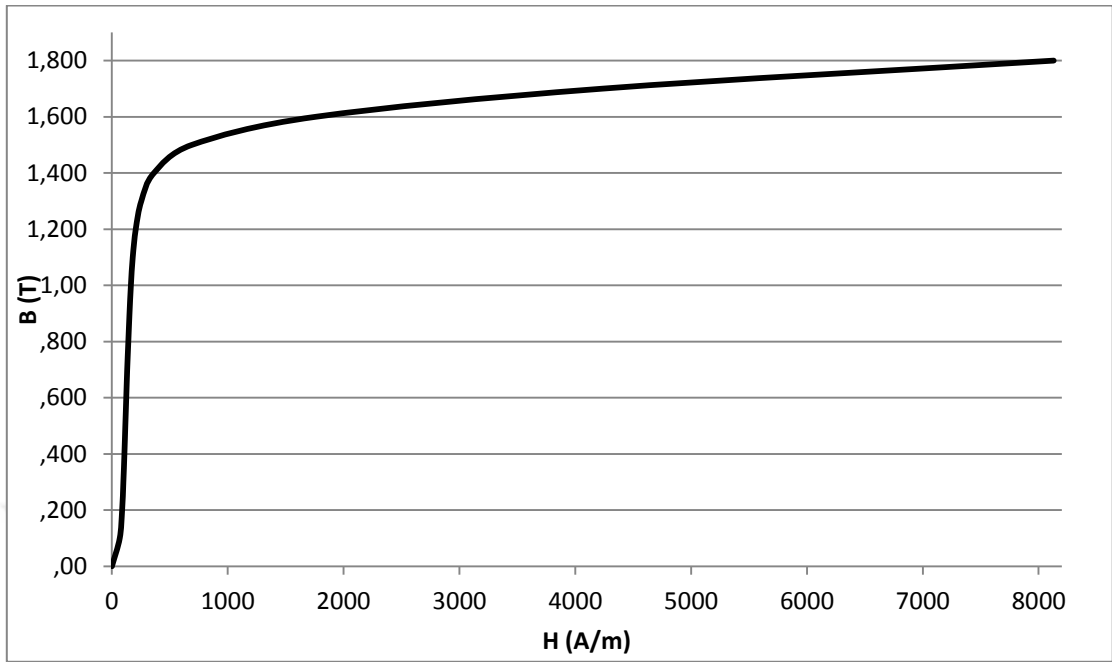
Mıknatıslanma akımı (DC), A/m	100
Bağıl geçirgenlik at 1.5 T	1730
Direnç, $\mu \Omega$ cm	25
Akma sınırı, N/mm ²	285
Çekme dayanımı, N/mm ²	405
Sertlik HV5 (VPN)	125

5.4.4. Analiz edilen nüve parçasının B-H değerlerinin ve B-H eğrisinin gösterilmesi

Nüvenin B-H değerleri ve B-H eğrisi aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Nüvenin B-H değerleri (<http://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>).

B (T)	H (A/m)
0,00	0,00
0,10	67,80
0,20	88,30
0,30	99,20
0,40	108,00
0,50	116,00
0,60	124,00
0,70	132,00
0,80	142,00
0,90	152,00
1,00	164,00
1,10	180,00
1,20	206,00
1,30	254,00
1,40	363,00
1,50	690,00
1,60	1760,00
1,70	4230,00
1,80	8130,00



Şekil 5.17. B-H eğrisi

Standart ve yüksek verimli motorlarda oluk yapıları incelendiğinde her iki motor türü için stator oluklarında damla tipi oluk yapısı kullanılmıştır. Rotor oluk yapısı ise NEMA standartlarında belirtilen B tipi oluk yapısına sahiptir. Stator oluk sayısı 24 adet iken rotor oluk sayısı 18 adettir.

Fan yapısı ise her iki motor türü için gene aynı yapıda olup 9 kanatlı olarak imal edilmiştir.

Dış gövde yine her iki motor için alüminyum dökümden imal edilmiş olup soğutma kanatçıkları da aynı yapıdadır.

Her iki motor için mil boyutları 24 mm olarak ölçülmüştür ve aynı malzemeden yapılmıştır.

Stator sargıları farklı sayıda sarılmıştır. Seri bağlantılı olarak, yarım kalıp şeklinde ve el tipi sarım yapılmıştır. Standart verimli motor için tel çapı = 1×0.75 mm iken, yüksek verimli motor için tel çapı = 2×0.55 mm (Bu da 0.80 mm tel çapına tekabül etmektedir) olarak sarılmıştır.

Her iki motorun sargı hatveleri 1-10-12 olarak yarım kalıp sarılmıştır. Standart verimli motorun bir stator oluğundaki sipir sayısı 69 iken, yüksek verimli motorun sipir sayısı 78 adet olarak kullanılmıştır.

Kullanılan diğ er malzemeler, rulman, bilye, rotorda bulunan soğutma kanatçıkları, klemens kutusu vb. her iki motor içinde aynıdır.

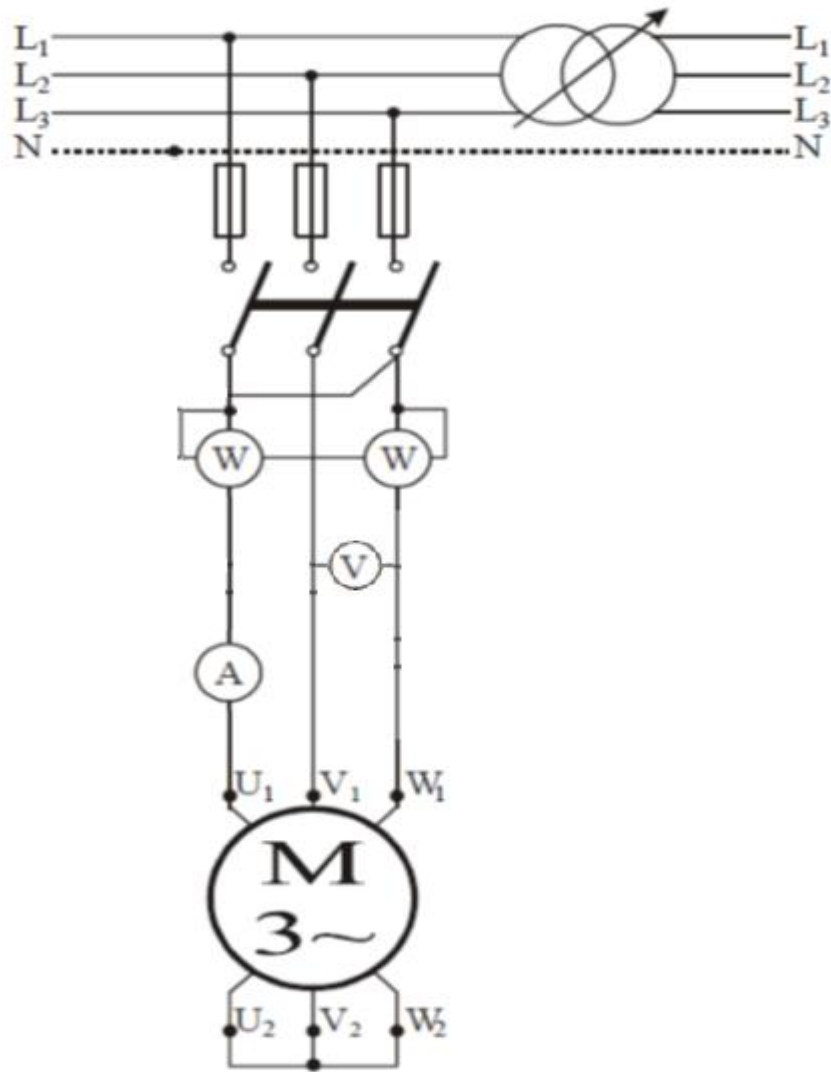
Kısa devre halkasının boyu her iki motor için 66.4 mm iken eni 10 mm olarak ölçülmüştür. Kullanılan soğutma kanatçık yapısı ve adedi aynıdır. Fan kanatçıklarının boyları aynıdır ve 12.50 mm' dir.



6. STANDART VERİMLİ MOTOR İLE YÜKSEK VERİMLİ MOTOR DENEYLERİ

6.1. Deney Bağlantıları

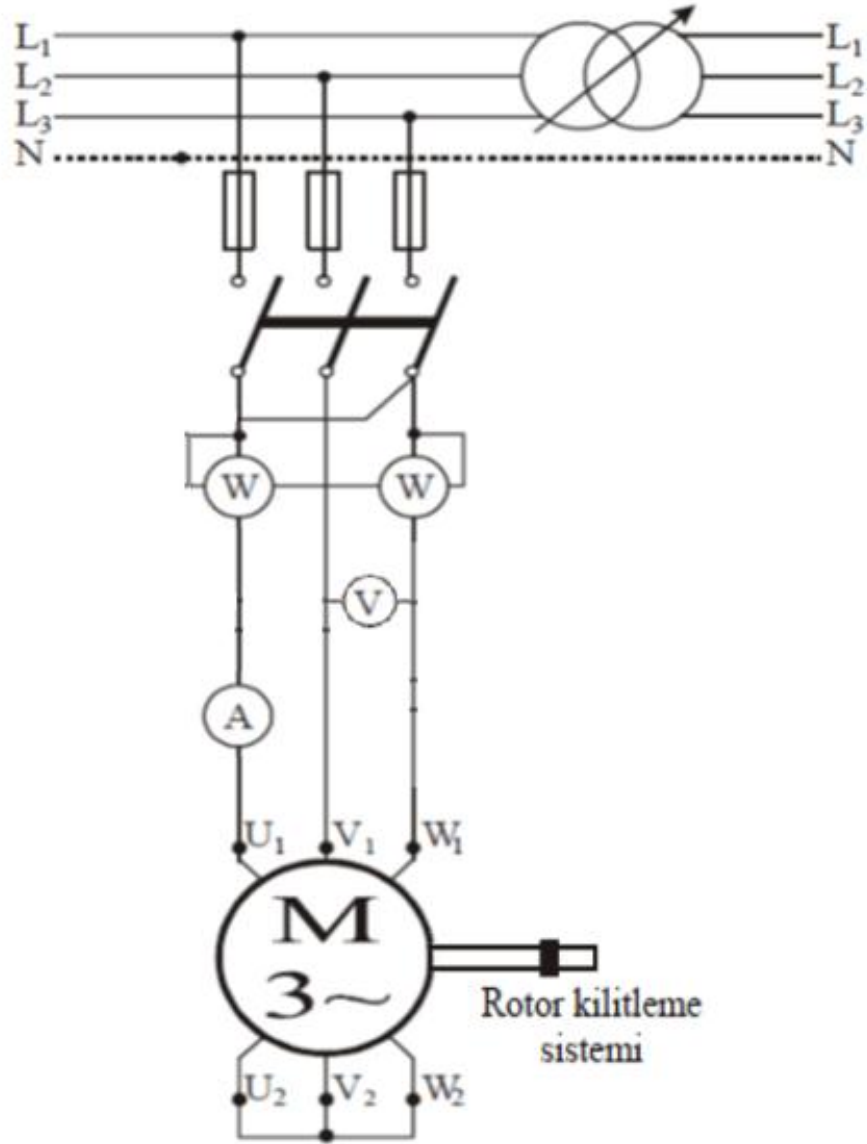
Standart verimli motor ve yüksek verimli motor kullanılarak boşta çalışma deneyi, kısa devre deneyi ve yüklü çalışma deneyi yapılmıştır. Söz konusu deneyler ile ilgili teorik bilgiler 1. bölümde verilmiştir. Bu kısımda her deneye ait bağlantı şemaları ve söz konusu deneylere ait fotoğraflar verilmiştir (Altıntaş).



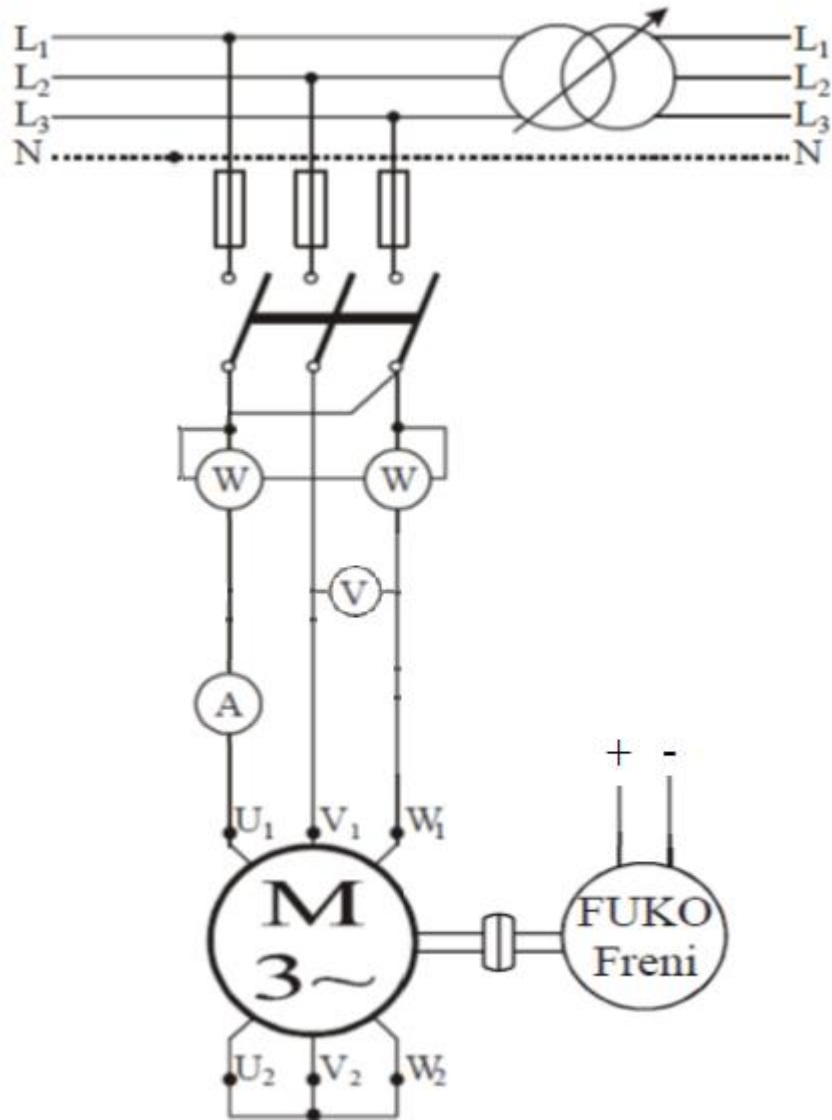
Şekil 6.1. Boşta çalışma deneyi bağlantı şeması.



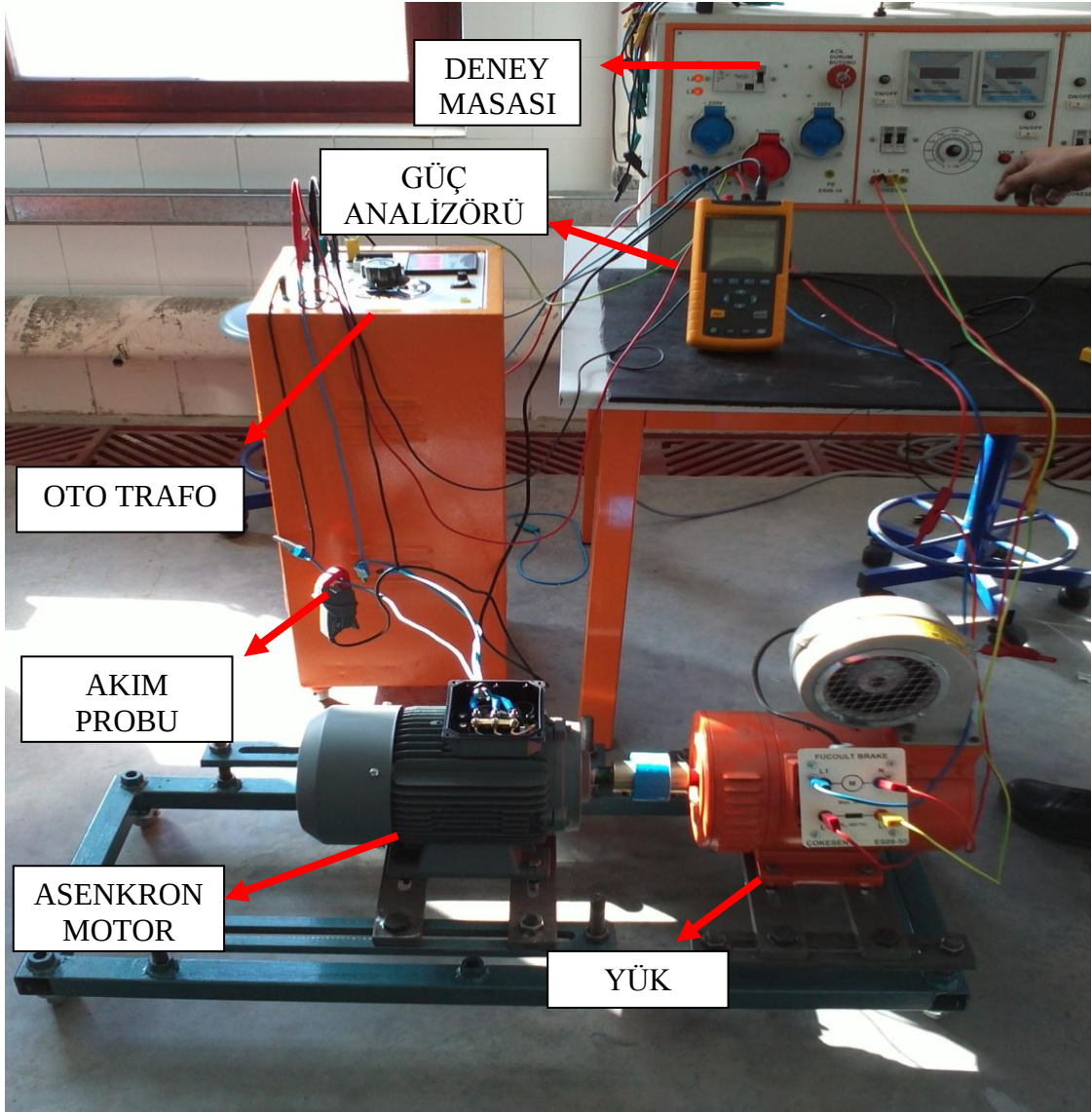
Şekil 6.2. Boşta çalışma deney düzeneği.



Şekil 6.3. Kısa devre deneyi bağlantı şeması.



Şekil 6.4. Yüklü çalışma deneyi bağlantı şeması.



Şekil 6.5. Yüklü çalışma deney düzeneği.

6.2. Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

6.2.1. Elde edilen sonuçlar (Standart verimli motor)

Çizelge 6.1’ de standart verimli motorda boşa çalışma deneyine ait ölçülen değerler verilmiştir. Yapılan deneyde motor yüksüz olarak çalıştırılmıştır. Motor boşa çalışırken, şebekeden çekilen akım, gerilim ve şebekeden çekilen toplam güç ölçülmüş ve değerler Çizelge 6.1’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Standart verimli motor boşa çalışma deneyi (ölçülen değerler).

Aktif güç (W)	Görünür güç (VA)	Reaktif güç (VAr)	Güç faktörü	Frekans (Hz)	Akım (A)	Gerilim (V)	Devir Sayısı (d/d)
218	1270	1240	0.17	50	1.94	380	2993
$R_1 = 4.9 \Omega$							

Çizelge 6.2’ de asenkron motorda kısa devre deneyine ait ölçülen değerler verilmiştir. Yapılan kısa devre deneyinde motorun rotoru özel bir mekanizma ile sabitleştirilerek dönmemesi sağlanmıştır. Daha sonra, ayarlı alternatif güç kaynağından uygulanan gerilim yavaş yavaş artırılmıştır. Statoran geçen akım dikkatlice ampermetreden okunarak, akım değeri anma değerine ulaşınca ölçü aletlerinden gerilim, akım ve güç değerleri tespit edilerek Çizelge 6.2’ de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Standart verimli motor kısa devre deneyi (ölçülen değerler).

Aktif güç (W)	Görünür güç (VA)	Reaktif güç (VAr)	Güç faktörü	Frekans (Hz)	Akım (A)	Gerilim (V)
345	490	347	0.69	50	3.46	83

Yüklü çalışma deneyinde asenkron motorların yüklü durumları incelenerek verim karakteristikleri elde edilir. Asenkron motorlar yüklendikçe devir sayıları düşer. Fakat bu düşme çok azdır. Motor boşa iken güç faktörü çok küçüktür ve motor yüklendikçe bu değer artar. Ayrıca motorun verimi de motor yüklendikçe artmaktadır. Motorun milinden alınan mekanik gücün ölçülmesi için motorun herhangi bir frenle (Dinamo fren, Proni veya Fuko freni gibi) yüklenmesi gerekir (<http://w3.gazi.edu.tr/~okaplan/makina-deney/2deney%202.htm>). Yüklü çalışma deneyi yapılmış ve elde edilen değerler Çizelge 6.3’ de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Standart verimli motor yüklü çalışma deneyi (ölçülen değerler).

Aktif güç (W)	Görünür güç (VA)	Reaktif güç (VAr)	Güç faktörü	Frekans (Hz)	Akım (A)	Devir sayısı (d/d)
1970	2230	1030	0.88	50	3.46	2837

6.2.2. Elde edilen sonuçlar (Yüksek verimli motor)

Çizelge 6.4' de standart verimli motorda boşa çalışma deneyine ait bulunan değerler verilmiştir. Yapılan deneyde motor yüksüz olarak çalıştırılmıştır. Motor boşa çalışırken, şebekeden çekilen akım, gerilim ve şebekeden çekilen toplam güç ölçülmüş ve değerler Çizelge 6.4' de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Yüksek verimli motor boşa çalışma deneyi (ölçülen değerler).

Aktif güç (W)	Görünür güç (VA)	Reaktif güç (VAr)	Güç faktörü	Frekans (Hz)	Akım (A)	Gerilim (V)	Devir sayısı (d/d)
243	1110	1080	0.22	50	1.68	380	2997
$R_1 = 4.5 \Omega$							

Çizelge 6.5' de asenkron motorda kısa devre deneyine ait ölçülen değerler verilmiştir. Yapılan kısa devre deneyinde motorun rotoru özel bir mekanizma ile sabitleştirilerek dönmemesi sağlanmıştır. Daha sonra, ayarlı alternatif güç kaynağından uygulanan gerilim yavaş yavaş artırılmıştır. Statordan geçen akım dikkatlice ampermetreden okunarak, akım değeri anma değerine ulaşınca ölçü aletlerinden gerilim, akım ve güç değerleri tespit edilerek Çizelge 6.5' de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Yüksek verimli motor kısa devre deneyi (ölçülen değerler).

Aktif güç (W)	Görünür güç (VA)	Reaktif güç (VAr)	Güç faktörü	Frekans (Hz)	Akım (A)	Gerilim (V)
315	462	334	0.68	50	3.37	79.4

Asenkron motorlar yüklendikçe devir sayıları düşer. Motor boşa çalışırken güç faktörü çok küçüktür ve motor yüklendikçe güç faktörü değeri artar. Motor yüklendikçe motordan sağlanan verim artmaktadır. Motorun milinden alınan mekanik gücün ölçülmesi için motorun bir çeşit frenle (dinamo fren, Fuko freni gibi) yüklenmesi gerekir

(<http://w3.gazi.edu.tr/~okaplan/makina-deney/2deney%202.htm>). Yüklü çalışma deneyi sonucunda ölçülen değerler Çizelge 6.6' da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Yüksek verimli motor yüklü çalışma deneyi (ölçülen değerler).

Aktif güç (W)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç faktörü	Frekans (Hz)	Devir sayısı (d/d)
1920	3.37	380	0.88	50	2870

6.3. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması

Asenkron motorlar için boшта çalışma ve kısa devreleri yapılmış ve ölçülen değerler yukarıdaki Çizelgelerde verilmiştir. Ölçülen değerler kullanılarak faz başına değerler bulunmuştur.

Boшта çalışma deneyi için ölçülen değerlerden faz başına güç, faz başına gerilim hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler kullanılarak demir direnci, faz başına görünür güç değeri, güç faktörü, mıknatıslanma akımı ve mıknatıslanma reaktansı değerleri hesaplanarak eşdeğer devre parametreleri elde edilmiştir.

Ölçülen kısa devre değerleri kullanılarak eşdeğer devre direnci, statora indirgenmiş rotor direnci, rotor empedansı ve rotor faz reaktansı değerleri hesaplanarak eşdeğer devre parametreleri elde edilmiştir. Yüksek verimli motor ve standart verimli motor için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri Çizelge 6.7, 6.8, 6.9 ve 6.10' da verilmiştir.

6.3.1. Standart verimli motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması

6.3.1.1. Boшта çalışma deneyi

Deneylerde ölçülen değerlerden faz başına değerlerin hesaplandığı işlemler aşağıda verilmiştir:

$P_{in,nt}$ (faz başına güç) değeri eşitlik 2.23' e göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P_{in,nt} = \frac{218}{3} = 72.66 \text{ W}$$

V_{pnl} (faz başına gerilim) değeri 220 V' dur.

R_c (Demir direnci) bulunurken eşitlik 2.25 kullanılmıştır.

$$R_c = \frac{220^2}{72.66} = 666.116 \Omega$$

Eşitlik 2.26 kullanılarak S_{pnl} (Faz başına görünür güç) değeri hesaplanmıştır.

$$S_{pnl}=220 \times 1.94=426.8 \text{ VA}$$

$\cos\theta$ değeri eşitlik 2.27 kullanılarak 0.17 bulunmuştur.

I_m (Mıknatıslanma akımı) eşitlik 2.28 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$I_m=1.94 \times 0.98=1.9012 \text{ A}$$

Eşitlik 2.29 kullanılarak X_m (Mıknatıslanma reaktansı) değeri bulunmuştur.

$$X_m=\frac{220}{1.9012}=115.71 \text{ } \Omega$$

Çizelge 6.7. Standart verimli motorda boşa çalışma deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.

R_c (ohm)	S_{pnl} (VA)	I_m (A)	X_m (ohm)	R_1 (ohm)
666.116	426.8	1.9012	115.71	4.9

6.3.1.2. Kısa devre deneyi

Deneylerden ölçülen değerlerden eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanma aşamaları aşağıda verilmiştir:

Eşitlik 2.24 ve 2.30 kullanılarak Z_k (Motor eşdeğer devre faz empedansı) değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$V_k=\frac{83}{\sqrt{3}}=47.92 \text{ V}$$

$$Z_k=\frac{47.92}{3.46}=13.84 \text{ } \Omega$$

R_k (Motor eşdeğer devre faz direnci) eşitlik 2.31 kullanılarak bulunmuştur.

$$R_k=\frac{345}{3 \times 3.46^2}=9.60 \text{ } \Omega$$

X_k (Motor eşdeğer devre faz reaktansı) değeri eşitlik 2.32 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_k=\sqrt{13.84^2-9.60^2}=9.96 \text{ } \Omega$$

Rotor direnci ise eşitlik 2.33 kullanılarak aşağıdaki gibi hesap edilmiştir.

$$R_2 = 9.6 - 4.9 = 4.7 \, \Omega$$

Eşitlik 2.34 ifadesinden $X_1 = X_2 = \frac{9.96}{2} = 4.98 \, \Omega$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.8. Standart verimli motorda kısa devre deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.

R_k (ohm)	R_2 (ohm)	R_1 (ohm)	Z_k (ohm)	X_k (ohm)	X_1 (ohm)	X_2 (ohm)
9.60	4.7	4.9	13.84	9.96	4.98	4.98

6.3.1.3. Yüklü çalışma deneyi

Richter, Kostenko ve Pietrovsky ilave yük kayıplarını giriş gücü değerinin % 0.5' i alınarak hesaplanması gerektiğini ifade ederken, Nürnberg kitabında çıkış gücünün % 0.5' i alınarak hesaplamının yapılması gerektiğini belirtmiştir. Alger ise giriş gücü değerinin % 0.5 ile % 3' ü arasında değişen yaklaşım ile hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir (Roy vd., 2009). Çalışmamızda verim hesabı için ilave yük kayıpları çıkış gücünün % 0.5' i alınarak hesap edilmiş, bu değer 7.5 W olarak verim hesabında kullanılmıştır. Sürtünme ve vantilasyon kayıpları, her iki motorun pervane yapısı aynı olduğu için, çıkış gücünün % 3' ü olarak 45 W alınmıştır.

$$P_{\text{çıkış}} = 1500 \, W \, (\text{Çıkış gücü})$$

$$P_{\text{giriş}} = 1970 \, W \, (\text{Giriş gücü})$$

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{1500}{1970} \times 100 = \% 76.14 \, \text{olarak hesaplanmıştır.}$$

Verim (η), moment (M), nominal kayma (s_N), devrilme kayması (s_d), hava aralığı gücü (P_{AG}), nominal moment (M_N) değerlerini hesaplamaları aşağıda verilmiştir:

Eşitlik 2.37 kullanılarak nominal moment (M) aşağıdaki gibi hesap edilmiştir.

$$M = \frac{1500}{2 \times \pi \times 2837} \times 60 = 5.04 \, N.m$$

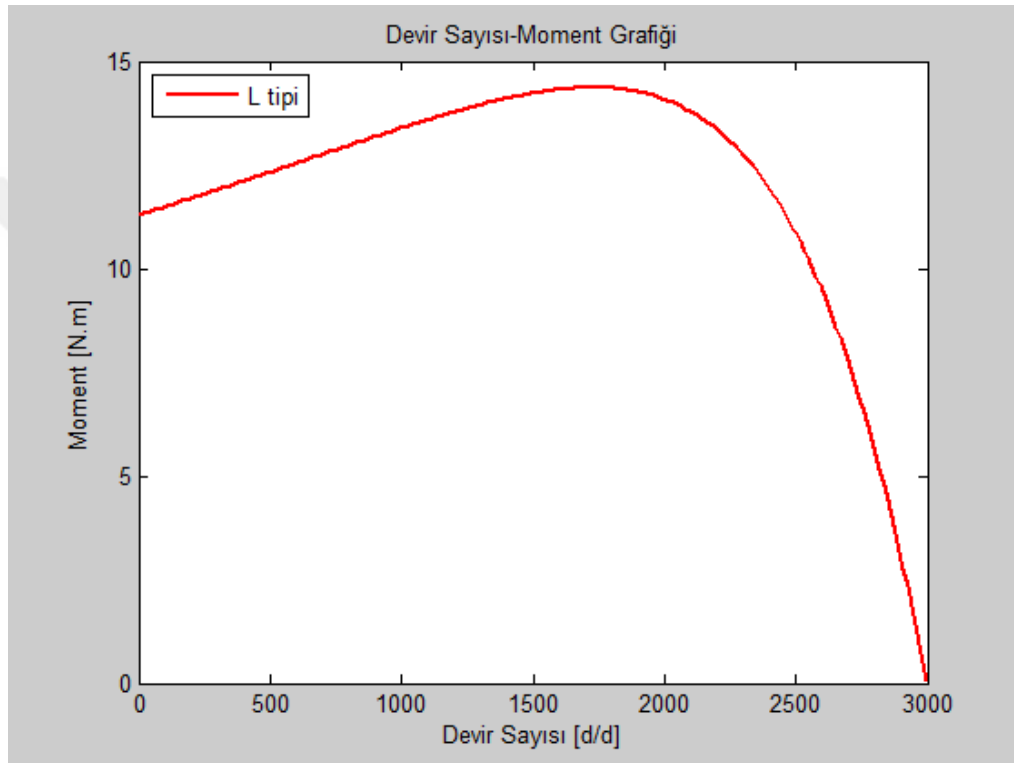
Nominal kayma (s_N) değeri eşitlik 2.38 kullanılarak bulunmuştur.

$$s_N = \frac{3000 - 2837}{3000} = 0.0543 = \% 5.43$$

Devrilme kayması (s_d) eşitlik 2.39' dan bulunmuştur.

$$s_d = \frac{4.70}{9.96} = 0.471$$

Ayrıca yol alma ve devrilme momentleri hesaplanmış. Yol alma momenti (M_{ya}) 11.340 N.m iken devrilme momenti (M_d) 14.370 N.m olarak bulunmuştur.



Şekil 6.6. Standart verimli motora ait devir sayısı-moment grafiği.

6.3.2. Yüksek verimli motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması

6.3.2.1. Boşta çalışma deneyi

Deneylerde ölçülen değerlerden faz başına değerlerin hesaplandığı işlemler aşağıda verilmiştir:

$P_{in,nl}$ (faz başına güç) değeri eşitlik 2.23' e göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P_{in,nl} = \frac{243}{3} = 81 \text{ W}$$

V_{pnl} (faz başına gerilim) değeri 220 V' dur.

R_c (Demir direnci) bulunurken eşitlik 2.25 kullanılmıştır.

$$R_c = \frac{220^2}{8I} = 597.53 \, \Omega$$

Eşitlik 2.26 kullanılarak S_{pnl} (Faz başına görünür güç) değeri hesaplanmıştır.

$$S_{pnl} = 220 \times 1.68 = 369.60 \, VA$$

$\cos\theta$ değeri eşitlik 2.27 kullanılarak 0.21 bulunmuştur.

I_m (Mıknatıslanma akımı) eşitlik 2.28 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$I_m = 1.68 \times 0.97 = 1.62 \, A$$

Eşitlik 2.29 kullanılarak X_m (Mıknatıslanma reaktansı) değeri bulunmuştur.

$$X_m = \frac{220}{1.62} = 135.80 \, \Omega$$

Çizelge 6.9. Yüksek verimli motorda boşa çalışma deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.

R_c (ohm)	S_{pnl} (VA)	I_m (A)	X_m (ohm)	R_1 (ohm)
597.53	369.60	1.62	135.80	4.5

6.3.2.2. Kısa devre deneyi

Deneylerden ölçülen değerlerden eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanma aşamaları aşağıda verilmiştir:

Eşitlik 2.24 ve 2.30 kullanılarak Z_k (Motor eşdeğer devre faz empedansı) değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$V_k = \frac{79.4}{\sqrt{3}} = 45.84 \, V$$

$$Z_k = \frac{45.84}{3.37} = 13.60 \, \Omega$$

R_k (Motor eşdeğer devre faz direnci) eşitlik 2.31 kullanılarak bulunmuştur.

$$R_k = \frac{315}{3 \times 3.37^2} = 9.24 \, \Omega$$

X_k (Motor eşdeğer devre faz reaktansı) değeri eşitlik 2.32 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_k = \sqrt{13.60^2 - 9.24^2} = 9.97 \, \Omega$$

Rotor direnci eşitlik 2.33 kullanılarak aşağıdaki gibi hesap edilmiştir.

$$R_2 = 9.24 - 4.5 = 4.74 \, \Omega$$

Eşitlik 2.34 ifadesinden $X_1 = X_2 = \frac{9.96}{2} = 4.985 \, \Omega$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.10. Yüksek verimli motorda kısa devre deneyinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri.

R_k (ohm)	R_1 (ohm)	Z_k (ohm)	X_k (ohm)	X_1 (ohm)	X_2 (ohm)
9.24	4.5	13.60	9.97	4.985	4.985

6.3.2.3. Yüklü çalışma deneyi

Çalışmamızda verim hesabı için ilave yük kayıpları çıkış gücünün % 0.5' i alınarak hesap edilmiş, bu değer 7.5 W olarak verim hesabında kullanılmıştır. Sürtünme ve ventilasyon kayıpları, her iki motorun pervane yapısı aynı olduğu için, çıkış gücünün % 3' ü olarak 45 W alınmıştır.

$$P_{\text{çıkış}} = 1500 \, W \, (\text{Çıkış gücü})$$

$$P_{\text{giriş}} = 1920 \, W \, (\text{Giriş gücü})$$

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{1500}{1920} \times 100 = \%78.12 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Verim (η), moment (M), nominal kayma (s_N), devrilme kayması (s_d), hava aralığı gücü (P_{AG}), nominal moment (M_N) değerlerini hesaplamaları aşağıda verilmiştir:

Eşitlik 2.37 kullanılarak nominal moment (M) aşağıdaki gibi hesap edilmiştir.

$$M = \frac{1500}{2 \times \pi \times 2870} \times 60 = 4.99 \, N.m$$

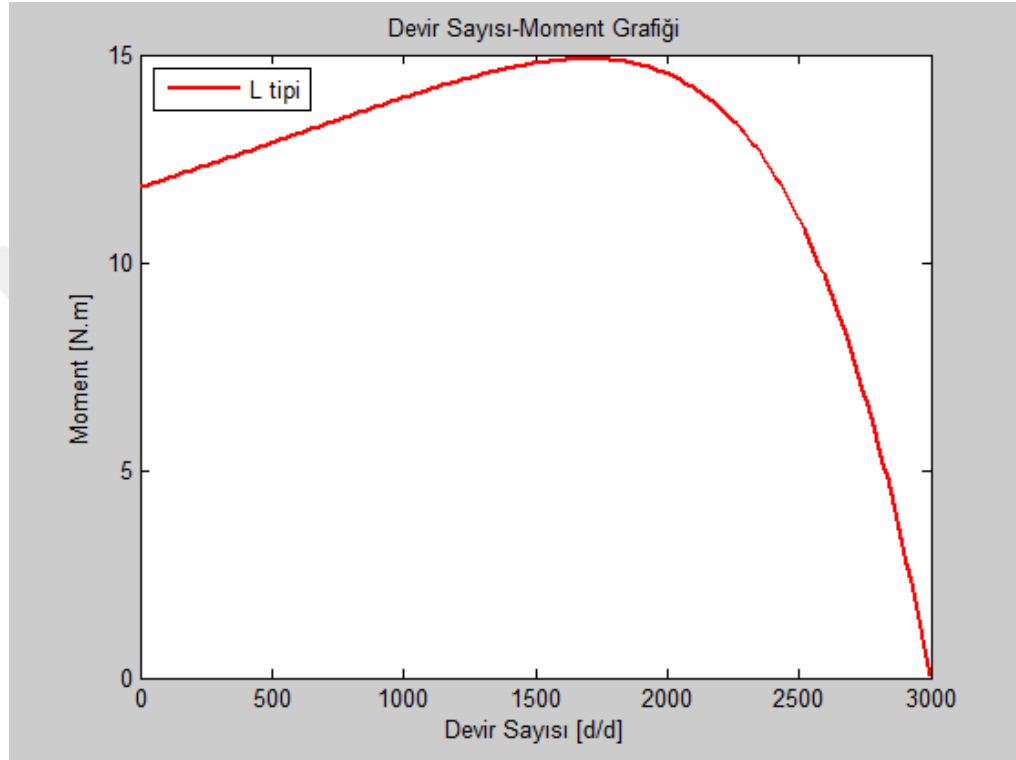
Nominal kayma (s_N) değeri eşitlik 2.38 kullanılarak bulunmuştur.

$$s_N = \frac{3000 - 2870}{3000} = 0.0433 = \% 4.33$$

Devrilme kayması (s_d) eşitlik 2.39' dan bulunmuştur.

$$s_d = \frac{4.74}{9.97} = 0.475$$

Ayrıca yol alma ve devrilme momentleri hesaplanmış. Yol alma momenti (M_{ya}) 11.844 N.m iken devrilme momenti (M_d) 14.908 N.m olarak bulunmuştur.



Şekil 6.7. Yüksek verimli motora ait devir sayısı-moment grafiği.

Çizelge 6.11. Yüksek ve standart verimli motorlara ait eşdeğer devre parametre değerleri.

Motor parametreleri	Yüksek verimli motor	Standart verimli motor
$R_1 (\Omega)$	4.5	4.9
$R_2 (\Omega)$	4.74	4.7
$R_k (\Omega)$	9.24	9.60
$I_m (A)$	1.62	1.90
$I_o (A)$	1.68	1.94
$R_c (\Omega)$	597.53	666.16
$X_m (\Omega)$	135.80	115.71
$Z_k (\Omega)$	13.60	13.84
$X_k (\Omega)$	9.97	9.96
$X_1 (\Omega)$	4.985	4.98
$X_2 (\Omega)$	4.985	4.98

Boşta çalışma deneyinden elde edilen direnç değerleri incelendiğinde; R_1 ve R_c direnç değerlerinin standart verimli motorda daha büyük olduğu, X_m değerinin yüksek verimli motorda daha büyük değer aldığı görülmüştür.

Kısa devre deneyinden elde edilen değerler incelendiğinde; X_k , X_1 ve X_2 değerlerinin her iki motor türü içinde birbirine yakın elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 6.12. Yüksek ve standart verimli motorlara ait kayıp güç değerleri.

	Yüksek verimli motor	Standart verimli motor	Fark (%)
Demir kayıpları (W)	243	218	11.46
Bakır kayıpları (W)	315	345	8.69

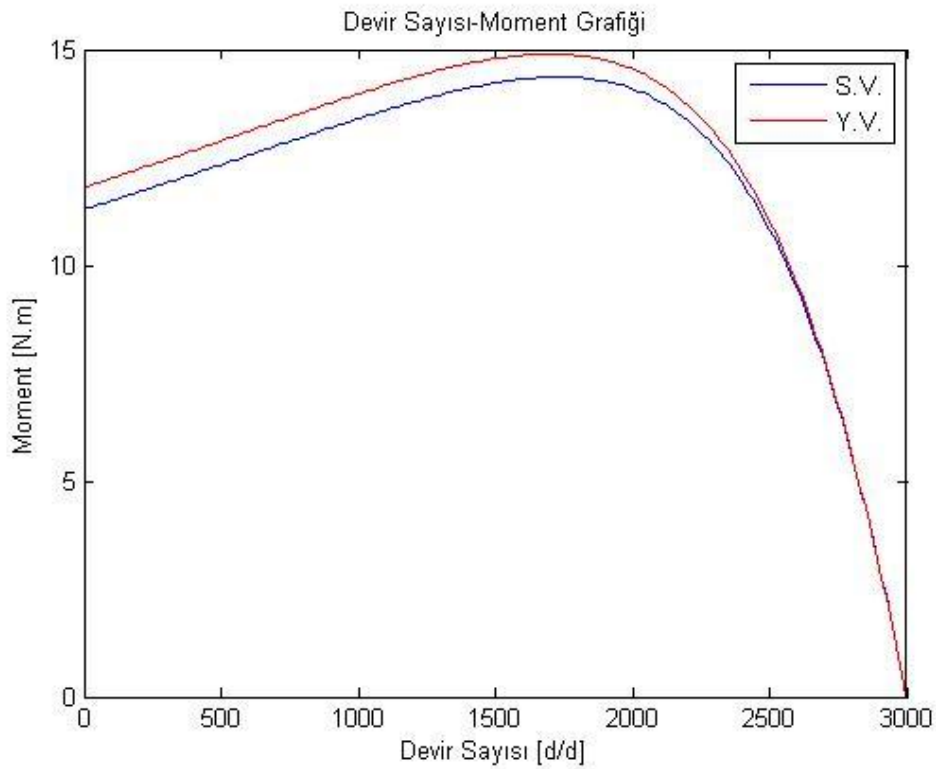
Yüksek verimli motorun boşta çalışma devir sayısı standart verimli motora göre bir miktar fazla çıkmıştır. Buna bağlı olarak kayma değeri küçülmüştür. Kayma değerindeki azalma toplam empedans değerinin artmasına sebep olmuştur. Bu artış ise boşta çalışma akımında azalmaya neden olmuştur. Ayrıca hesaplanan demir akımı değerlerinin birbirine yakın çıkmış olması sebebiyle boşta çalışma güç faktörü değeri artmıştır. Boşta çalışma güç faktörü değerinin yüksek verimli motorda bir miktar büyük çıkmış olması demir kayıplarında artışa neden olmuştur.

Yüksek verimli motorun nominal akım değeri standart verimli motora göre bir miktar azalmıştır. Buna bağlı olarak stator bakır kayıpları stator direncinin de küçük çıkmasından dolayı azalmıştır. Yüksek verimli motorun rotor direncinin bir miktar büyük çıkması rotor bakır kayıplarında 6 Watt'lık bir artışa neden olmuştur. Fakat stator bakır kayıplarının azalması toplam bakır kayıplarında % 8.69 oranında bir azalma ile sonuçlanmıştır.

Çizelge 6.13. Yüksek ve standart verimli motorlara ait moment değerleri.

	Nominal moment (M_N)	Yol alma moment (M_{va})	Devrilme moment (M_d)
Standart verimli motor	5.04	11.34	14.37
Yüksek verimli motor	4.94	11.84	14.90

Her iki motor için nominal moment, yol alma momenti ve devrilme moment değerleri eşitlik 2.40 kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı eşitlikte s kayma değeri 1 alınarak yol alma momenti hesap edilmiş, yine aynı eşitlikte s kayma değeri yerine s_d devrilme kayma değeri kullanılarak devrilme moment değeri bulunmuştur. Hesaplamalar sonucunda nominal moment değeri standart verimli motorda 5.04 N.m olarak bulunurken, yüksek verimli motorda 4.94 N.m olarak bulunmuştur. Yol alma moment değerinin standart verimli motorda 11.340 N.m olduğu, yüksek verimli motorda 11.844 N.m olduğu görülmüştür. Devrilme moment değeri hesaplanmış; söz konusu değer standart verimli motorda 14.370 N.m olarak hesaplanmış, yüksek verimli motorda ise 14.908 N.m olarak hesap edilmiştir. Sonuç olarak yol alma momenti ve devrilme momentinin yüksek verimli motorda daha yüksek değerde olduğu, nominal moment değerinin ise standart verimli motorda daha yüksek değer aldığı görülmüştür.



Şekil 6.8. Her iki motora ait devir sayısı-moment grafiği

Yüklü çalışma deneylerinden elde edilen verim değerleri Çizelge 6.14' de verilmiştir.

Çizelge 6.14. Yüklü çalışma deneyinden elde edilen verim değerleri.

Parametre	Yüksek verimli motor	Standart verimli motor	Fark (%)
Verim (%)	78.12	76.14	2.06

Yapılan deneyler sonucunda eşitlik 2.33 kullanılarak standart verimli motorun verim değeri % 76.14 olarak bulunmuş iken yüksek verimli motorun verimi % 78.12 olarak elde edilmiştir. Bu da yüksek verimli motorun standart verimli motora oranla % 2.06 iyileştirilmesini sağlamıştır.

Nominal yükte yapılan deneyler sonucunda yüksek verimli motorun devir sayısı standart verimli motorun devir sayısından % 1.17 daha fazla elde edilmiştir. Yüksek verimli motorun demir kaybı standart verimli motora oranla % 11.46 daha fazladır. Bakır kayıpları ise standart verimli motorda yüksek verimli motora oranla % 8.69 daha fazladır. Bu sebeplerden yüksek verimli motorda performans artışı sağlanmıştır.

Her iki motorun paket boylarının aynı olduğu tespit edilmiştir. Paket boyları her iki motor için 65 mm olarak ölçülmüştür. Paket boylarının aynı olması sebebiyle bu parametrenin motor verimine etkisinin olmadığı saptanmıştır.

Eşdeğer devre parametrelerinden eşdeğer empedans, eşdeğer direnç, eşdeğer reaktans değerleri her iki motor türü için de yaklaşık aynı değerler elde edilmiştir. Buna bağlı olarak yüklü çalışma deneyinden elde edilmiş olan güç faktörü değerlerinin de birbirini desteklediği görülmektedir.

Kayma değeri eşitlik 2.36 kullanılarak hesaplanmış ve standart verimli motor için % 5.43 iken, yüksek verimli motorda % 4.33 olarak elde edilmiştir.

Her iki motor için eşitlik 2.37 kullanılarak devrilme kaymaları hesap edilmiş; standart verimli motor için 0.471 olarak hesaplanırken, yüksek verimli motor için 0.475 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak her iki motor için hesap edilen devrilme kayması değerleri birbirine yakın elde edilmiştir.

Her iki motorun stator iç çapı 70 mm olarak ölçülmüştür. Standart verimli motorun rotor çapı 69.50 mm iken, yüksek verimli motorun rotor çapı 69.40 mm' dir. Buradan standart verimli motorun hava aralığı uzunluğu 0.25 mm bulunurken yüksek verimli motorun hava aralığı uzunluğunun 0.30 mm olduğu tespit edilmiştir.

7. YORUMLAR VE SONUÇ

Asenkron motorlar geçmişten günümüze kadar büyük bir aşama kaydetmiştir. Motor hacmi, motor parçaları ve kullanılan malzemelerde sağlanan gelişimlerle motor teknolojisi ilerlemiş ve standart verimli motorların yerini yüksek verimli motorlar almıştır.

1.5 kW gücünde AGM 90 S 2 tipindeki standart verimli motor ile yine 1.5 kW gücünde ki AGM2E 90 S 2 tipindeki yüksek verimli motorun fiziksel boyutları, eşdeğer devre parametreleri, moment değişimleri, demir ve bakır kayıpları ile verim değerleri karşılaştırılmıştır.

Her iki motorun fiziksel farklılıklarının tespiti için motorlar demonte edilmiş ve fiziksel parametreleri karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemelerde motor performansına etkileri fazla olan stator ve rotor oluk yapıları, iç-dış çap değerleri, sargı yapıları, kullanılan stator ve rotor nüve malzemeleri (B-H, W/kg) gibi parametrelerin her iki motor için de aynı oldukları tespit edilmiştir.

Ayrıca her iki motor türü için mil çapı, rulman, bilye, kısa devre halkasının eni-boyu, soğutma kanatçıkları, dış gövde malzemesi ve yapısı, stator ve rotor oluk sayıları, fan yapısı vb. parametrelerinin de aynı oldukları görülmüştür.

Yapılan analizler sonucunda demir kayıplarının yüksek verimli motorda % 11.46 daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Bakır kayıpları incelendiğinde yüksek verimli motorun kayıpları standart verimli motora oranla % 8.69 daha az elde edilmiştir.

Standart verimli motorun verim değeri % 76.14 olarak bulunmuş iken yüksek verimli motorun verimi % 78.12 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre yüksek verimli motorun standart verimli motora oranla % 2.06 daha verimli olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Altıntaş, F., Asenkron motorlar, Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı Meslek Yüksekokulu, s. 70.

Burt, C.M., Piao, X., Gaudi, F., Busch, B., Taufik, N.F.N., (2008), Electric motor efficiency under variable frequencies and loads. Journal of irrigation and drainage engineering, 134, s. 129-136.

Cassio, T.C.A., Ricardo, S.T.P., (2008), Three-phase induction motors energy efficiency standards a case study, s. 5.

Çetin, İ., (1993), Asenkron Makina Problemleri (Çözümlü), 1. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi, s. 192.

Chapman, J., (1991), Electric machinery fundamentals, Mc Graw-Hill, Second Edition, Singapore, s. 384-427.

Çolak, İ., (2008), Asenkron motorlar, Seçkin yayıncılık, Ankara.

Corino, S., Romero, E., Mantilla, L.F., (2008), Energy savings by means of energy efficient electric Motors, International Conference On Renewable Energies And Power Quality, (Icrepq'08), s. 5.

Çunkaş, M., (2010), Intelligent design of induction motors by multiobjective fuzzy genetic algorithm, 21, s. 393-402.

Dableh, J.H., Findlay, R.D., Szabados, B., Belmans, R., Lie, S., (1993), Investigation of the air gap influence on the performance and cost optimization of a squirrel cage induction motor, s. 32-37.

Efficient motor use.

<http://www.alapli.beun.edu.tr>

<http://www.assandemir.com/urunlerimiz/dinamo.aspx>

<http://www.gamak.com>

<http://w3.gazi.edu.tr/~okaplan/makina-deney/2deney%202.htm>

<http://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>

http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf

Güzelbeyoğlu, N., (1998), Elektrik Makinaları I, II, Ofset Baskı Atölyesi, 2. Baskı, İstanbul, s. 30-86.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hadziselimovic, M., Marcic, T., Stumberger, B., Zagradisnik, I., (2011), Winding type influence on efficiency of an induction motor, *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 3, s. 61-64.

Ishida, M., Shiga, N., Sadahiro, K., (2003), Improvement of motor performance by use of high-efficiency electrical steels, *Kawasaki Steel Technical Report No. 48*.

Kirtley, J.L.Jr., Richard, F.S., Dale, T.P., Brush, E.F.Jr., (2009), The case for induction motors with die-cast copper rotors for high efficiency traction motors, *SAE Technical Paper*, s. 10.

Mach, M., (2012), Induction motor efficiency improvement by core lengthening, In *Student EEICT, Proceedings of the 18th Conference*, 3, s. 172-176.

Mirzamani, H.O., Choobari, A.L., (2005), Study of harmonics effects on performance of induction motors, *AEE'05 Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Applications of electrical engineering*, s. 389-394.

Mzungu, H.M., Barendse, P., Khan, M.A., Manyage, M., (2008), Determination of effects on induction motor efficiency, *ICUE, Cape Town*.

Özer, O., (2002), Bilgisayar programlı asenkron motor projesi, Lisans tezi Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, s. 89 (yayımlanmamış).

Parasiliti, F., Villani, M., Paris, C., Walti, O., Songini, G., Novello, A., Rossi, T., (2004), Three phase induction motor efficiency improvements with dia-cast copper rotor cage and premium steel, *Speedam, Capri (Italy)*. s. 338-443.

Pyrhönen, J., Haataja, J., Luostarinen, K., Heikki H., High Efficient Induction Motors "Hi-Motors", *Lappeenranta University of Technology*, s. 22.

Ranjith, K.K., Sakthibala, D., Palaniswami, Dr.S., (2010), Efficiency optimization of induction motor drive using soft computing techniques, *International Journal of Computer Applications*, 3, No. 1, s. 6-12.

Roy, P.V., Slaets, B., Belmans, R., (2009), Induction motor efficiency: a number of with many meanings, http://www.leonardo.energy.org/webfm_send/2637.

Saçkan, A.H., (1996), *Elektrik Makinaları 3*, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, s. 246.

Sarıyıldız, M., (2001), Asenkron motorlar, Lisans tezi Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, s. 43, (yayımlanmamış).

Singh, G., Sharma, N.K., Tiwari, P., (2010), Energy efficient industrial motors, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, s. 7904-7913.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Van, W.A., Khan, M.A., Barendse, P.S., (2009), Testing and efficiency of standard and energy efficient induction motors, Proceedings of Industrial & Commercial Use of Energy, Somerset West, South Africa. Cape Town: Cape Peninsula University of Technology, s. 5.

<http://www.usmotors.com/TechDocs/ProFacts/Voltage frequency-Variation.aspx>.

Widell, B., (2007), High efficiency motors and nuisance starting trips, s. 8.

William, R., Finley, M.M.H., (2000), Selection of copper vs. aluminum rotors for induction motors, Petroleum and Chemical Industry Conference, Record of Conference Papers. Industry Applications Society 47th Annual, s. 187 – 197.

Yadav, J.G., Srivastava, S.P., (2012), New improved PSO based parameter estimation for energy efficient control of induction motor drive, International Journal of Electronics Engineering, 4, s. 95– 99.

Yanawati, Y., Daut, I., Nor, S.S., Pungut, I., Syatirah, M.N., Gomesh, N., Rafidah, A.R.S., Haidar, N., (2012), Efficiency increment on 0.35 mm and 0.50 mm thicknesses of non-oriented steel sheets for 0.5 hp induction motor, International Journal of Materials Engineering, 2, No. 2, s. 1-5.

Yetgin, A.G., (1998), Asenkron motorlar, Ders notu Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, s. 43, Konya (yayımlanmamış).

Yetgin, A.G., Akbilek, N., (2005), Asenkron motorlarda stator oluk geometrisinin değişiminin stator kaçak reaktansına etkisinin yapay sinir ağları ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmesi. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği 11.Ulusal Kongresi, İstanbul, s. 312–319.

Yoon, M.K., Jeon, C.S., Kauh, S.K., (2002), Efficiency increase of an induction motor by improving cooling performance, IEEE Transactions on Energy Conversion, 17, 1, s. 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

07.09.1988 tarihinde Emet/KÜTAHYA' da doğdu. Ortaöğrenimini Kütahya Cumhuriyet İ.Ö.O' lunda tamamladı. Lise Öğrenimini Kütahya Ali Güral Lisesinde tamamladı. Lisans eğitimini 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde bitirdi. Aynı yıl başlamış olduğu yüksek lisans eğitimini 2015 yılında Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde bitirdi. Şu an TCDD' de Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak çalışmaktadır.

