

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**SÜRÜCÜ BESLEMELİ FARKLI VERİM SINIFLARINDAKİ  
ASENKRON MOTORLARDA IEC STANDARTLARINA GÖRE  
PERFORMANS ANALİZİ**

**Osman GÜÇTEKİN**

**Danışman  
Prof. Dr. Nevzat ONAT**



**MANİSA-2020**

**Osman  
GÜÇTEKİN**

**SÜRÜCÜ BESEMELİ FARKLI VERİM SINIFLARINDAKİ ASENKRON  
MOTORLARDA IEC STANDARTLARINA GÖRE PERFORMANS ANALİZİ**

**2020**

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Osman GÜÇTEKİN**



# İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER .....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ .....	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Literatür Taraması .....	2
1.2. Tezin Amacı .....	9
2. GENEL BİLGİLER .....	11
2.1. Asenkron Motorların Yapısı.....	11
2.1.1. Stator.....	12
2.1.2. Rotor .....	13
2.2. Asenkron Motorların Çalışma Prensibi.....	14
2.2.1. Döner Alan.....	15
2.2.2. Üç Fazlı Asenkron Motorun Çalışma İlkesi .....	17
2.2.3. Kayma.....	18
2.3. Asenkron Motor Tasarım Sınıfları .....	19
2.3.1. A Tasarım Sınıfı Motor .....	21
2.3.2. B Tasarım Sınıfı Motor.....	21
2.3.3. C Tasarım Sınıfı Motor.....	21
2.3.4. D Tasarım Sınıfı Motor .....	21
2.4. Asenkron Motor Tasarımındaki Yönelimler .....	22
2.5. Asenkron Motorlarda Kayıplar ve Güç Dengesi.....	22
2.6. Asenkron Motorlarda Verim Sınıfları .....	24
2.7. Asenkron Motor Sürücüleri.....	29
2.8. Asenkron Motor Eşdeğer Devresi .....	29
2.8.1. Rotor Devre Modeli .....	30
3. MATERYAL VE METOD .....	32
3.1. Motorlar.....	32
3.2. Asenkron Motor Sürücü .....	33
3.3. Veri Toplama Düzenekleri .....	34
3.4. LabVIEW Programı .....	35
3.5. Deney Düzeneği ve Deney Blok Şeması.....	36
3.6. Deneyler .....	38
3.6.1. Stator Direnci İçin Doğru Akım Deneyi.....	38
3.6.2. Motor Boşta Çalışma Deneyi.....	38
3.6.3. Kısa Devre Deneyi.....	40
3.6.4. Motor Yüklü Çalışma Deneyi.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	43
4.1. IE2 Verim Sınıfındaki Asenkron Motora İlişkin Deneyler .....	43
4.1.1. Doğru Akım Deneyi .....	43
4.1.2. Boşta Çalışma Deneyi.....	43
4.1.3. Kısa Devre Deneyi.....	44
4.1.4. Yüklü Çalışma Deneyi.....	44
4.2. IE3 Verim Sınıfındaki Asenkron Motora İlişkin Deneyler .....	44

4.2.1. Doğru Akım Deneyi .....	44
4.2.2. Boşta Çalışma Deneyi.....	45
4.2.3. Kısa Devre Deneyi.....	45
4.2.4. Yüklü Çalışma Deneyi.....	45
4.3. IE2 ve IE3 Verim Sınıfındaki Asenkron Motorların Eşdeğer Devreleri .....	45
4.4. IE2 ve IE3 Verim Sınıfındaki Asenkron Motor Parametrelerinin Kıyaslanması .....	46
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	51
KAYNAKLAR .....	55
ÖZGEÇMİŞ .....	59



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AC</b>	Alternatif akım
<b>B</b>	Manyetik akı yoğunluğu
<b>Cos<math>\theta</math></b>	Boşta çalışma deneyi güç faktörü
<b>Cos<math>\theta_k</math></b>	Kısa devre deneyi güç faktörü
<b>DC</b>	Doğru akım
<b>f<sub>e</sub></b>	Frekans
<b>I<sub>0</sub></b>	Boşta çalışma deneyi akımı [Amper]
<b>I<sub>dc</sub></b>	Doğru akım deneyi akımı [Amper]
<b>I<sub>k</sub></b>	Kısa devre deneyi akımı [Amper]
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>m</b>	Faz sayısı
<b>n<sub>r</sub></b>	Rotor devir sayısı
<b>n<sub>s</sub></b>	Senkron devir sayısı
<b>p</b>	Kutup sayısı
<b>P<sub>1</sub></b>	Motor giriş gücü [Watt]
<b>P<sub>2</sub></b>	Motor çıkış gücü [Watt]
<b>P<sub>conv</sub></b>	Dönüştürülmüş güç [Watt]
<b>P<sub>cu1</sub></b>	Stator bakır kaybı [Watt]
<b>P<sub>cu2</sub></b>	Rotor bakır kaybı [Watt]
<b>P<sub>fe</sub></b>	Motor toplam demir kaybı [Watt]
<b>P<sub>fe1</sub></b>	Stator demir kaybı [Watt]
<b>P<sub>fe2</sub></b>	Rotor demir kaybı [Watt]
<b>P<sub>i</sub></b>	Motor hava aralığı gücü [Watt]
<b>P<sub>kç</sub></b>	Rastgele yük kaçak kaybı [Watt]
<b>P<sub>mi</sub></b>	Motor mili gücü [Watt]
<b>P<sub>rot</sub></b>	Motor sürtünme vantilasyon ve rastgele yük kaçak kayıp toplamı [Watt]
<b>P<sub>st+v</sub></b>	Motor sürtünme ve vantilasyon kaybı [Watt]
<b>R<sub>1</sub></b>	Stator direnci [ohm]
<b>R<sub>1fe</sub></b>	Demir direnci [ohm]
<b>R<sub>1fe</sub>'</b>	Düzenlenmiş demir direnci [ohm]
<b>R<sub>2</sub></b>	Rotor direnci [ohm]
<b>R<sub>k</sub></b>	Kısa devre deneyi eşdeğer direnci [ohm]

<b>R<sub>sac</sub></b>	Stator alternatif akım direnci [ohm]
<b>R<sub>sdc</sub></b>	Stator doğru akım direnci [ohm]
<b>s</b>	Kayma
<b>T<sub>1</sub></b>	Motor iç sıcaklığı [°C]
<b>T<sub>2</sub></b>	Motor dış sıcaklığı [°C]
<b>V</b>	Volt
<b>V<sub>0</sub></b>	Boşta çalışma deneyi besleme gerilimi [Volt]
<b>V<sub>dc</sub></b>	Doğru akım deneyi besleme gerilimi [Volt]
<b>V<sub>k</sub></b>	Kısa devre deneyi besleme gerilimi [Volt]
<b>w</b>	Rotorun açısal hızı [rad/s]
<b>w<sub>r</sub></b>	Rotor akımlarının açısal hızı [rad/s]
<b>w<sub>s</sub></b>	Stator akımlarının açısal hızı [rad/s]
<b>X<sub>1</sub></b>	Stator reaktansı [ohm]
<b>X<sub>1h</sub></b>	Mıknatıslanma reaktansı [ohm]
<b>X<sub>2</sub></b>	Rotor reaktansı [ohm]
<b>X<sub>k</sub></b>	Kısa devre deneyi eşdeğer reaktansı [ohm]
<b>Z<sub>0</sub></b>	Boşta çalışma deneyi eşdeğer empedansı [ohm]
<b>Z<sub>k</sub></b>	Kısa devre deneyi eşdeğer empedansı [ohm]
<b>η</b>	Motor verimi [%]
<b>γ<sub>el</sub></b>	Elektriksel açı
<b>γ<sub>geo</sub></b>	Geometrik açı
<b>CEMEP</b>	Avrupa elektrik makinaları ve elektroniği İmalatçılar komitesi
<b>EEF1</b>	CEMEP yüksek verim sınıfı
<b>EEF2</b>	CEMEP arttırılmış verim sınıfı
<b>EEF3</b>	CEMEP düşük verim sınıfı
<b>EU MEPS</b>	Avrupa Minimum enerji performansları standartları
<b>IE1</b>	IEC standart verimli sınıfı
<b>IE2</b>	IEC yüksek verimli sınıfı
<b>IE3</b>	IEC çok yüksek verimli sınıfı
<b>IE4</b>	IEC süper çok yüksek verimli sınıfı
<b>IEC</b>	Uluslararası elektroteknik komisyonu
<b>NEMA</b>	Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği
<b>NI</b>	National Instruments

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Sincap kafesli üç fazlı asenkron motor kesiti ve kısımları .....	12
Şekil 2.2. Stator sargıları ve rotor .....	12
Şekil 2.3. Asenkron motor rotorundaki sincap kafes yapısı .....	13
Şekil 2.5. Asenkron makinalarda döner alan .....	17
Şekil 2.7. NEMA asenkron motorun tasarım tipine göre moment-hız eğrisi. ....	20
Şekil 2.8. NEMA asenkron motorun sınıflarına göre rotor oluk şekilleri. ....	20
Şekil 2.9. Asenkron motor güç dengesi diyagramı .....	24
Şekil 2.10. IEC 60034-30 standardına göre nominal verimlilik sınıfı limitleri .....	25
Şekil 2.11. Dünya Çapında Motor MEPS [41]. ....	26
Şekil 2.12. Elektrik motorlarının küresel pazardaki payının 2016 yılındaki dağılımı ve 2021 yılına ait tahmini dağılımı [41].....	27
Şekil 2.13. Asenkron motor sürücü .....	29
Şekil 2.14. Asenkron motor stator eşdeğer devresi.....	30
Şekil 2.15. Asenkron motor rotor eşdeğer devresi.....	31
Şekil 2.16. Asenkron motor bir faz transformatör eşdeğer devresi .....	31
Şekil 2.17. Asenkron motor rotor devresi statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi	31
Şekil 3.1. (a) IE2 ve (b) IE3 asenkron motor etiketleri.....	32
Şekil 3.2. (a) IE2 ve (b) IE3 asenkron motor görselleri.....	32
Şekil 3.3. Asenkron motor sürücüsü .....	33
Şekil 3.4. Asenkron motor sürücü devre şeması.....	33
Şekil 3.5. (a) NI 9211 modülü (b) NI 9211 modülünün bir kanalının devre şeması .	34
Şekil 3.6. (a) NI 9227 modülü (b) NI 9227 modülünün bir kanalının devre şeması .	34
Şekil 3.7. (a) NI 9242 modülü (b) NI 9242 modülünün devre şeması .....	35
Şekil 3.8. NI ölçüm modülleri ve NI cDAQ 9174 şasesi.....	35
Şekil 3.9. LabVIEW Tabanlı Veri Kaydı Sistemi Blok Diyagramı.....	36
Şekil 3.10. Deney düzeneği .....	37
Şekil 3.11. Devre şeması.....	37
Şekil 3.12. Doğru akım deneyi devresi.....	38
Şekil 3.13. Asenkron motor boşta çalışma deneyi devresi .....	39
Şekil 3.14. Asenkron motor kısa devre deneyi devresi.....	40
Şekil 3.15. Asenkron motor yüklü çalışma deneyi devresi.....	42
Şekil 4.1. IE2 verim sınıfındaki asenkron motorun elde edilen eşdeğer devresi.....	46
Şekil 4.2. IE3 verim sınıfındaki asenkron motorun elde edilen eşdeğer devresi.....	46
Şekil 4.3. IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-rotor devir sayısı grafiği.....	47
Şekil 4.4. IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-kayma grafiği .....	48
Şekil 4.5. IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-giriş gücü grafiği.....	48
Şekil 4.6. IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-çıkış gücü grafiği .....	49
Şekil 4.7. IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-verim grafiği .....	49
Şekil 4.8. IE2 ve IE3 asenkron motorların tam yükte güç dağılım grafikleri.....	50



## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 2.1.</b> Üç fazlı akımların $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ anlarındaki değerleri .....	16
<b>Tablo 2.2.</b> IEC/EN ile Avrupa, Amerika ve diğer benzer yerel düzenlemeler arasındaki karşılaştırma [42] .....	26
<b>Tablo 2.3.</b> Motor teknolojileri ve enerji verimlilik potansiyelleri [43] .....	28
<b>Tablo 2.4.</b> 0,75 kW ile 200 kW arası interpolasyon katsayıları [43] .....	28
<b>Tablo 4.1.</b> IE2 motorunun doğru akım deneyinde elde edilen sonuçlar.....	43
<b>Tablo 4.2.</b> IE2 motorunun boşta çalışma deneyinde hesaplanan parametreler .....	43
<b>Tablo 4.3.</b> IE2 motorunun kısa devre deneyinde hesaplanan parametreler.....	44
<b>Tablo 4.4.</b> IE2 motorunun yüklü çalışma deneyinde hesaplanan parametreler.....	44
<b>Tablo 4.5.</b> IE3 motorunun doğru akım deneyinde elde edilen sonuçlar.....	44
<b>Tablo 4.6.</b> IE3 motorunun boşta çalışma deneyinde hesaplanan parametreler .....	45
<b>Tablo 4.7.</b> IE3 motorunun kısa devre deneyinde hesaplanan parametreler.....	45
<b>Tablo 4.8.</b> IE3 motorunun yüklü çalışma deneyinde hesaplanan parametreler.....	45

## TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nevzat ONAT'a, yüksek lisans eğitimim sırasında maddi ve manevi her yönden yardımcı olan, desteğini hiç eksik etmeyen Sayın Prof. Dr. Sezai TAŞKIN'a, yoğun iç temposu arasında çok değerli vakitlerini ayırarak bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Etem KÖSE'ye, çalıőmamın her aőamasında benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Tuğberk ÖZMEN'e ve son olarak hayatım boyunca yaptığım bütün iőlerde beni hep destekleyen ve her zaman arkamda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Osman GÜÇTEKİN  
Manisa, 2020



## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

#### Sürücü Beslemeli Farklı Verim Sınıflarındaki Asenkron Motorlarda IEC Standartlarına Göre Performans Analizi

Osman GÜÇTEKİN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nevzat ONAT

Asenkron motorlar, kontrol kolaylığı, yüksek moment, az bakım gerektirme ve ekonomik olmaları gibi avantajlarından dolayı, endüstriyel tesislerde ve evsel cihazlarda tahrik elemanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Sanayideki elektrik makinaları aracılığıyla gerçekleşen elektrik tüketiminin dünyadaki payı % 69, Türkiye'deki payı da yaklaşık % 70'dir. Diğer taraftan elektrik motorlarının kullanım ömürleri boyunca ortaya çıkan maliyetin yaklaşık %3'lük kısmı satın alma; geriye kalan %97'lik kısmı ise motorun tükettiği elektrik enerjisi maliyetidir. Bu nedenle elektrik motorlarındaki verimlilik sınıfları önem arz etmektedir. IEC 60034-30-1 standardına göre elektrik makinaları IE1, IE2, IE3 ve IE4 olarak sınıflandırılmaktadır.

Tezin giriş ve genel bilgiler bölümlerinde asenkron motorların genel özellikleri, çalışma prensipleri ve standart verim sınıfları hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca, bu motorlarda verimlilik analizi, verimin artırılmasına yönelik uygulamalar ve standartlar üzerine yoğunlaşan çalışmalar da incelenmiştir. Tezin uygulama kısmında, IE2 ve IE3 verim sınıfına ait sürücülerden beslenen iki farklı asenkron motor için IEC 60034-2 standardına uygun olarak deney düzeneği hazırlanıp, sargı direnci ölçme, boşa çalışma, kısa devre ve yüklü çalışma deneyleri yapılmıştır. Ölçümler LabVIEW programıyla bilgisayar ortamına aktarılmış ve yorumlanmıştır. Motor iç ve dış sıcaklık değerleri ölçülerek, sıcaklığa bağlı direnç değerleri düzenlenmiştir.

Doğru akım deneyi ile stator direnci hesaplanmıştır. Demir direnci ve mıknatıslanma reaktansı boşa çalışma deneyi ile, rotor direnci ile stator ve rotor reaktansları ise kısa devre deneyi ile hesaplanmıştır. Bu sayede asenkron motorların eşdeğer devre parametreleri üzerinden asenkron motorlarda meydana gelen kayıplar hesaplanmış ve makine etiketlerindeki verim değerleri doğrulanmıştır. Ayrıca asenkron motorda meydana gelen her bir kayıp parametresinin verim üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. İki farklı verim sınıfındaki asenkron motorların tam eşdeğer devreleri elde edilerek parametreler arasındaki farklılıklar ortaya konulmuştur. Ayrıca, yük akımına karşı kayma, güç ve verim değerlerindeki değişimler de karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Asenkron motor, IEC 60034-2, eşdeğer devre, LabVIEW, asenkron motor sürücüsü.

2020, 59 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Performance Analysis of Driver Fed Induction Motors in Different Efficiency Classes According to IEC Standards**

**Osman GÜÇTEKİN**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Nevzat ONAT**

Induction motors are widely used in both home and industrial types due to their advantages such as easy control, high torque values, low maintenance requirements and being economical. The share of world electricity consumption in industry occurs in the electrical machinery 69%, the share of Turkey is about 70%. Approximately 3% of the cost that occurs during the life of electric motors is purchase; the remaining 97% is the cost of electricity consumed by the electrical machines. Efficiency classes in electric motors are important. According to the IEC 60034-30-1, electrical machines are classified into four different efficiency levels, such as IE1, IE2, IE3 and IE4.

In the introduction and general information sections of the thesis, about the general characteristics, operating principles and standardized efficiency classes of induction motors were given. Focusing on efficiency analysis, practices and standards for increasing efficiency in the motors are also examined. In the test part of the thesis, experimental setup was prepared in accordance with the IEC 60034-2 for two different induction motors fed from the drive of IE2 and IE3 classes. In the experimental setups, winding resistance measurement, no-loaded, short circuit and loaded experiments were performed for both motors. The measurements in the experiments were transferred to the LabVIEW program and interpreted. Internal and external motor temperature values were measured and resistance values regulated depending on the temperature.

Stator resistance is calculated by direct current test. Iron resistance and magnetization reactance were calculated by running the no-load test, rotor resistance and stator and rotor reactances were calculated by short circuit test. In this way, losses in induction motors are calculated over the equivalent circuit parameters of induction motors and the efficiency values in the machine labels are verified. In addition, the effect of each loss parameter occurring in the induction motor on the efficiency was analyzed. In two different efficiency classes used in the thesis study, the exact equivalent circuits of induction motors fed by the drive are obtained and the differences between the parameters are revealed. In addition, changes in fractional slip, power and efficiency values against load current were obtained comparatively

**Keywords: Induction motor, IEC 60034-2, equivalent circuit, LabVIEW, induction motor driver.**

**2020, 59 pages**

## 1. GİRİŞ

Asenkron motorlar; ekonomik olmaları, yüksek momente sahip olmaları, daha az bakıma ihtiyaç duymaları, sürücü teknolojileri ile devir sayılarının çok geniş aralıklarda ayarlanabilmesi, farklı faz sayılarında çalışacak şekilde üretilibilmeleri, çalışmaları sırasında elektrik arkı oluşturmamaları ve çok küçük güçlerden 3500 kW güce kadar üretilibilmeleri nedeniyle sanayide en fazla kullanılan motor türüdür.

Hem ev tipi hem de endüstriyel uygulamalar düşünüldüğünde elektrik enerjisinin büyük bir kısmı elektrik motorları tarafından tüketilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansının tahminlerine göre dünya çapındaki elektrik tüketiminin yaklaşık %46'sı elektrik motorlardan kaynaklıdır. Sanayi sektörünün toplam elektrik tüketiminin ise yaklaşık %69'u elektrik motorlarından kaynaklıdır [1].

Türkiye'de ise, toplam elektrik enerjisinin %47,2'si sanayi sektöründe tüketilmektedir. Sanayide tüketilen elektrik enerjisinin %70'i elektrik motorlarında tüketildiğini dikkate alınırsa, toplam tüketimin %33,11'ini tek başına elektrik motorlarının oluşturduğu görülmektedir [2].

Ayrıca elektrik motorlarındaki satın alma ve sarım maliyeti, ortalama motor ömrü boyunca toplam maliyetin % 3'ünü oluşturmaktadır. Elektrik motorunun kullanım ömrü boyunca tükettiği elektrik enerjisinin maliyeti ise toplam maliyetin %97'sine tekabül etmektedir [2]. Bu sebeple enerji verimliliği kavramının gerçek anlamda hayata geçirilmesinde elektrik motorlarının verimlerinin artırılması çok doğru bir yaklaşımdır.

Asenkron motorların enerji verimliliğinin artırılması ile birlikte elde edilecek maddi ve çevresel kazançların fırsatının farkına varan gelişmiş ülkeler tarafından sanayi sektörüne yönelik motor dönüşüm programları yürütülmekte ve sonuçlar izlenmektedir. Ülkemiz de benzer çalışmalar kapsamında Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından "Sanayide Elektrik Motorlarının Dönüşüm Programı" yürütülmüştür. Söz konusu program kapsamında 7,5 kW üzeri 95.000 adet elektrik motorunun enerji verimliliği analiz edilmiştir. Verimsiz motorların tamamının dönüşümünün sağlanması durumunda yıllık 33,7 milyon MWh elektrik tasarruf edileceği ve bu sayede 8.5 milyar TL'lik bir ekonomik kazancın ekonomimize

kazandırılacağı tespit edilmiştir. Motor dönüşüm programının yatırım tutarı ise yaklaşık 14,6 milyar TL olup, verimsiz motorların değiştirilmesiyle yatırımın geri ödeme süresinin 21 aya kadar düşebileceği hesaplanmıştır [2], [3].

Elektrik enerjisi ile çalışan hemen hemen tüm ürünlerde enerji tüketim sınıfları tanımlanmıştır. Endüstriyel motorlar için de International Electrotechnical Commission (IEC), National Electrical Manufacturers Association (NEMA) gibi kuruluşların belirlemiş olduğu verim sınıfları vardır. IEC 60034-30-1 standardı; döner elektrik makinaları için IE1, IE2, IE3 ve IE4 olmak üzere motorların verim seviyelerini sınıflandırmıştır. Avrupa Birliği ve Türkiye yayınladığı yönetmeliklerle 1 Ocak 2017 tarihi itibarı ile 0,75 kW ve üzeri motorlar için IE3 verimlilik sınıfını zorunlu hale getirmiştir [2]. Devreye giren yönetmelikler ve enerjiyi verimli kullanma bilincinin artması sonucunda, motor verimlerinin IE3 ve üzeri verim sınıflarına çıkarılması günümüzde motor üreticilerinin üzerinde durdukları konulardan biridir.

Bu tezde, sürücüden beslenen farklı verim sınıflarındaki asenkron motorların IEC 60034-2 standardına göre test koşulları oluşturularak performans karşılaştırması yapılacaktır. Üretici firmalar tarafından makine etiketlerinde yer alan verim değerlerinin doğrulanması ve kayıpların ayrılarak makine verimi üzerindeki etkileri deney sonuçlarına dayalı olarak analiz edilecektir. Böylece indüksiyon motorlarının verimlerini artırma konusunda hangi bileşenlerinde ne tür değişiklikler yapıldığı analiz edilecektir. Sonuç olarak asenkron motorların IE5 verim standardına yükseltilmesinde potansiyel olarak hangi kayıpların azaltılma şansının daha fazla olduğu belirlenmeye çalışılacaktır.

### **1.1. Literatür Taraması**

Lukaszczyk (2014) yılında yaptığı çalışmada, asenkron makinalardaki kayıplara ilişkin temel bilgiler ışığında asenkron motorların IE4 verim sınıfına ulaşabilmeleri için bazı kuralları ortaya koymuştur. Çalışmada asenkron makinalara ek olarak mıknatıslı motorlar, anahtarlamalı relüktans motorlar ve senkron relüktans motorlar da dikkate alınarak, sadece verim açısından değil maliyet, büyüklük, ağırlık, hız aralığı gibi parametreler açısından da motorlar kıyaslanmıştır. Verimlilik açısından mıknatıslı makinalar en iyi sonucu verse de asenkron motorların da uygun tasarım ve üretim gerçekleştiğinde IE4 verim sınıfına ulaşabileceği ifade edilmiştir [4].

Verucchi ve ark. (2017) asenkron makinanın oluklarına dolgu malzemesi yerleştirmiştir. Farklı manyetik iletkenliğe ve şekle sahip dolgu malzemeleri kullanılarak yapılan analizlerde düşük güçlü motorlar kullanılmıştır. Bu analizlerde motorlardaki bakır ve demir kayıplarının azalıp, makinanın toplam veriminin arttığı ortaya konulmuştur [5].

Mack ve ark. (2015) altı asenkron makinanın verimlilik değerini arttırmak için farklı yöntemler uygulamış ve ölçümler yapmıştır. Yapılan ölçümlerde motorların seri üretimdeki hali ile iyileştirilmiş hali arasındaki sonuçlar kıyaslanmıştır. Verimi arttırmak için stator sargı dirençlerinin azaltılması, çekirdeğin boyunun uzatılması, oluk şeklinin optimizasyonu gibi uygulamalar yapılmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarına göre motorların toplam kayıpları içindeki en büyük payın stator sargılarındaki Joule kayıpları olduğu ortaya konulmuştur. Tüm iyileştirme yöntemlerinin analizinin sonucunda verimi arttırmanın en iyi yolunun nüve boyunun uzatılması ve stator sargılarında daha büyük çaplı iletkenlerin kullanılması olduğu ortaya çıkarılmıştır [6].

Carvalho ve ark. (2018) üç fazlı asenkron motorun işletme koşulları ve verimlilik parametreleri üzerinden gerçek zamanlı kablosuz uzaktan izleme yapılmıştır. İşletme koşulları okunarak ve eşdeğer devre parametreleri kullanılarak motorun verimi hesaplanmıştır [7].

Çunkaş ve ark (2010) işletmedeki asenkron motorların verim hesabı için baskın sıralı genetik algoritma (NSGA-II) ve geliştirilmiş gç pareto evrim algoritması (SPEA2) kullanılmıştır. 7.5 HP gücündeki asenkron motor üzerinde yapılan testler verim hesabının %3'den daha düşük bir hata payıyla alındığını göstermiştir [8].

Zhang ve ark. (2011) sıcaklığın, gerilimin ve yükün motorun verimliliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. IEEE 112B test standartları kullanılarak teori ve uygulamada ortaya çıkan durumlar arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Çalışmada ortam sıcaklığının iletken kayıpları başta olmak üzere motor kayıpları ve dolayısıyla makine performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görlmştir. Motor, kısmi yüklenme koşullarında çalıştırıldığında elde edilen verimin katalog veriminden daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur [9].

Agamlob (2011) bu çalışmada asenkron makinaların veriminin hesaplanması için güçleri 0 – 250 HP arasında değişen 1000 adet asenkron motora ait verileri kullanarak doğrudan hesaplama ve dolaylı yoldan hesaplama yöntemlerini kıyaslamıştır. Doğrudan hesaplama yönteminde verimi giriş ve çıkış güçleri üzerinden hesaplarken; dolaylı hesaplama yönteminde ise kayıpları ölçerek verimi hesaplamıştır. Çalışma sonucuna göre aynı motor için doğrudan hesaplama yöntemiyle bulunan sonuçlar, dolaylı yoldan hesaplama yönteminde bulunan sonuçların %1.26 üzerindeki veya %1.86 altındaki limitler arasında olacak şekilde değişiklik göstermiştir. Ayrıca bu çalışma, bu iki yöntem arasındaki farklılığın küçük güçteki motorlarda büyük güçlü motorlara göre daha fazla olduğunu ortaya koymuştur [10].

Jirasuwankul ve ark. (2013) asenkron motorların veriminin hesaplanmasında hava aralığı gücüne ve rotor kayıplarına bağlı olarak Kalman filtreleme yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada makine eşdeğer devre modeli üzerinden parametrelerin durum denklemleri Kalman filtresi yöntemine uygulanmış ve makine verimi bu şekilde hesaplanmıştır. Ayrıca aynı parametrelere sahip bir motor laboratuvar ortamında test edilmiştir. Hesaplanan değerler ile test sonuçları kıyaslandığında benzer değerler gözlenmiştir [11].

Santos ve ark. (2015) asenkron motorun eşdeğer devre modeli temelinde kayıplarının ayrıştırıldığı ve bakteriyel yiyecek arama algoritmasının kullanıldığı bir yöntem izlemiştir. Bu yöntemde eşdeğer devreden elde edilen matematiksel model üzerinden harmoniklerin asenkron motor performansına etkilerinin iyi bir şekilde ortaya çıkarıldığı, yüksek dereceli harmonikleri içeren deneysel çalışmalar ile görülmüştür. Bu yöntem ile yapılan deneylerin sonuçları, %50'nin üzerinde yüklenen asenkron makinalar için verim hesabındaki hata oranının %2'nin altında kaldığını göstermiştir [12].

Salomon ve ark. (2015) asenkron motorun verimlilik hesabında hava aralığı moment modelini kullanmıştır. Bu yöntemde mekanik kayıpları içeren stator direnç parametresinin yazılması amaçlanmıştır. Stator direnci üzerinden mil momenti ve verimlilik için yaklaşıklık hesabı yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar deney sonuçları ile kıyaslandığında hata oranının oldukça düşük olduğu ortaya konulmuştur [13].



Esen ve ark. (2017) endüstriyel koşullarda çalışma veriminin hesaplanması için yeni bir alan yöntemini ele almıştır. Önerilen bu yöntem düşük verimde çalışan motorların, daha verimli olanlar ile değiştirilmesi sürecini kolaylaştıran ve aynı zamanda ucuz olan bir yöntemdir. Çalışmada önerilen yöntem, 60034-2-1 Uluslararası Elektro-teknik Komisyonunun standart eşitliklerine dayanmaktadır. Değişkenlerin ve sabitlerin regresyon analizi ile belirlenmesi için 437 farklı yük noktasının verimlilik değerine bağlı 86 test yapılmıştır. Çalışmada ortaya konulan yöntemin sadece işletmedeki değil aynı zamandaki yüksüz motorlara da uygulanabileceği ortaya konulmuştur [14].

Saini ve ark. (2016) üç farklı asenkron motorun rotorlarında bakır ve alüminyum malzemesi kullanılması durumlarında demir kayıplarının iyileştirilerek, oda sıcaklığından 70°C'deki çalışma sıcaklıklarına kadar olan işletme şartlarındaki performansını analiz etmiştir. Bunun için farklı rotor ve stator tasarım parametreleri alınarak sıcaklık şartlarındaki değişimlere de bağlı olarak verim değerleri kıyaslanmıştır. MATLAB ve genetik algoritma kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilip hassasiyet analizi korelasyon matrisi üzerinden yapılmıştır. Normal çalışma sıcaklığında bakır malzeme ile yapılan kafesli motorda nominal hızdaki verim %88.75 değerinde ölçülürken alüminyum malzeme kullanıldığında %87.95 olarak ölçülmüştür. Demir kayıpları optimize edilip geniş bir çalışma sıcaklığı aralığında yapılan testler sonucunda, rotoru bakır kafesli motorun verimi %87.16; rotoru alüminyum kafesli motorun ise %86.29 ölçülmüştür. Bu çalışma ile rotoru bakır kafesli motorun toplam performansının rotor kafesinde alüminyum malzeme kullanılan motorun performansından daha iyi olduğu ortaya konulmuştur [15].

Agamloh ve ark. (2017) asenkron makinaların kayıplarının ayrıştırılabilmesi ve verimlerinin ölçülmesi için gerekli olan dinamometre ve sinüs biçimli değişken gerilim kaynağı gibi ekipmanlar yerine değişken frekanslı motor sürücüsü kullanarak IEEE 112B ve IEC 60034-2-1 standart testlerinin gerçekleştirilebilmesi için bazı çalışmalar yapmıştır. Yapılan deneyler ile sabit frekanslı ve sabit gerilimli güç kaynaklarının olması durumunda değişken frekanslı sürücüler üzerinden kayıp ayrıştırmasının yapılabileceği ortaya konulmuştur [16].

Trinchuk günümüz taşımacılık sektöründe elektrikli araçlar için yaygın olarak tercih edilen lityum iyon pillerin yüksek enerji karakteristiklerine rağmen bataryada

yüksek sıcaklık kayıpları meydana gelmesine neden olduğunu ancak süper kapasitörler kullanılarak bu olumsuz durumdan kurtulmanın mümkün olacağını belirtmiştir. Bu doğrultuda yaptığı çalışmada verimlilik açısından asenkron motorların sürücülerinin güç kaynağına süper kapasitör üzerinden bağlı olduğu ve olmadığı durumları incelemiştir. MATLAB Simulink ortamında yapılan incelemelerde süperkapasitör kullanımının yüksek hızlarda verimi çok etkilemediği ancak düşük ve orta hız seviyelerinde verim üzerinde olumlu etkileri olduğunu ortaya koymuştur [17].

Almeida ve ark. enerji verimli motor sistemlerine değinip, enerji verimli motorlar, motorlardaki kayıplar, motor verimliliğini etkileyen şebekeden kaynaklı etkileri incelemiştir. Motorların verim değerlerinin giriş ve çıkış güçleri üzerinden bulunduğu doğrudan hesap yöntemi ile kayıpların hesaba katılarak verim değerinin bulunduğu dolaylı hesap yöntemi ele alınmıştır. Ayrıca motorların verim testlerinde kullanılan farklı standartlar kıyaslanmıştır [18].

Karkkainen ve ark. (2017) konvertör beslemeli motorlar için IEC kayıp ayrıştırma yöntemi tanımlanmış ve uygulamıştır. İki farklı frekans dönüştürücü üzerinden gerçekleştirilen deneylerin sonucunda yöntemin konvertör beslemeli motorlar için uygun olduğu ancak uygulamasının kolay olmadığı sonucu ortaya konulmuştur [19].

Bazurto ve ark. (2016) endüstriyel elektrik motorlarında en sık karşılaşılan arızaların nedenlerini ve sınıflandırılmasını ortaya koymuştur. Ayrıca çalışma, Kolombiya'nın güneybatısında bulunan bir elektrik makinaları tamir merkezinden alınan verilerle ve burada yapılan araştırmalarla da desteklenmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda endüstride en çok kullanılan elektrik makinası türünün sincap kafesli asenkron makine olduğu ve makinalardaki arızaların yaklaşık %70'inin mekanik kaynaklı olduğu ortaya konulmuştur. Buna ek olarak arızaların giderilmesi sürecinde tercih edilecek yöntemin motor verimini etkilememesi gerektiği belirtilmiştir [20].

Prainetr ve ark. (2017) asenkron makinaların mekanik arızaları üzerine benzetim ve deney çalışmaları gerçekleştirmiştir. Asenkron motorların hava aralığı kaçıklığından kaynaklı arızalarının tespiti için akım harmoniklerinin incelenmesinin kullanışlı olacağı ortaya konulmuştur. Yapılan deneylerde hava aralığı kaçıklık

oranındaki artışın tek harmonikleri arttırdığı, titreşim ile ses sinyalini ve verimi etkilediği tespit edilmiştir [21].

Glowacz (2018) üç fazlı sağlam bir asenkron motor, rotor çubuğu kırılmış üç fazlı asenkron motor, iki rotor çubuğu kırılmış üç fazlı asenkron motor ve arızalı üç fazlı sincap kafesli asenkron motor kullanarak, ses sinyallerine bağlı arıza tanınması üzerine bir çalışma yapmıştır. Glowacz yaptığı çalışma ile ses sinyallerinin arıza tespitinde iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur [22].

Boglietti ve ark (2003) uluslararası standartlarda tanımlanmış ölçüm prosedürlerinin kıyaslaması üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu kıyaslama test edilen dört adet asenkron motora ilişkin deney sonuçlarına dayanmaktadır. Verim hesabında önemli olan rastgele yük kayıpları için detaylı analiz yapılmış ve demir kayıpları üzerinde sıcaklığın etkisi analiz edilmiştir [23].

Tinazzi ve ark. uluslararası IEC 60034-2-3:2013 standardına göre inverter beslemeli asenkron makinaların verimliliğini incelemiştir. DC bara gerilimi üzerindeki etkiler, termal açıdan beklentiler, ölü zamandaki etkiler deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Deney çalışmalarında iki farklı asenkron makine kullanılıp, deney sonuçlarına göre her iki motora ilişkin verim eğrileri elde edilmiştir. Farklı ölü zamanlardaki demir kayıplarına ve mekanik kayıplara ilişkin eğriler çizdirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre termal durum izleme yapılarak ve DC bara geriliminin ayarlanmasına önem verilerek TS standardında önerilen yöntemin uygulanabilir ve tekrarlanabilir sonuçlar vereceği ortaya konulmuştur [24].

Deda ve ark. asenkron motorlarının verimlilik test yöntemlerinin IEC 60034-2-1 ve IEEE 112 standartlarına göre kıyaslanması üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Bu amaçla 5.5 kW gücündeki sincap kafesli asenkron motor IEC ve IEEE standartlarına göre test edilip, testlere ait elde edilen veriler verimlilik hesabında kullanılmıştır. Yapılan testlerde elde edilen veriler incelendiğinde, farklı standartlara göre alınan sonuçların belirli bir oran dâhilinde farklılık gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu farklılık özellikle ölçüm yöntemlerinde standartlar arasında bir uyum yakalanarak testlerin yapılması sonucunu ortaya çıkarmıştır [25].

Safin ve ark. (2018) IE2 verimlilik sınıfındaki asenkron motorlar ile IE5 verimlilik sınıfındaki senkron relüktans motorların verimlilik ve enerji tüketimleri için karşılaştırmalı bir çalışma yapmıştır. Motorların verim hesabı için 7 yük noktasından oluşan polinom tipi interpolasyon uygulanmıştır. Asenkron motora ilişkin kayıplar EN 50598-2:2014 standardına göre, senkron relüktans motora ilişkin kayıplar ise üretici kataloğundaki veriler üzerinden hesaplanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre pompa uygulamalarında IE5 sınıfı senkron relüktans motor kullanımı, asenkron motor kullanılması durumuyla kıyaslandığında verim açısından %13.9 oranında bir iyileşme sağlamaktadır [26].

Al-Sharif (1996) 75 kW gücündeki yürüyen merdiven sisteminde kullanılan asenkron motorla ilgili yapılan testleri içeren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yapılan testlerde BS4999 standardının özellikle 143. bölümü kullanılmıştır. Testlerin sonuçları incelendiğinde, ölçülen değerlerin motorun tasarlanan performans değerlerine uygun olduğu gözlenmiştir [27].

Singh ve ark. (2019) arızalı asenkron motorların çalıştırıldığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, verim düşümü doğrusal, üstel ve ikinci dereceden olmak üzere üç farklı senaryo ile incelenmiştir. Ayrıca arızalı motorların bakım planlamasının yapılmasına yönelik bir algoritma geliştirilmiştir [28].

Soleimani ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada eski, düşük verimli ve aşırı yüklenmiş motorların değişim kararının verilmesine ekonomik açıdan bir yaklaşım ortaya koymuştur. 100 adet motora ilişkin veriler kullanılarak değiştirilen motorların faiz oranları da dikkate alınarak geri ödeme süreci hesaplanmıştır. Çalışmada, faiz oranlarının ve elektrik fiyatlarının motorları değiştirme kararının verilmesinde etkili olan iki önemli parametre olduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada İngiltere, Amerika, Almanya, Çin ve Hindistan için hesaplamalar yapıp, farklı ekonomik durumların da karar verme sürecindeki etkileri incelenmiştir [29].

Işık (2011) hazırladığı yüksek lisans tezinde şebekeden kaynaklı ortaya çıkan dengesiz çalışma koşullarının asenkron motorun verim değerini düşürmesine karşılık motorun çıkış gücünün gerilim dengesizlik değerine göre düzenlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. 2.2 kW gücündeki bir motor üzerinden boştaki çalışma koşullarında dengesizlik yaratılıp deneysel, statik ve dinamik modelde bulunan

sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ile statik ve dinamik modelde elde edilen değerler arasında en fazla %8'lik fark gözlenmiştir [30].

Kartal (2018) hazırladığı yüksek lisans tezinde Muğla'daki mermer fabrikalarında kullanılan elektrik motorlarının enerji verimliliklerini tespit etmiş, bu motorların daha verimli olan motorlar ile değiştirilmeleri durumunda sağlanacak kazanç üzerinden motor değişim giderlerinin geri dönüş sürelerini hesaplamıştır. Böylece mermer fabrikalarının ciddi maliyetlerinden birisi olan enerji giderlerinde azalma sağlanarak mermer firmalarının rekabetçilik seviyelerinin arttırılabileceği ortaya konulmuştur [31].

Büyük (2018), elektrik motorlarında enerji verimliliği mevzuatının Türkiye pazarına etkisi üzerine bir yüksek lisans tezi hazırlamıştır. Yaptığı çalışmada elektrik motorlarını inceleyip bu konuda dünyadaki, Avrupa'daki ve Türkiye'deki yasal düzenlemeleri incelemiştir. Motorların verim tespitinde kullanılan deney düzeneklerini ve yöntemlerini verip örnek bir verim hesabı gerçekleştirmiştir. Büyük, standartta tanımlanan IE2 seviyesindeki motorların tebliğde tanımlı olan IE2 seviyesindeki motorlar ile değiştirilmesi durumunda sağlanacak ekonomik faydaları vererek çalışmasını tamamlamıştır [32].

Gök (2015) yüksek lisans tezinde ikisi de 1.5 kW gücünde olan sincap kafesli standart verimli ve yüksek verimli asenkron motorları kıyaslamıştır. Yapılan tez çalışmasında her iki verim seviyesindeki motor için boşta çalışma, kısa devre çalışma ve yüklü çalışma deneyleri yapılarak, verim değerleri kıyaslanmıştır [33].

## **1.2. Tezin Amacı**

Bu tezde asenkron motorlarda verime etki eden faktörlerin deneysel olarak elde edilmesine yönelik uygulamalar gerçekleştirilmiştir. IE2 ve IE3 verim sınıfındaki iki farklı asenkron motorun IEC 60034-2 standardına uygun olarak sargı direnci lme, boşta çalışma, kısa devre ve yüklü çalışma deneyleri yapılarak motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması hedeflenmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlarla, asenkron motorların eşdeğer devre parametreleri üzerinden asenkron motorlarda meydana gelen kayıpların hesaplanması ve makine etiketlerindeki verim değerlerinin doğrulaması yapılacaktır. Ayrıca bu çalışma ile asenkron motorda meydana gelen her bir kayıp parametresinin verim üzerindeki etkisinin açıklanması hedeflenmiştir.

Yapılan uygulama sonuçlarının analizi ile ana amaç olarak belirlenen asenkron motorlarda verim sınıfları farkını oluşturan temel parametrelerin belirlenmesine ve bu çalışmanın daha da geliştirilmesi için öneriler getirilmesine çalışılacaktır.



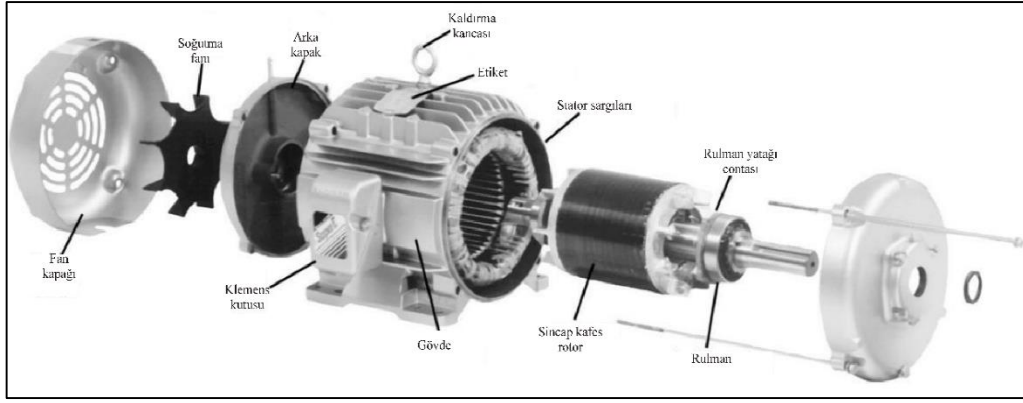
## 2. GENEL BİLGİLER

Elektrik makinaları, elektrik enerjisi ile mekanik enerji arasında elektromekanik enerji dönüşümü sağlayan cihazlardır. Elektrik makinaları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürdüğünde elektrik motoru; mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdüğünde ise generatör olarak isimlendirilir. Elektrik makinaları, en genel olarak DC elektrik makinaları ve AC elektrik makinaları olarak ikiye ayrılır. AC elektrik makinaları asenkron ve senkron makinalardır.

Asenkron motorlar, elektrik makinalarının bir türü olup indüksiyon motorları olarak da isimlendirilmektedir. Bir veya üç fazlı olarak imal edilebilen asenkron motorlar yapısına göre sincap kafesli ve bilezikli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Asenkron motorların dayanıklı olması, kontrolünün kolay sağlanması, bakım gereksinimlerinin ve maliyetinin düşük olması yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Endüstride pompa, fan ve kompresör gibi uygulamalarda asenkron motorlardan yararlanılmaktadır. Ayrıca evlerdeki çamaşır, bulaşık makinalarında ve buzdolaplarında da asenkron motorlar kullanılabilir.

### 2.1. Asenkron Motorların Yapısı

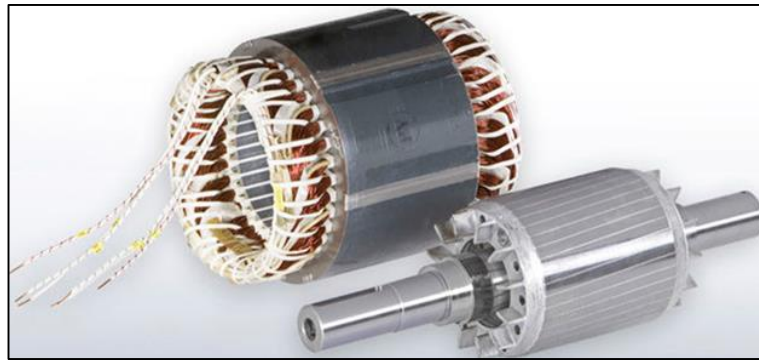
Asenkron motorlar; hareket etmeyen stator ve stator sargıları ile dönme hareketi yapan rotor ve rotor sargıları olmak üzere başlıca iki kısımdan oluşur. Stator ve rotor kısımları dışında kapak, rulman, pervane, gövde, mil, klemens kutusu asenkron motorun diğer parçalarıdır. Rotor, mil ve rulmanlar üzerinden statorun her iki ucundaki kapaklara yataklanır. Rotor ile stator arasında hava aralığı bırakılarak, rotorun dönmesi sağlanır. Statorun arka kapağı ucunda bulunan fan sayesinde motorun soğutması sağlanır. Motorun en dışında bulunan gövde ile motorun etrafı kaplanmış olur ve gövdenin yapısı sayesinde yüzey alanı artırılarak da soğutmaya yardımcı bir yapı oluşturulur. Motorun elektriksel bağlantılarının yapılabilmesi için klemens kutusu ve motorun güç, nominal akım, gerilim, verim ve enerji sınıfı gibi bilgilerinin yer aldığı etiketi gövde üzerinde bulunmaktadır. Sincap kafesli üç fazlı asenkron motora ilişkin örnek bir kesit ve motor kısımlarına ilişkin bir görsel Şekil 2.1’de verilmiştir.



**Şekil 2.1.** Sincap kafesli üç fazlı asenkron motor kesiti ve kısımları

### 2.1.1. Stator

Asenkron motorların hareket etmeyen kısmına stator adı verilmektedir. Stator ya da duran kısım, stator saç paketi ve stator gövdesi olmak üzere iki kısma ayrılır. Stator sargılarının ve manyetik akının üzerinde taşındığı kısma stator saç paketi denir. Stator saç paketi, girdap akımı kayıplarının azaltılması için bir tarafı izole edilmiş 0,35 mm – 0,5 mm kalınlığındaki silisyumlu saçların üst üste sıkıştırılmasıyla elde edilir. Stator kısmında açılan oluklara AC akım taşıyan stator sargıları yerleştirilir. Stator sargıları bir, iki, üç ve çok fazlı olarak farklı sargı tiplerinde sarılabilirler. Stator saç paketinin ve stator sargılarının taşındığı kısım stator gövdesidir. Stator gövdesi, rotorun iki taraflı olarak yataklanmasını sağlar. Ayrıca, motorun çalışacağı yere dik veya yatay olarak bağlanmasını sağlayan stator gövdesi üzerinde bulunan motor ayakları ya da flanşlar bulunur. Stator gövdesi, alüminyum ya da dökme demirden imal edilir. Stator gövdesi üzerinde motor eksenine paralel olarak bulunan soğutma kanalları motorun soğutulmasına yardımcı olur [34], [35]. Stator sargılarına ve rotora ait görseller Şekil 2.2’de verilmiştir.



**Şekil 2.2.** Stator sargıları ve rotor



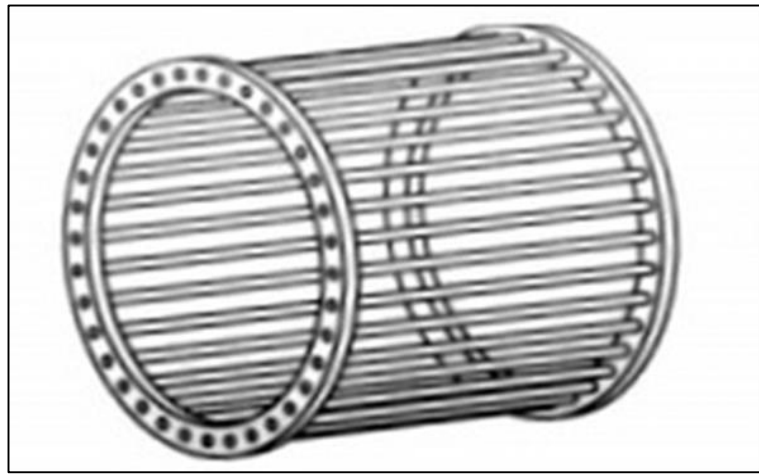
### 2.1.2. Rotor

Asenkron motorların dönen kısmına rotor adı verilir. Rotor ya da dönen kısım, rotor saç paketi ve rotor sargısı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Rotor saç paketi de statorda olduğu gibi, bir yüzeyi izole edilmiş 0,35 mm – 0,5 mm kalınlığındaki silisyumlu saçların üst üste sıkıştırılmasıyla elde edilir. Rotorda, sargıların yerleştirildiği oluklar bulunur. Statorda meydana gelen manyetik akı hava aralığından geçerek rotor saç paketi üzerinden manyetik yolunu tamamlar. Ayrıca rotor saç paketi, rotor sargılarının taşınır, manyetik yoldan indüklenen momentin mile iletiildiği kısımdır [35].

Rotor sargıları sincap kafesli ya da üç fazlı sargılı olarak yapılır ve oluklara yerleştirilir. Asenkron motorlar rotor ve rotor sargılarının yapısına göre ikiye ayrılır:

- a) Sincap kafesli (Kısa devre rotorlu) asenkron motorlar
- b) Bilezikli (Sargılı rotorlu) asenkron motorlar

**Sincap Kafesli (Kısa Devre Rotorlu) Asenkron Motorlar:** Bu motorlarda rotor oluklarına, her iki ucu bakır halkalarla kısa devre edilmiş bakır veya alüminyum çubuklar yerleştirilir. Elde edilen yapı sincap kafesine benzediği için bu tür rotorlara sincap kafesli rotor denir. Küçük güçlü asenkron motorlarda rotor sargısı alüminyumun özel kalıplarla rotor oluklarına basınçlı bir şekilde püskürtülmesiyle imal edilir [34]. Rotordaki kısa devre çubukları genellikle hava aralığındaki manyetik akı harmoniklerini azaltmak için eğimli olarak yapılabilmektedir. Sincap kafesli rotor yapısına ait görsel Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Asenkron motor rotorundaki sincap kafes yapısı

**Bilezikli (Sargılı Rotorlu) Asenkron Motorlar:** Bu motorların rotor oluklarına çoğunlukla üç fazlı yıldız bağlı olan rotor sargıları yerleştirilir. Rotor sargısı bağlantı uçları mil üzerinde bulunan fırça-bilezik yapısı yardımı ile dış devreye alınır. Asenkron motorun hız ve moment kontrolü dış devreye alınan rotor sargı uçlarına direnç veya bağımsız gerilim kaynağı bağlantısı yapılarak sağlanır [34].

Bilezikli asenkron motorlar genellikle çok ağır kalkış koşullarında ya da hız kontrolünün rotor direnci ile yapılması gereken durumlarda kullanılır [36]. Stator sargı gerilimleri 220 V-15000 V aralığında değişen bilezikli asenkron motorlar 355 kW-10000 kW gibi büyük güçler için üretilirler [35]. Motor sürücülerinin yaygın olarak kullanılmaya başlaması ile birlikte bilezikli asenkron motorların kullanımı çok azalmıştır. Bilezikli rotor yapısına ait görsel Şekil 2.4’de verilmiştir



**Şekil 2.4.** Bilezikli (sargılı) rotor

## 2.2. Asenkron Motorların Çalışma Prensibi

Elektrik makinalarının çalışma prensibinin temelinde Faraday, Amper ve Biot-Savart gibi yasalar bulunmaktadır. Amper kanuna göre üzerinden akım geçirilen bir iletkenin etrafında manyetik bir alan meydana gelir ve manyetik akı akmaya başlar. İletkende, manyetik akının zamana bağlı değişimiyle orantılı olarak gerilim indüklenir ve buna Faraday kanunu denir. Biot-Savart yasasına göre manyetik alan içinde bulunan ve üzerinden akım geçen iletkenlerde alan dışına doğru olacak şekilde bir kuvvet oluşur.

Asenkron motorların stator ve rotoru arasında herhangi bir elektriksel bağlantı bulunmamaktadır. Stator sargılarına gerilim uygulanarak, sargılar üzerinden bir akım

akması sağlanır ve Amper kanununa göre bu akım sayesinde stator sargıları etrafında bir manyetik alan meydana gelir. Bu manyetik alana, döner alan denir. Döner manyetik alan çizgileri rotordan geçerek rotorda bir gerilim indüklenmesi sağlanır. Rotor sargılarından geçen akım ve rotorun manyetik alanda olmasından dolayı Biot-Savart yasası gereği elektromanyetik kuvvet oluşur ve bu kuvvet sayesinde rotorda elektromanyetik moment üretilip, rotorun dönmesi sağlanır. Böylece statorda üretilen enerjinin, manyetik alan yoluyla rotora aktarılması sağlanır [35].

Asenkron motorlar bir, iki, üç ve çok fazlı olarak imal edilirler. Bir fazlı asenkron motorların statorlarında eksenleri arasında 90°'lik elektriksel açı farkı bulunan ana sargı ve yardımcı sargı bulunur. İki fazlı asenkron motorların statorlarında da, aralarında 90°'lik elektriksel açı farkı olan birbiriyle aynı özellikte iki sargı bulunur. Üç fazlı asenkron motorlarda ise mevcut olan 3 adet faz sargısının arasında 120°'lik elektriksel açı bulunmaktadır. Bu sargılar yıldız veya üçgen olarak iki farklı şekilde bağlanabilmektedir [35].

### 2.2.1. Döner Alan

Asenkron motorların çalışma prensibinin temelinde indüksiyon kanunu yatmaktadır. Bunun için motorun hava aralığında zamana bağlı olarak değişen manyetik alan yaratılması gerekmektedir. Değişken bir manyetik alan yaratmanın bir yolu sargıların sabit tutulup, sargılardan alternatif akım geçirmektir. Bir diğer yol ise sargıların doğru akımla beslenerek hareket ettirilmesidir. Asenkron motorların hava aralığında zamana bağlı değişen manyetik bir alan oluşturmak için sabit stator sargılarından alternatif akım geçirilmektedir [37].

Asenkron motorların hava aralığında döner manyetik alan oluşması için bazı koşulların sağlanması gerekmektedir. Döner manyetik alan oluşturmanın ilk koşulu asenkron motorun statorundaki 3 faz sargısının aralarında 120°'lik elektriksel faz farkı olacak şekilde motor düzleminde yerleştirilmesidir. İkinci koşul ise stator faz sargılarının elektriksel olarak aralarında 120°'lik fark olan alternatif akımla beslenmesidir. Stator sargı akımlarının ifadeleri (2.1)'de verilmiştir .

$$\begin{aligned} I_{aa'}(t) &= I_m \cdot \sin \omega t \\ I_{bb'}(t) &= I_m \cdot \sin(\omega t - 120) \\ I_{cc'}(t) &= I_m \cdot \sin(\omega t - 240) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Stator sargı akımlarının zamana bağlı olarak  $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  ve  $t_6$  anlarında aldıkları değerler Tablo 2.1’de verilmiştir. Her bir fazın oluşturduğu manyetik alan eşitlikleri ise (2.2)’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} B_a(t) &= B_m(t) \cdot \cos \omega_e t \\ B_b(t) &= B_m(t) \cdot \cos(\omega_e t - 120) \\ B_c(t) &= B_m(t) \cdot \cos(\omega_e t - 240) \end{aligned} \quad (2.2)$$

**Tablo 2.1.** Üç fazlı akımların  $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$  anlarındaki değerleri

$t$	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$\theta$
$t_0$	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	$5\pi/6$

Faz sargılarının (2.1)’de verilen akımlardan dolayı her birinin kendi ekseninde meydana gelen  $B_a(\theta, t), B_b(\theta, t)$  ve  $B_c(\theta, t)$  manyetik alanlarının ifadeleri (2.3)’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} B_a(\theta, t) &= B_a(t) \cdot \cos \theta \\ B_b(\theta, t) &= B_b(t) \cdot \cos(\theta - 120) \\ B_c(\theta, t) &= B_c(t) \cdot \cos(\theta - 240) \end{aligned} \quad (2.3)$$

(2.2) ve (2.3) denklemleri bir araya getirilip yazıldığında (2.4) eşitliği elde edilir.

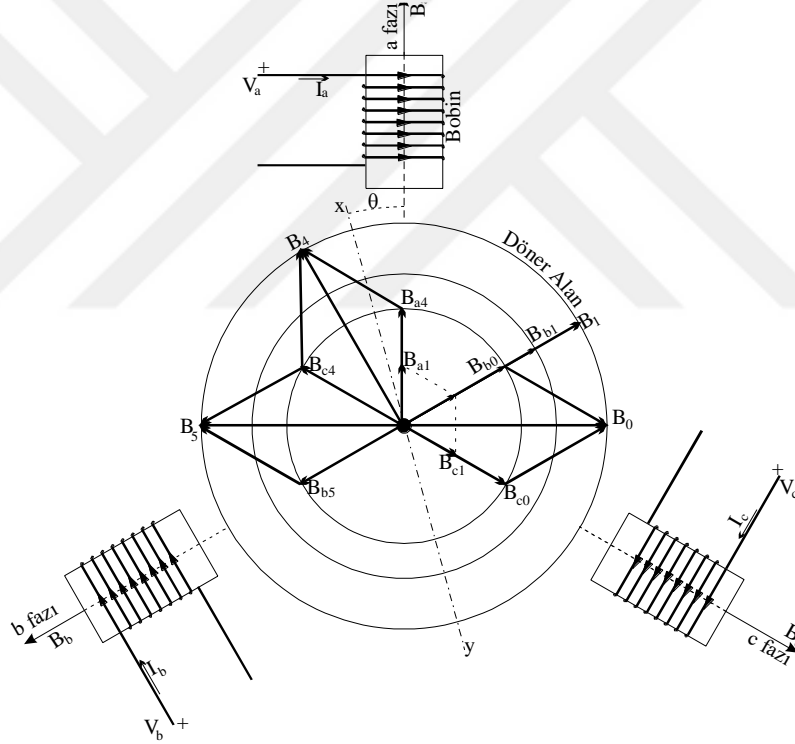
$$\begin{aligned} B_a(\theta, t) &= B_m \cdot \cos \omega_e t \cos \theta \\ B_b(\theta, t) &= B_m \cdot \cos(\omega_e t - 120) \cos(\theta - 120) \\ B_c(\theta, t) &= B_m \cdot \cos(\omega_e t - 240) \cdot \cos(\theta - 240) \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.3)’de her bir fazın kendi ekseninde oluşturduğu manyetik alanların toplamı alındığında (2.5)’de verilen denklem elde edilir ve bulunan ifade üç fazın oluşturduğu toplam manyetik alandır. (2.4)’de verilen ifadeler (2.5)’de yerine yazılıp, bir takım trigonometrik sadeleştirmeler yapıldığında (2.6) denklemi elde edilir.

$$B_{x,y}(\theta, t) = \sum_{i=a,b,c} B_i(\theta, t) = B_a(\theta, t) + B_b(\theta, t) + B_c(\theta, t) \quad (2.5)$$

$$B_{x,y}(\theta, t) = \frac{3}{2} B_m \cos(\theta - \omega_e t) \quad (2.6)$$

(2.6) eşitliği incelendiğinde hava aralığında meydana gelen döner alanın genliği sabit, konumu ise zamana bağlı olarak değişen bir manyetik alan olduğu görülmektedir. Bu manyetik döner alan hava aralığında senkron hızda dönerken, ucunda yük bağlı olan ve senkron hızdan daha düşük bir hızla dönen rotorla etkileşerek gerilim indüklenmesini sağlar. Döner alan oluşumuna ilişkin görsel Şekil 2.5'de verilmiştir [37].



Şekil 2.5. Asenkron makinalarda döner alan

### 2.2.2. Üç Fazlı Asenkron Motorun Çalışma İlkesi

Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun stator sargılarına üç fazlı dengeli gerilimler uygulandığında, stator sargıları frekansını akımın frekansıyla aynı olan döner bir manyetik alan oluşturur. Oluşan bu döner alan rotor çubuklarını keserek, bu çubuklarda gerilim indüklenmesini sağlar. İndüklenen gerilim ile çubuklarda oluşan akımlar döner bir rotor manyetik alanı oluşturur [34].

Asenkron motorların çalışma prensibi gereği enerji dönüşümü yapabilmelerinin koşulu,  $\omega$  açısai hızı için aşığıdaki denklem geçerlidir.

$$\omega = \omega_s - \omega_r \quad (2.7)$$

Rotoru sincap kafesli asenkron motorlarda bu koşul kendiliğinden sağlanmakta,  $\omega_s$  sabit olduğunda, rotor  $\omega_r$  açısai hızıyla döndüğü zaman aşığıdaki formül geçerli olmaktadır.

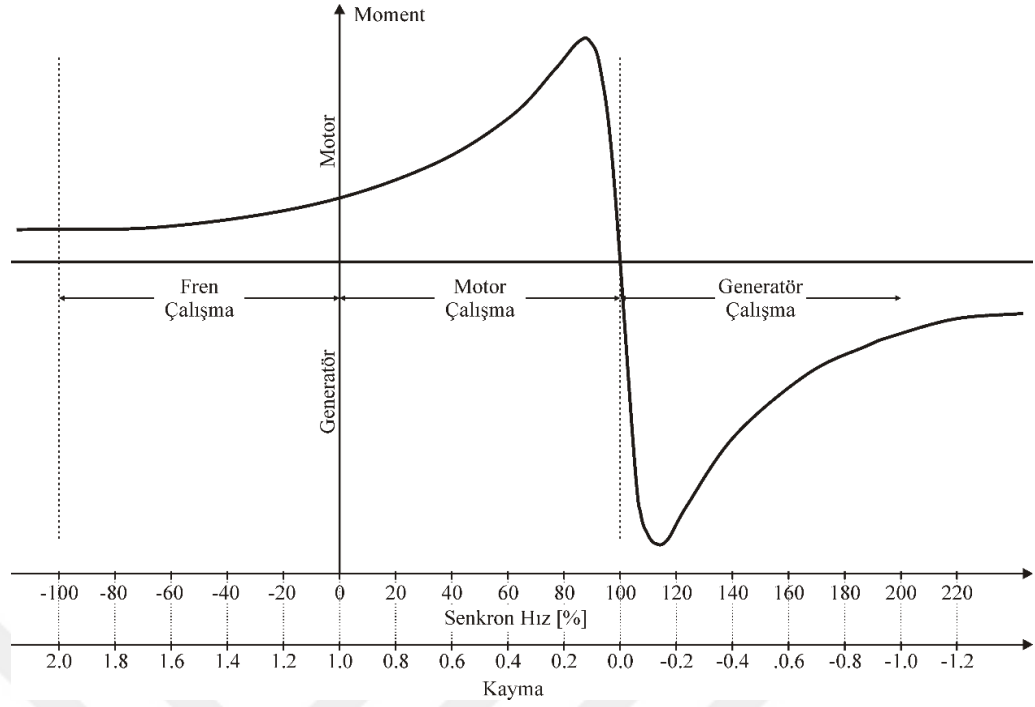
$$\omega_r = \omega_s - \omega \quad (2.8)$$

### 2.2.3. Kayma

Kayma, asenkron motorların çalışma biçimini tanımlayan önemli büyüklüklerden birisidir. Rotor hızı arttığında döner manyetik alan çizgilerinin rotoru kesmesi azalır, indüklenen gerilim azalır ve rotorda meydana gelen kuvvet ve moment azalır. Bu nedenle de rotorun hızı, döner manyetik alanın hızı olan senkron hıza hiçbir zaman yetişemeyip gerisinde kalmaktadır [34]. Döner alanın senkron hızı ile rotorun hızı arasında kayma olarak isimlendirilen ve senkron dönme hızı ile rotor dönme hızı arasındaki farkın senkron dönme hızına oranı ile hesaplanan bir terim tanımlanır [35]. Kayma (2.9) denklemi ile hesaplanır.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.9)$$

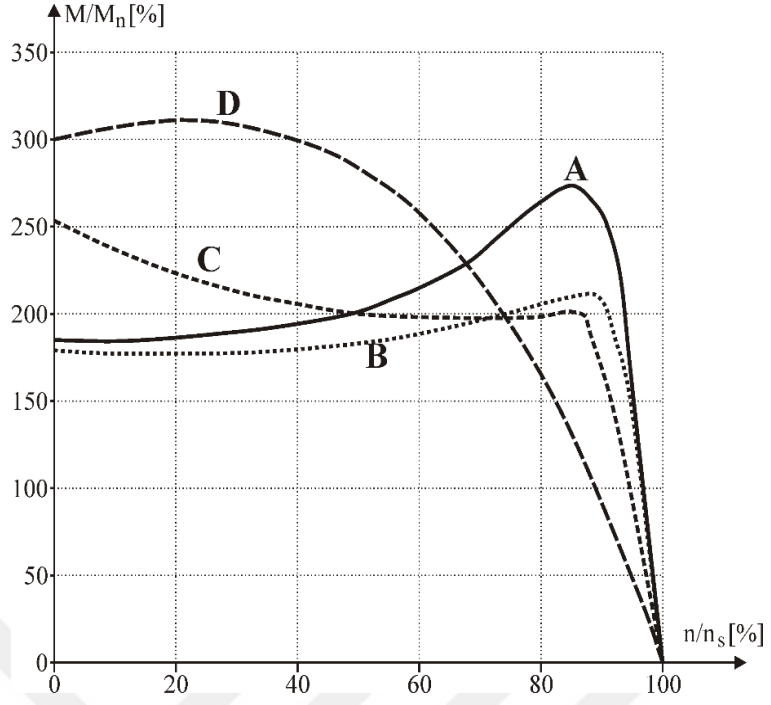
Kayma değerine bağılı olarak asenkron makinalar motor, generatör ve fren olmak üzere üç farklı çalışma bölgesinde değerlendirilir. Motor çalışma bölgesinde kayma değeri  $0 < s < 1$  aralığında değişir ve devir sayıları arasında  $0 < n_r < n_s$  ilişkisi bulunur. Generatör çalışma bölgesinde ise  $s < 0$  veya  $n_r > n_s$  olmaktadır. Fren çalışma bölgesinde  $s > 1$  ya da  $n_r < 0$  olarak rotor döner alana ters yönde döner [35]. Asenkron motorlara ilişkin genişletilmiş aralıklı moment-hız eğrisi Şekil 2.6'da verilmiştir.



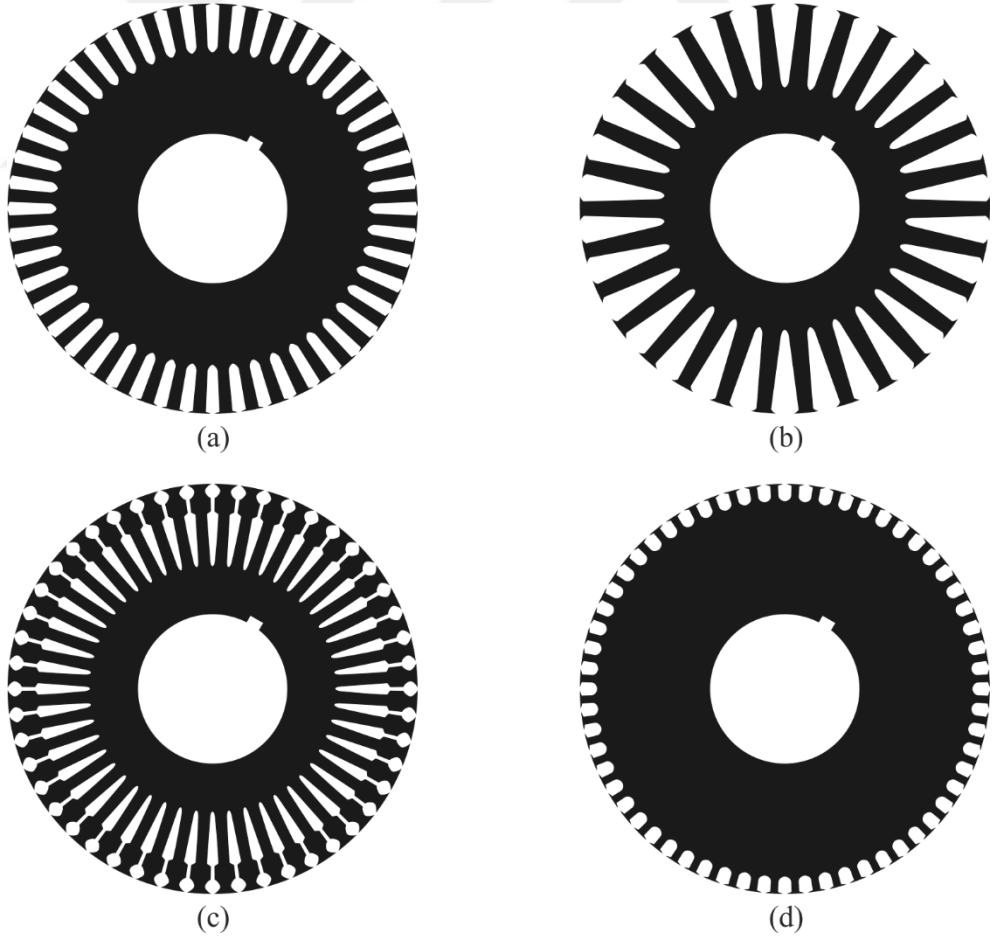
**Şekil 2.6.** Asenkron motorun genişletilmiş aralıklı moment-hız karakteristik eğrisi.

### 2.3. Asenkron Motor Tasarım Sınıfları

Asenkron motorların farklı rotor tasarımlarından dolayı moment-hız karakteristiklerinde farklılıklar meydana gelmektedir. Asenkron motor standart tasarım serileri ABD’de NEMA ve Avrupa’da IEC tarafından tanımlanmış bulunmaktadır [38]. Asenkron motorlarda farklı hız-moment karakteristik eğrilerinin elde edilmesi için, rotor yapılarında farklı tasarımlar yapılarak A, B, C, D, E, F gibi tasarım sınıfları oluşturulmuştur [39]. Şekil 2.7’de A,B,C,D NEMA tasarım sınıfı için moment-hız eğrileri gösterilmiştir. Moment-hız karakteristikleri incelendiğinde rotor tasarımına bağlı olarak başlangıç moment değerleri, maksimum moment değerleri ve moment eğrilerinin şekli açısından farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 2.8’de A,B,C,D NEMA tasarım sınıfı için oluk tasarım şekilleri verilmiştir. Rotor oluklarının şekil, genişlik ve derinlik açısından birbirinden farklı olduğu görülmektedir. (a) şeklindeki rotor yapısı A sınıfı bir motora ait ve rotor yüzeyine yakın büyük dirençli çubuklar içindir. (b) şeklinde ise B sınıfı bir motora ait rotor ve rotor tabanında büyük dirençli çubuklar için oluşturulan rotor yapısı vardır. (c) şeklindeki rotor yapısı C sınıfı bir motora ait olup çift oluklu ve çift çubukludur. (d) şeklindeki motor ise D sınıfındaki bir motora aittir ve rotor yüzeyinde küçük dirençli çubuklar bulunmaktadır [38], [39].



Şekil 2.7. NEMA asenkron motorun tasarım tipine göre moment-hız eğrisi.



Şekil 2.8. NEMA asenkron motorun sınıflarına göre rotor oluk şekilleri.



### **2.3.1. A Tasarım Sınıfı Motor**

A tasarım sınıfı motorlar standart motor tasarımı olarak bilinirler. Normal yol verme akımı, normal yol verme momenti ile düşük kayma değerine sahiptirler. Bu tasarım sınıfının ilkesel problemi yol alma sırasında çok yüksek ani akım (5-7 katı) çekmesidir. Rotor çubukları, rotor kaçak reaktansını azaltmak için rotor yüzeyine yakın yerlere yerleştirilmiştir. Bu tasarım motorlar fanlar, pompalar, üfleyiciler, torna ve diğer makina tezgâhlarında kullanılırlar.

### **2.3.2. B Tasarım Sınıfı Motor**

B tasarım sınıfı motorlar, normal yol verme momenti, düşük yol alma akımı ve düşük kayma değerine sahiptirler. A sınıfındaki bir motorun yol verme momenti ile aynı değerde moment üretebilmesi için yaklaşık %25 daha az akıma ihtiyaç duyulmaktadır. Rotor çubuklarının konumu A sınıfı ile kıyaslandığında daha derine yerleştirildiği görülmektedir. B tasarım sınıfı motorlar düşük yol alma akımı sebebiyle tercih edilirler. Yeni tesislerde B sınıfı motorlar, A sınıfı motorlarla yer değiştirmişlerdir.

### **2.3.3. C Tasarım Sınıfı Motor**

Düşük yol alma akımı, yüksek yol alma momenti ve tam yükte %5'ten daha düşük kayma değerlerine sahip olmak, C tasarım sınıfı motorların temel özellikleridir. Genellikle çift rotor çubuklu olarak üretilirler. Devrilme momentleri A sınıfına göre biraz düşüktür. Bu tasarım sınıfındaki motorlar kompresör pompaları, kırıcılar, konveyörler, tekstil ve ağaç işleme makinalarında kullanılırlar.

### **2.3.4. D Tasarım Sınıfı Motor**

D tasarım sınıfı motorların yol alma momenti yaklaşık 3 kat yüksek değerdeyken, yol alma akımları düşük ve tam yükte kayma değeri yüksektir. Temel olarak A sınıfı motor özelliklerine sahip olmalarına rağmen rotor boyları daha kısa, rotor çubukları daha küçük kesitli ve daha yüksek dirençli malzeme kullanılarak yapılırlar. Bu tasarım sınıfındaki motorlar kesme, zimba ve yapıştırma makinaları ile çamaşırhanelerde kullanılırlar.

Bu dört tasarım sınıfına ek olarak E ve F tasarım sınıfları da mevcuttur. Bu tasarım sınıfındaki motorlar yumuşak yol vermeli asenkron motorlar olarak adlandırılıp, çok az yol verme akımı ile düşük yol verme momentli yükler için kullanılmaktayken artık günümüzde tercih edilmemektedir [38], [39].

#### **2.4. Asenkron Motor Tasarımındaki Yönelimler**

Asenkron motor Nicola Tesla tarafından 1880'lerin sonlarında geliştirilip 1888 yılında patenti alınmıştır. Hızlı bir gelişim gösterip 1895'e kadar iki ve üç fazlı kaynaktan besleme, dağıtılmış stator sargıları ve kafes rotor gibi yeniklerle 1896 yılında tam fonksiyonel ve taşınabilir asenkron motorlar ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Gelişimdeki yavaşlama süreci olarak görülen sonraki yıllarda, tasarım çabaları makinanın verimini arttırmaya değil kullanılan malzemeler ve motor boyutlarındaki azaltma çalışmaları ile devam etmiştir. Bu dönemde elektrik çok pahalı olmadığından tasarım çabaları müşterilerin de isteği doğrultusunda motorun maliyeti üzerine gerçekleşmiştir.

Petrol fiyatlarının 1973 yılında artmaya başlaması ile makinaların kurulum maliyetinin önemi azalmaya, işletme ömür maliyetinin önemi ise artmaya başlamıştır. Bu gelişmeler son kullanıcıları ve tasarımcıları motor verimi üzerine çalışmalara yönlendirmiştir. Günümüzde yüksek verimli asenkron motorlar üretilmekte ve asenkron motor pazarında artan bir paya sahip olmaktadır [38].

#### **2.5. Asenkron Motorlarda Kayıplar ve Güç Dengesi**

Sincap kafesli asenkron motorlarda dört ana grupta incelenen kayıpların derecesine bağlı olarak verim değeri değişmektedir. Sincap kafesli asenkron motorlardaki kayıplar demir kaybı, bakır kaybı, mekanik kayıplar ve rastgele yük kayıpları olarak sınıflandırılmaktadır [40].

Asenkron motorun stator ve rotor kısımlarında kullanılan manyetik malzemelerin özelliklerinden dolayı ortaya çıkan kayıplar demir kayıpları olarak isimlendirilir. Demir kayıpları aynı zamanda motorun frekansına ve motordaki manyetik akı yoğunluğuna bağlıdır. Demir kaybı hesaplanırken, rotor frekansının ve rotor gerilim değerinin çok küçük olması nedeniyle rotordaki demir kayıpları ihmal edilebilir ve sadece statordaki demir kayıpları hesaba katılır. Bakır kayıpları, statordaki sargılar ile rotordaki sargı veya çubuklar üzerinden geçen akımdan kaynaklı olarak ortaya çıkan kayıplardır. Bakır kaybı hesaplamalarında stator ve rotordaki sargı kayıpları ayrı ayrı incelenir. Mekanik kayıplar rulmandaki sürtünme ve soğutma sistemindeki fan kaynaklı kayıplardır. Bu kayıplar sürtünme ve vantilasyon

kayıpları olarak isimlendirilmektedir. Motorda meydana gelen rastgele yük kayıpları ise makina geometrisine ve harmonik akımlara bağlı kayıplardır. Bu kayıplar kaçak kayıplar olarak da isimlendirilmektedir [40].

Asenkron motorun giriş ve çıkış güçleri arasında bir güç dengesi vardır. Giriş gücünden motorda meydana gelen kayıplar çıkarılarak çıkış güç elde edilir. Asenkron motorun güç akış dengesinde geçerli olan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Motorun giriş gücü stator bakır ve demir kaybı ile hava aralığı gücünün toplamı şeklinde denklem 2.10'da olduğu gibi ifade edilir.

$$P_1 = P_{cu1} + P_{fe} + P_i \quad (2.10)$$

Motorda meydana gelen demir kayıplarının stator ve rotor olmak üzere iki bileşeni vardır. (2.11)'de verildiği gibi rotor demir kayıpları çok küçük olduğu için toplam demir kaybının içindeki etkisi ihmal edilerek, sadece statordaki demir kaybı hesaba katılır.

$$\begin{aligned} P_{fe} &= P_{fe1} + P_{fe2} \\ P_{fe2} &\cong 0 \\ P_{fe} &= P_{fe1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Hava aralığına aktarılan iç güç rotor sargıları bakır kaybına ve mil gücüne dönüşür. Hava aralığı gücü, rotor bakır kayıpları ve mil gücü arasındaki ilişki denklem (2.12)'de verilmiştir.

$$P_i = P_{cu2} + P_{mi} \quad (2.12)$$

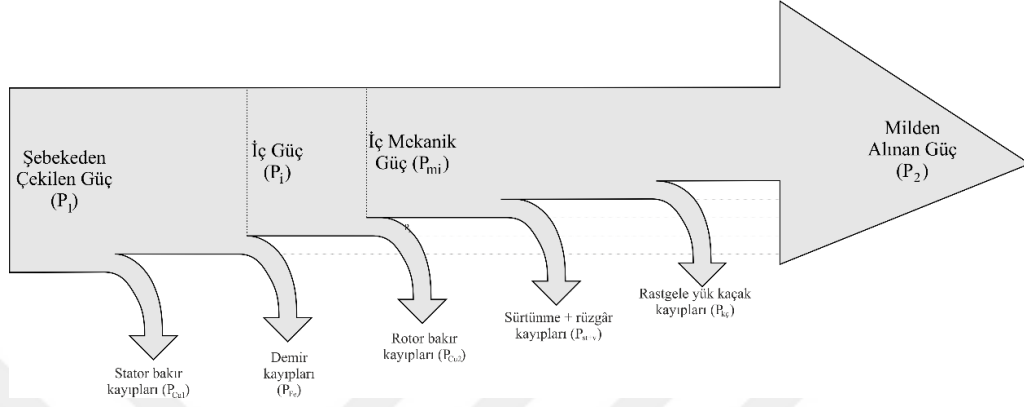
Motorun milindeki güce ilişkin denklem (2.13)'de verilmiştir. Motorun hava aralığından miline aktarılan mil gücü, sürtünme vantilasyon kaybı, rastgele yük kaçak kaybı ve motor çıkışındaki net mil gücü veya motor çıkış gücünün toplamına eşittir.

$$P_{mi} = P_{st+v} + P_{kç} + P_2 \quad (2.13)$$

Yukarıda verilen (2.11), (2.12) ve (2.13) denklemleri birleştirildiğinde makine bileşke güç dengesi formülü (2.14)'de olduğu gibi elde edilir.

$$P_1 = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_{st+v} + P_{kç} + P_2 \quad (2.14)$$

(2.14)'de verilen asenkron motora ait güç dengesi formülü bir diyagram ile gösterilecek olursa Şekil 2.9 elde edilir.

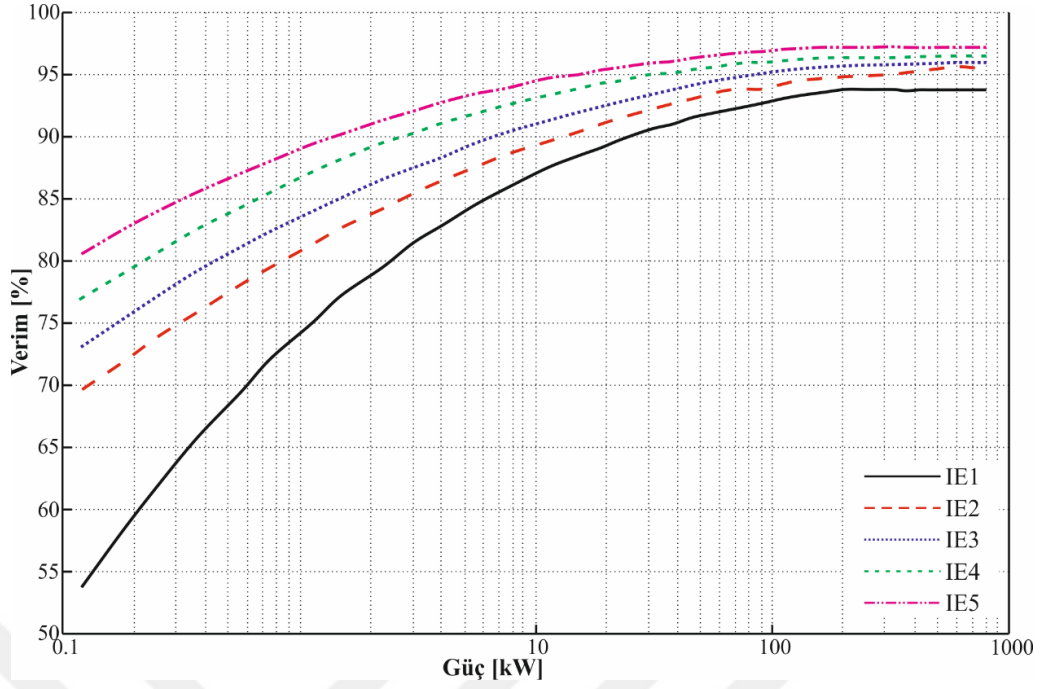


**Şekil 2.9.** Asenkron motor güç dengesi diyagramı

## 2.6. Asenkron Motorlarda Verim Sınıfları

Elektrik motorları 1998 yılında CEMEP tarafından hazırlanan standartlara göre 1.1 kW ile 90 kW arasında EFF3, EFF2 ve EFF1 olmak üzere üç temel verimlilik değerine göre sınıflandırılmıştır. EFF3 düşük verimli sınıf, EFF2 verimi arttırılmış sınıf, EFF1 yüksek verimli sınıf olarak belirlenmiştir. Herhangi bir yasal yaptırım olmayan ve son kullanıcıyı bilinçlendirmeye yönelik olan bu çalışmanın başarısı da sınırlı olmuş ve 10 yıllık uygulanma sürecinde piyasaya arz edilen motorların ancak %1'i verimli motorlara dönüştürülmüştür.

2008 yılında hazırlanan IEC 60034-30:2008 standardına göre elektrik motorları için verimlilik sınıfları 0.75 kW ile 375 KW arasına genişletilmiş, verimlilik sınıflarına IE1, IE2, IE3, IE4 şeklinde yeni bir tanımlama getirilmiştir. Bu yeni tanımlamaya göre IE1 sınıfı EFF2'nin, IE2 sınıfı ise EFF1'in karşılığı olup, IE1 standart verimli sınıf, IE2 yüksek verimli sınıf, IE3 çok yüksek verimli sınıf ve IE4 süper çok yüksek verimli sınıf motorlar olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.10'da IEC-60034-30 normunda belirlenen sabit hızlı 4 kutuplu motorlar için 50 Hz frekansta, IE1, IE2, IE3, IE4 ve IE5 sınıflarının farklı güç değerleri için verim eğrileri verilmiştir.



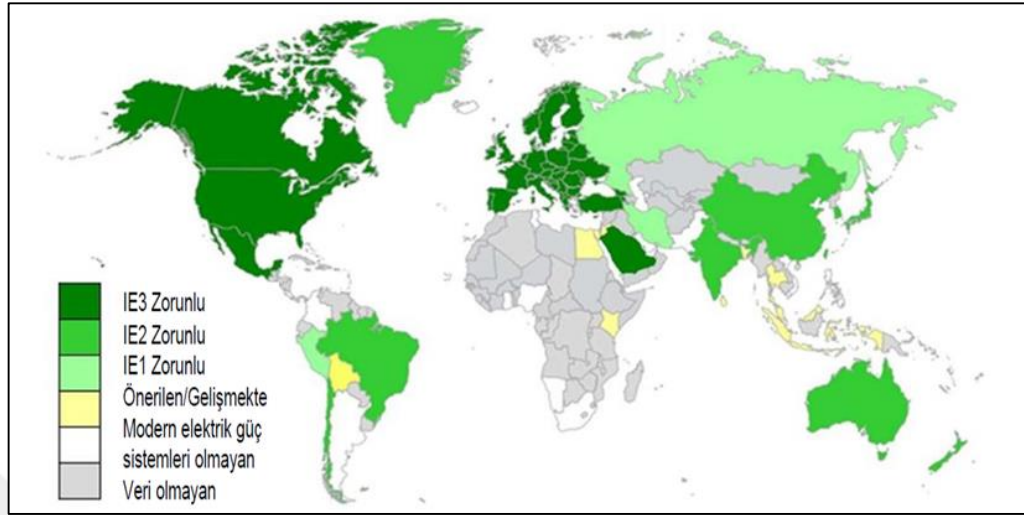
**Şekil 2.10.** IEC 60034-30 standardına göre nominal verimlilik sınıfı limitleri

2009 yılında 2, 4 ve 6 kutuplu, 0.75kW ile 375 kW güç aralığında, besleme gerilimi 0 V ile 1000 V arasında, 50 Hz veya 50/60 Hz frekans aralığındaki sincap kafesli asenkron motorları kapsayan standart; 2014 yılında tekrar revize edilerek yayınlanmış, farklı olarak kutup sayısına 8 kutuplu motorların ilavesiyle 2, 4, 6 ve 8 kutuplu olarak belirlenmiş, güç aralığı 0.12 kW ile 1000 kW güç aralığına çıkartılmış, frekans 50 Hz veya 60 Hz olarak ayrı ayrı ele alınmış, IE4 verimlilik sınıfını tanımlanmıştır. Ayrıca IE5 verimlilik seviyelerinin 2014'te yayınlanan IEC 60034-30-1:2014 standardının bir sonraki baskısına dahil edilmesi ve IE5 sınıfı motorların kayıplarının IE4'e göre yaklaşık% 20 azaltılması öngörülmüştür.

Böylece IEC 60034-30-1:2014 ile elektrik motorlarında IE verimlilik sınıfları belirlenmiş, IEC 60034-2-1:2014 ile de motorların verim ölçümleri için test metotları standardize edilmiştir. Örneğin gücü 22 kW olan ve 1500 d/dk ile dönen bir AC motoru için verim değerleri IE 1 sınıfında % 89.9, IE 2 sınıfında % 91.6, IE 3 sınıfında % 93.0 ve IE 4 sınıfında % 94.5'tir.

Test prosedürlerinin verim sınıflarını belirleyen bir kuruluş olarak IEC, bunların uygulanmasını yöneten bir merci değildir. Bu standartların uygulanması, ilgili ülkelerin kendi içlerinde oluşturdukları “Minimum Enerji Performansı Standartları” denilen yasal düzenlemelerle yapılmaktadır. Şekil 2.11’de ülkelere göre Minimum

Enerji Performansı Standartları görülmektedir. Tablo 2.2’de IEC/EN ile Avrupa, Amerika ve bazı yerel düzenlemeler arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 2.11. Dünya Çapında Motor MEPS [41].

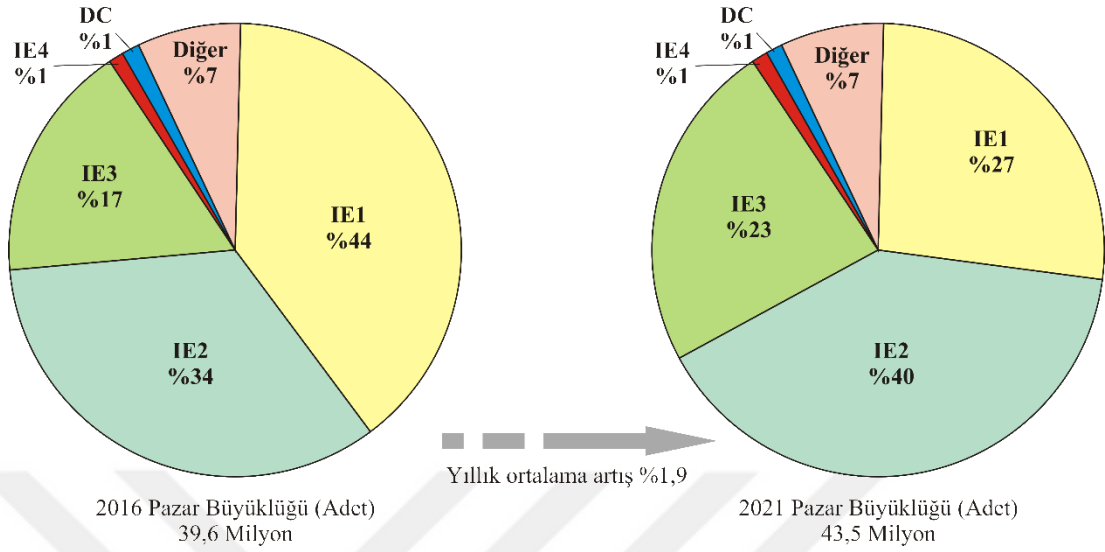
Tablo 2.2. IEC/EN ile Avrupa, Amerika ve diğer benzer yerel düzenlemeler arasındaki karşılaştırma [42]

IEC / EN 60034-30-1	EU MEPS	EISA US EEV Kanada	Diğer Benzer Yerel Düzenlemeler
IE4 Süper Premium Verimlilik			
IE3 Premium Verimlilik	IE3 Premium Verimlilik	NEMA ile aynı Premium Verimlilik	Japonya - 2015 Avustralya/Yeni Zelanda - 2015 Güney Kore - 2015 Çin - 2016
IE2 Yüksek Verimlilik	IE2 Yüksek Verimlilik	NEMA ile aynı Enerji Verimli / EPACT	Kanada Meksika Avustralya/Yeni Zelanda Brezilya
IE1 Standart Verimlilik		Standart Verimliliğin Altında	Kosta Rika İsrail Tayvan

Avrupa Birliği verimlerle ilgili düzenlemeyi mevzuatında 640/2009 sayılı yönetmelik ve 04/2014 sayılı ek ile yapmıştır. Türkiye ise 7/2/2012 tarihinde Resmi Gazete’de yayımlanan 28197 sayılı (SGM-2012/2) Elektrik Motorları ile ilgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklere Dair Tebliğ ve 13/3/2015 tarihli, 29294 sayılı (SGM-2015/15) ek ile yasalaştırmıştır.

Dünyadaki elektrik motorları pazarı asenkron motorlar tarafından domine edilmektedir. 2016 yılında pazardaki toplam payı % 44 olan IE1 sınıfı standart motorların 2021 yılında % 27 oranına gerilemesi beklenmektedir. Bu motorların, daha çok enerji verimliliği konusunda düzenlemeler yapılmamış ve bu dönüşüme hazır

olmayan pazarlara sunulacağı öngörülmektedir. Şekil 2.12’de elektrik motorlarının dünya pazarındaki 2016 yılı verileri ve 2021 yılı tahmini beklentileri verilmiştir



**Şekil 2.12.** Elektrik motorlarının küresel pazardaki payının 2016 yılındaki dağılımı ve 2021 yılına ait tahmini dağılımı [41]

Tablo 2.3’de farklı motor teknolojilerinin bugünkü teknolojiler ile IE1, IE2, IE3, IE4 ve IE5 verimlilik sınıflarındaki seviyelere ulaşabilme potansiyelleri özetlenmiştir. Tabloda belirtilen “Evet” ibaresi ilgili motor türü için mevcut teknolojiler kullanılarak ilgili verimlilik sınıfına ulaşılacağı; “Hayır” ibaresi ise ulaşamayacağı anlamına gelmektedir. Tablodaki “Zor” ifadesi ilgili enerji verimliliği seviyesine, motor türünün ancak belirli güç değerlerinde erişebileceği anlamını taşımaktadır.

Frekansı 50 Hz, gücü 0.12 kW ile 200 kW aralığında olup IEC 60034-30-1:2014 standardında verimlilik değeri bulunmayan asenkron motorların verimlilik değerinin bulunması için (2.15)’te verilen formül uygulanacaktır. Formülde kullanılan A,B,C ve D enterpolasyon katsayıları Tablo 2.4’e göre seçilecektir [43].

$$\eta_N = A \cdot \left[ \log_{10} \left( \frac{P_N}{10^3} \right) \right]^3 + B \cdot \left[ \log_{10} \left( \frac{P_N}{10^3} \right) \right]^2 + C \cdot \log_{10} \left( \frac{P_N}{10^3} \right) + D \quad (2.15)$$

**Tablo 2.3.** Motor teknolojileri ve enerji verimlilik potansiyelleri [43]

Motor Tipi		IE1	IE2	IE3	IE4	IE5
Üç fazlı sincap kafesli asenkron motor	Rastgele sıralı sargılar	Evet	Evet	Evet	Zor	Hayır
	Düzenli sıralı sargılar: IP2x	Evet	Evet	Evet	Hayır	Hayır
	Düzenli sıralı sargılar: IP4x ve üzeri	Evet	Evet	Zor	Zor	Hayır
Üç fazlı bilezikli asenkron motor		Evet	Evet	Evet	Zor	Hayır
Bir fazlı asenkron motor	Kalkış kondansatörlü	Zor	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
	Sürekli kondansatörlü	Evet	Zor	Hayır	Hayır	Hayır
	Kalkış ve sürekli kondansatörlü	Evet	Zor	Hayır	Hayır	Hayır
	Yardımcı sargılı	Zor	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Senkron Motorlar	Şebeke kalkışlı kalıcı mıknatıslı	Evet	Evet	Evet	Zor	Hayır

**Tablo 2.4.** 0,75 kW ile 200 kW arası interpolasyon katsayıları [43]

IE Kodu	Katsayılar	2p=8 750 rpm	2p=6 1000 rpm	2p=4 1500 rpm	2p=2 3000 rpm
IE1	A	2,4433	0,0786	0,5234	0,5234
	B	-13,8	-3,5838	-5,0499	-5,0499
	C	30,656	17,2918	17,418	17,418
	D	65,238	72,2383	74,3171	74,3171
IE2	A	2,1311	0,0148	0,0278	0,2972
	B	-12,029	-2,4978	-1,9247	-3,3454
	C	26,719	13,247	10,4395	13,0651
	D	69,735	77,5603	80,9761	79,077
IE3	A	0,7189	0,1252	0,0773	0,3569
	B	-5,1678	2,613	-1,8951	-3,3076
	C	15,705	11,9963	9,2984	11,6108
	D	77,074	80,4769	83,7025	82,2503
IE4	A	0,6556	0,3598	0,2412	0,34
	B	-4,7229	-3,2107	-2,3608	-3,0479
	C	13,977	10,7933	8,446	10,293
	D	80,247	84,107	86,8321	84,8208



## 2.7. Asenkron Motor Sürücüleri

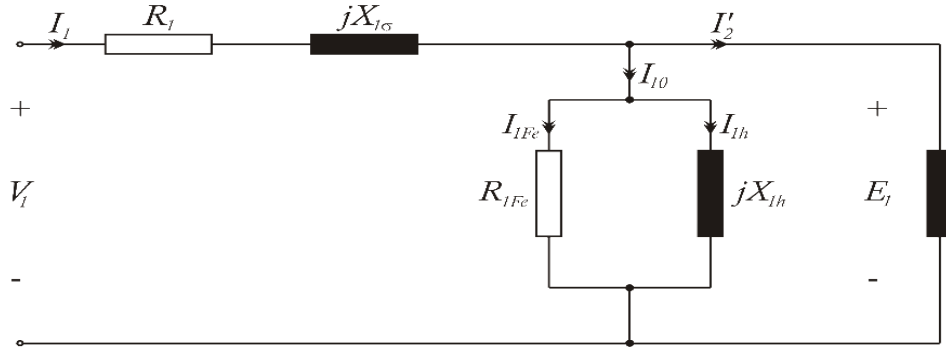
Motor sürücüleri endüstrinin temelini oluşturan asenkron motorların hızının ve momentinin kontrol edilmesi için kullanılırlar. Şekil 2.13'te örnek bir asenkron motor sürücü görseli verilmiştir. Asenkron motorun hızını kontrol edebilmek için sadece iki teknik vardır. Birincisi stator ve rotor manyetik alanlarının hızı olan senkron hızı değiştirmek, diğer teknik ise belirli bir yük için motorun kaymasını değiştirmektir. Senkron hızın değişimi için frekansı ya da makinanın kutup sayısını, kayma değişikliği için ise rotor direncini ya da motorun uç gerilimini değiştirmek gerekmektedir. Geçmişte hız değiştirme yöntemi olarak elektriksel frekans kontrolü için generatör veya mekanik frekans değiştiriciler çalıştırmak gerekliyken, günümüzde yarı iletken değişken frekanslı asenkron motor sürücülerinin geliştirilmesi ile bu işlem kolaylaştırılmıştır. Asenkron motor sürücülerinin girişleri genellikle 1 fazlı veya 3 fazlıdır, frekansları 50 Hz veya 60 Hz olabilir, 208 V ile 230 V aralığında çalışabilirler. Çıkış frekansı 0 Hz - 120 Hz aralığında, çıkış gerilimi ise 0 V'tan asenkron motorun nominal gerilimine kadar değiştirilebilir [38].



Şekil 2.13. Asenkron motor sürücü

## 2.8. Asenkron Motor Eşdeğer Devresi

Asenkron motorlar sadece stator sargılarına gerilim uygulanması prensibiyle çalışmaktadır. Rotor devresindeki akım ve gerilimin indüklenmesi temel olarak transformatörlere benzer. Bu sebeple eşdeğer devresi transformatörlerle çok benzerlik gösterir. Şekil 2.14'te asenkron motorun stator eşdeğer devresi, Şekil 2.15'de ise rotor eşdeğer devresi görülmektedir [36].



**Şekil 2.14.** Asenkron motor stator eşdeğer devresi

İlk olarak statordaki koşullar düşünülürse, stator uç gerilimi (2.16)'da verildiği gibi oluşur.

$$V_1 = E_1 + I_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) \quad (2.16)$$

### 2.8.1. Rotor Devre Modeli

Herhangi bir hızda rotorda indüklenen gerilimin frekansı ve genliği motorun kayması ile doğru orantılıdır. Herhangi bir kaymada indüklenen rotor gerilim denklemi (2.17)'de verilmiştir.

$$E_2 = s \cdot E_{20} \quad (2.17)$$

Herhangi bir kaymada rotorda indüklenen gerilimin frekansı ise aşağıda verilen (2.18)'deki denklemle hesaplanır.

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (2.18)$$

$R_2$  Rotor direnci,  $X_{2\sigma}$  Rotor kaçak reaktansı olduğu düşünülürse rotordan akan akım aşağıdaki denklemler kullanılarak bulunur [38].

$$I_2 = E_2 / (R_2 + jX_{2\sigma}) \quad (2.19)$$

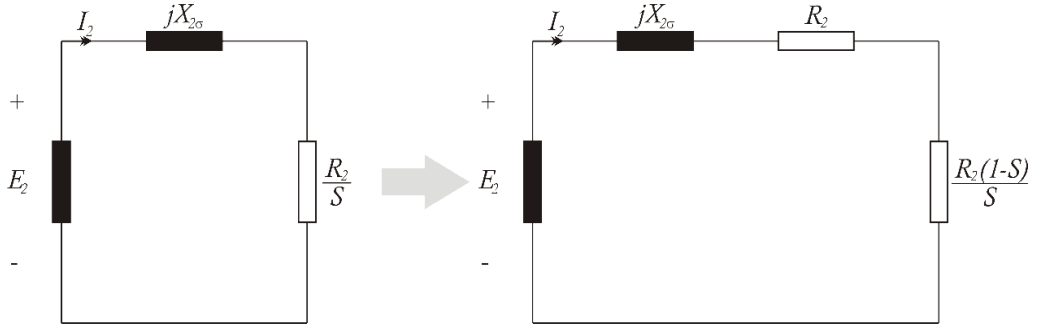
$$I_2 = E_2 / (R_2 + jsX_{2\sigma_0}) \quad (2.20)$$

$$I_2 = E_{20} / (R_2/s + jX_{2\sigma_0}) \quad (2.21)$$

Eşdeğer rotor empedansı ise aşağıdaki formülle hesaplanır.

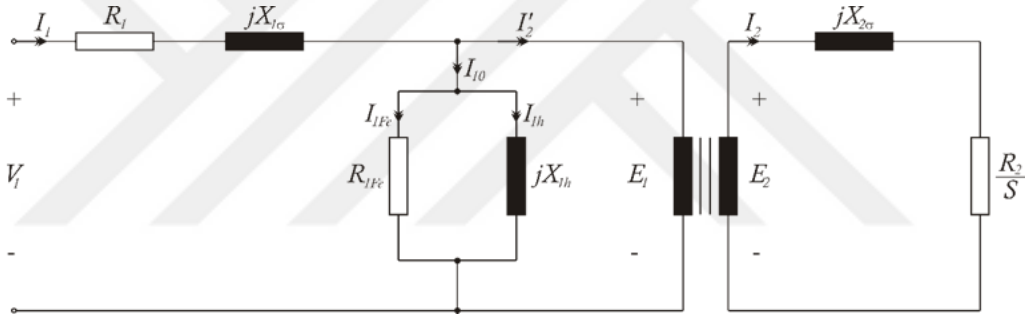
$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma_0} \quad (2.22)$$

Asenkron motorun rotor eşdeğer devre modeli Şekil 2.15’de verilmiştir.

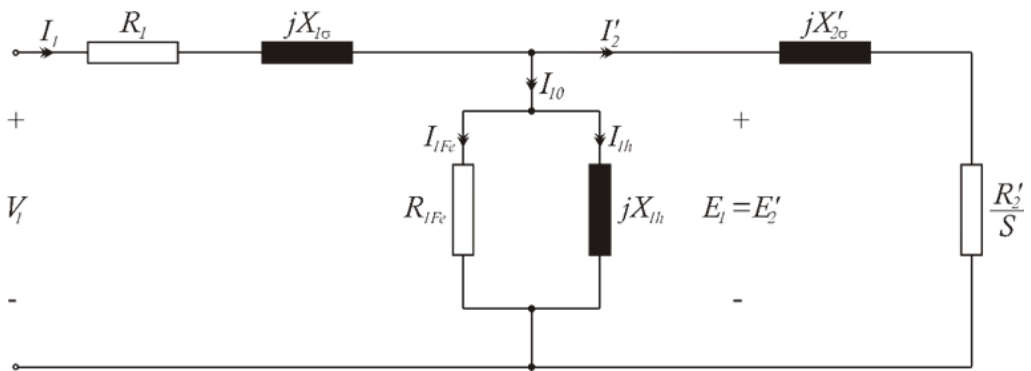


Şekil 2.15. Asenkron motor rotor eşdeğer devresi

Buna göre asenkron motor bir faz transformatör eşdeğer devresi Şekil 2.16’da, ayrıca asenkron motor rotor devresi statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi ise Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Asenkron motor bir faz transformatör eşdeğer devresi



Şekil 2.17. Asenkron motor rotor devresi statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi

### 3. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışması kapsamında aynı güçteki ve ölçülerdeki IE2 ve IE3 verim sınıfına ait asenkron motorların sürücü beslemeli olarak performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, deney düzeneği hazırlanarak doğru akım, kısa devre, boş çalışma ve yüklü çalışma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde 1.1 kW gücündeki sincap kafesli 2 kutuplu asenkron motorlar, bu motorların beslemesi için ACS355 asenkron motor sürücüsü, akım, gerilim ve sıcaklık parametrelerinin alınması için NI kartlar ve termokupl, NI kartlar ile okunan değerlerin işlendiği LabVIEW yazılımı kullanılmıştır.

#### 3.1. Motorlar

Tez çalışmasında yapılan deneylerde Volt VM 80-2 tipte, 3 fazlı, 1.1 kW gücünde IE2 ve IE3 verimlilik sınıflarına ait iki asenkron motor kullanılmıştır. Kullanılan motorlara ilişkin etiketler ve motorların görselleri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.

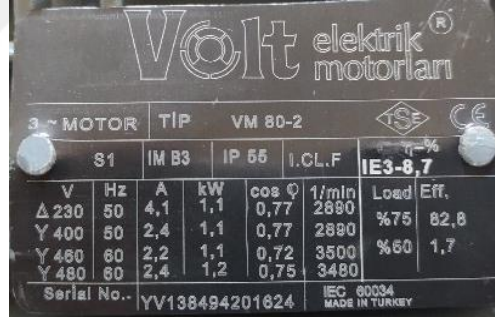


Label (a) for IE2 motor. It features the Volt logo, CE and TSE marks, and a QR code. The label includes technical specifications for a 3-phase motor (VM 80-2) with a power of 1.1 kW and a speed of 2890 rpm. The efficiency is listed as 79.6%.

3 ~ MOT		TIP		VM 80-2			
S1		IMB3		IP 55			
I.C.L.F		I.C.L.F		I.C.L.F			
IE2-79,6		IE2-79,6		IE2-79,6			
V	Hz	A	kW	cos φ	1/min	GÜÇ	VERİM
Δ 230	50	4,1	1,1	0,79	2890	%75	80
Y 400	50	2,4	1,1	0,79	2890	%50	79
Y 480	60	2,4	1,32	0,77	3475		

IMAL YILI 20180104  
SERI NO. MP00333730  
IEC 60034  
MADE IN TURKEY

(a)



Label (b) for IE3 motor. It features the Volt logo, CE and TSE marks, and a QR code. The label includes technical specifications for a 3-phase motor (VM 80-2) with a power of 1.1 kW and a speed of 2890 rpm. The efficiency is listed as 82.8%.

3 ~ MOTOR		TIP		VM 80-2			
S1		IM B3		IP 55			
I.C.L.F		I.C.L.F		I.C.L.F			
IE3-8,7		IE3-8,7		IE3-8,7			
V	Hz	A	kW	cos φ	1/min	Load	Eff.
Δ 230	50	4,1	1,1	0,77	2890	%75	82,8
Y 400	50	2,4	1,1	0,77	2890	%60	1,7
Y 480	60	2,2	1,1	0,72	3500		
Y 480	60	2,4	1,2	0,75	3480		

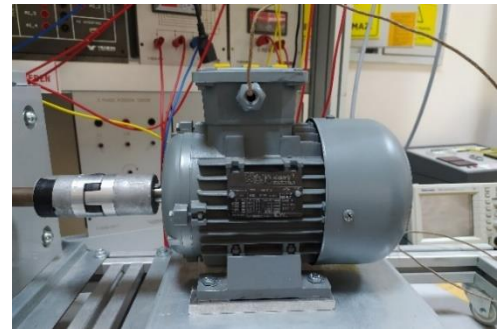
Serial No. YV138494201624  
IEC 60034  
MADE IN TURKEY

(b)

Şekil 3.1. (a) IE2 ve (b) IE3 asenkron motor etiketleri



(a)



(b)

Şekil 3.2. (a) IE2 ve (b) IE3 asenkron motor görselleri

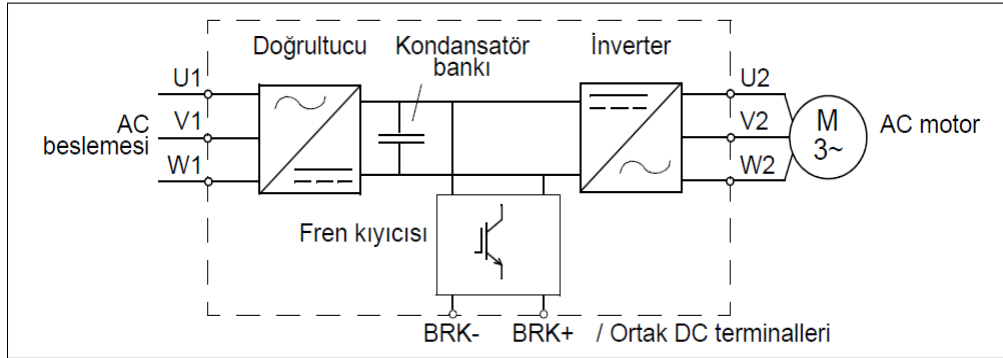
### 3.2. Asenkron Motor Sürücü

Yapılan deneylerde motorların beslemesi ABB marka ACS355 model motor sürücü üzerinden yapılmıştır. Şekil 3.3’de deneylerde kullanılan sürücüye ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.3. Asenkron motor sürücüsü

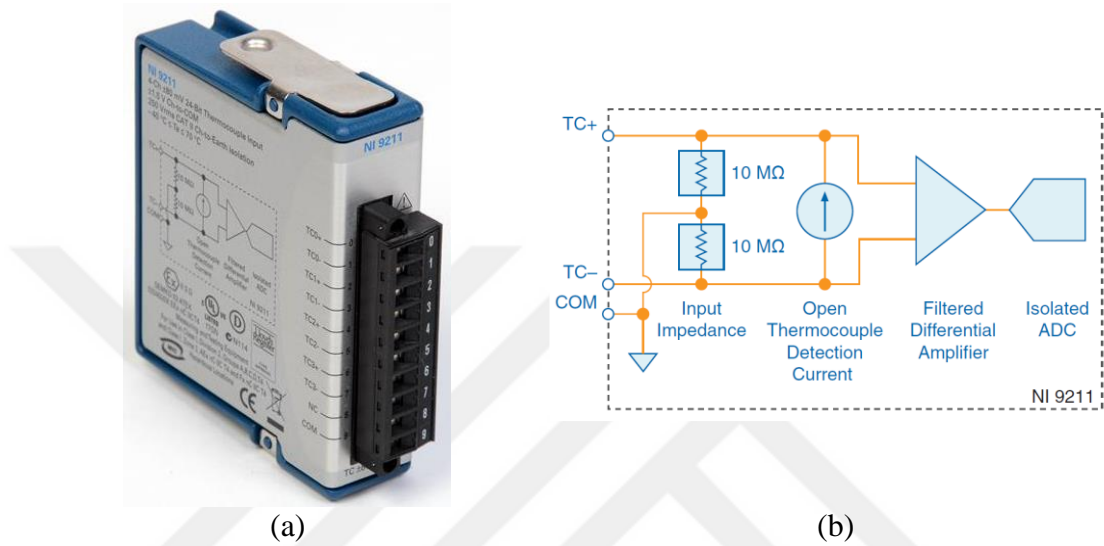
Sürücünün elektronik devresindeki doğrultucu AC gerilimi DC gerilime dönüştürür. Ara devrenin kondansatör bankı DC gerilimi sabitler. Inverter DC gerilimini AC motor için tekrar AC gerilimine dönüştürür. Fren kıyıcısı, devredeki gerilim maksimum sınırı aştığında harici fren rezistörünü ara DC devresine bağlar. Şekil 3.4’de deneylerde kullanılan sürücüye ait devre şeması verilmiştir



Şekil 3.4. Asenkron motor sürücü devre şeması

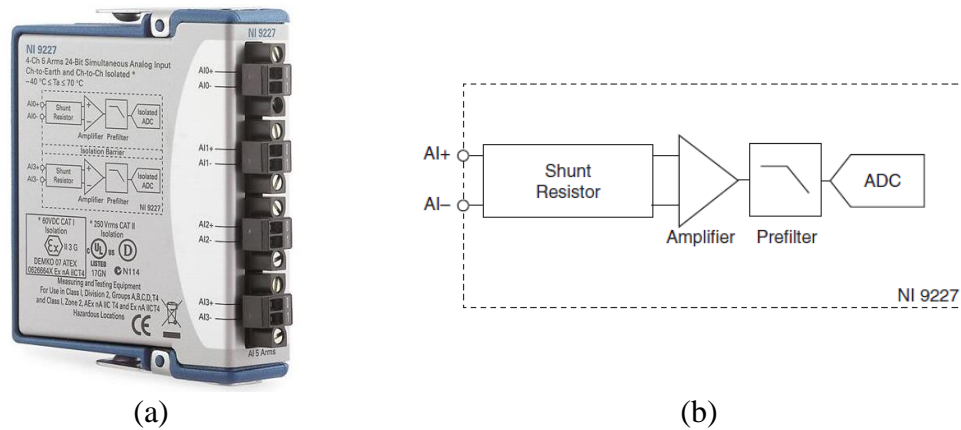
### 3.3. Veri Toplama Düzenekleri

Deney sırasında motorun akım, gerilim, sıcaklık değerleri veri toplama düzenekleri ile alınarak bilgisayara aktarılmıştır. Asenkron motorların iç ve dış ortam sıcaklık verilerinin ölçümü için K tipi termokupllar ve NI 9211 termokupl giriş modülü kullanılmıştır. NI 9211 modülü 4 kanallı, 24 bit değerinde veri işleme kartıdır. Şekil 3.5’de NI 9211 modülüne ilişkin görsel ve iç bağlantı şeması verilmiştir.



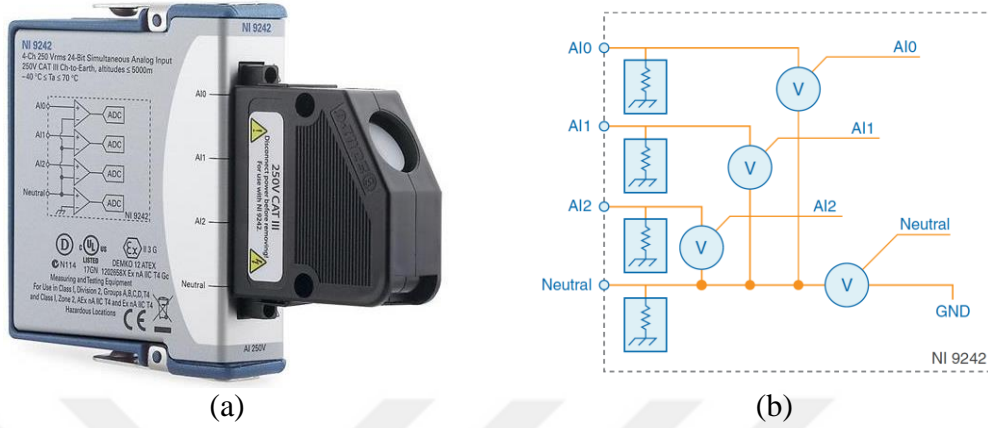
Şekil 3.5. (a) NI 9211 modülü (b) NI 9211 modülünün bir kanalının devre şeması

Asenkron motorların devreden çektiği akım sinyallerinin ölçülüp incelenmesi için NI 9227 akım ölçme modülü kullanılmıştır. Şekil 3.6’da görseli ve bağlantı şeması verilen NI 9227 modülü 4 kanallı, 24 bit değerinde veri işleme kartıdır.



Şekil 3.6. (a) NI 9227 modülü (b) NI 9227 modülünün bir kanalının devre şeması

Asenkron motorların gerilim sinyallerinin ölçülüp incelenmesi için NI 9242 gerilim ölçme modülü kullanılmıştır. NI 9242 modülü 4 kanallı, 24 bit değerinde veri işleme kartıdır. NI 9242 modülüne ilişkin görsel Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. (a) NI 9242 modülü (b) NI 9242 modülünün devre şeması

Bu ölçüm modülleri NI cDAQ 9174 şasesi üzerine yerleştirilerek bilgisayar ile NI modüller arasındaki bağlantı sağlanmıştır. NI cDAQ 9174’ e ilişkin örnek bir görsel Şekil 3.8’de verilmiştir.

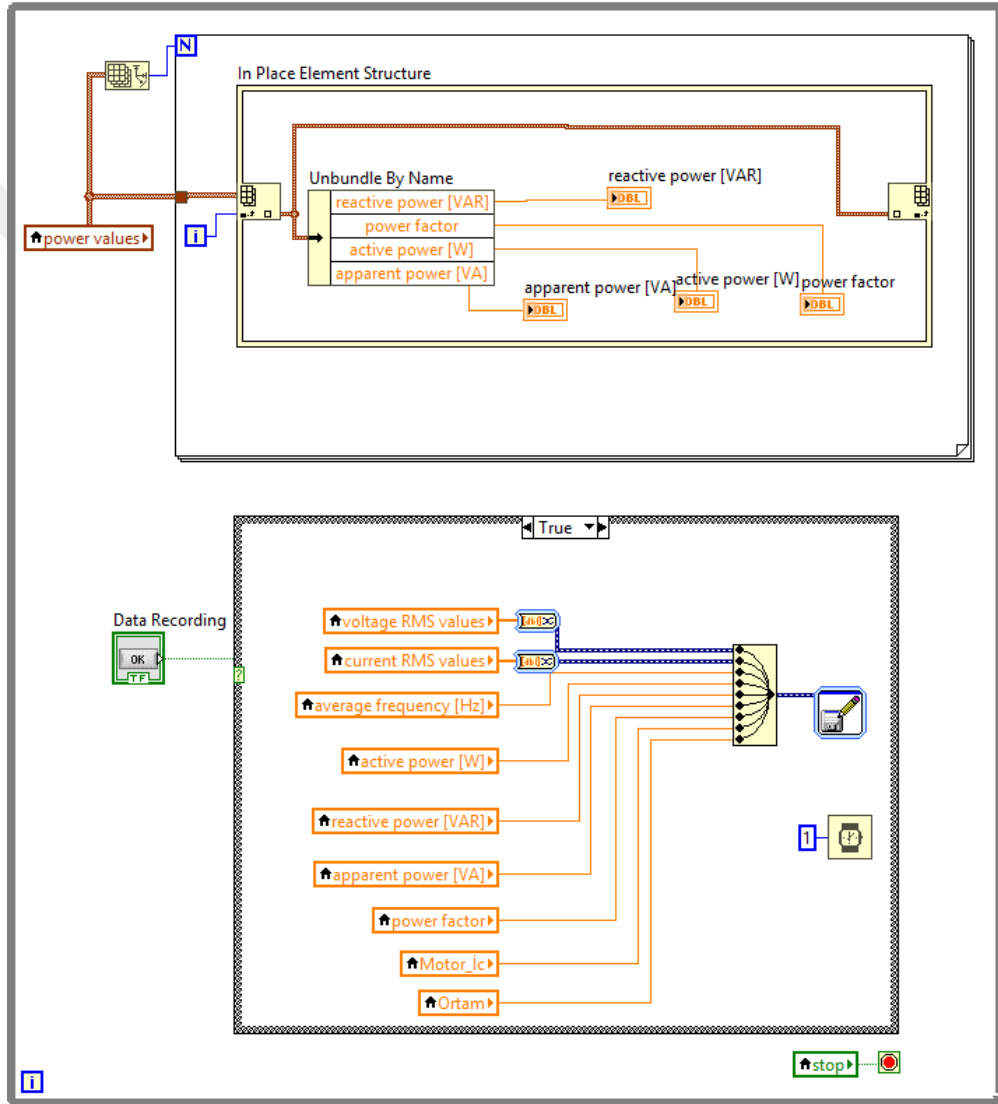


Şekil 3.8. NI ölçüm modülleri ve NI cDAQ 9174 şasesi

### 3.4. LabVIEW Programı

Yapılan deneylerdeki akım, gerilim ve sıcaklık verilerinin anlık olarak incelenmesi ve kaydedilmesi için LabVIEW programından yararlanılmıştır. LabVIEW programı, National Instruments firması tarafından geliştirilen grafik tabanlı olarak

çalışan, fiziksel ortamdaki sinyallerin bilgisayara aktarılıp yorumlanmasını sağlamaktadır. Program ön panel ve blok panel olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Ön panel kısmında okunacak sinyallerin gösterileceği grafik ve gösterge gibi elemanlar bulunur. Blok panel ise, sinyallerle ilgili algoritmaların oluşturulduğu kısımdır. LabVIEW programı kullanım kolaylığı ve sadeliğinden dolayı gerçek zamanlı olarak yapılacak sinyal okuma için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.9'da LabVIEW tabanlı veri kaydı sistemi blok diyagramına ilişkin görsel verilmiştir.



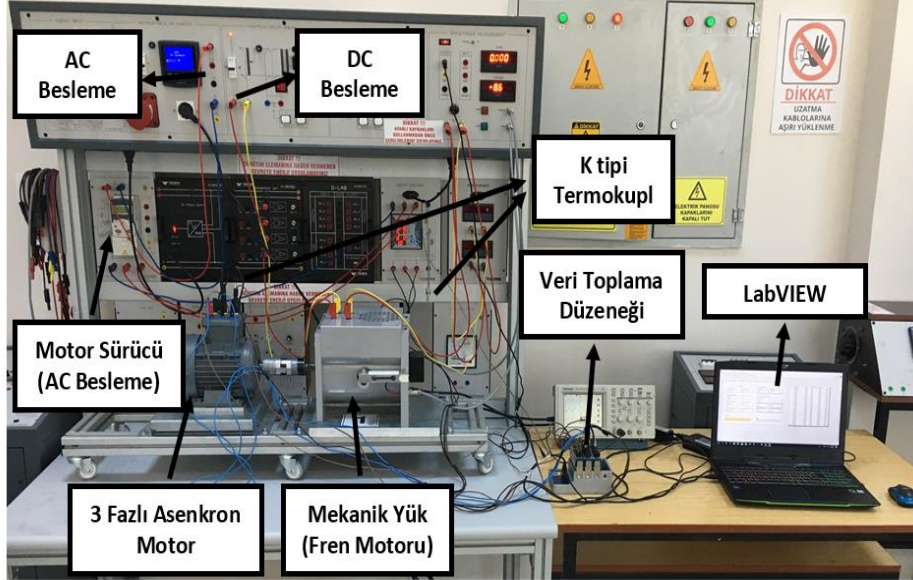
Şekil 3.9. LabVIEW Tabanlı Veri Kaydı Sistemi Blok Diyagramı

### 3.5. Deney Düzenegi ve Deney Blok Şeması

Deney çalışmaları Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Makinaları Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler kapsamında motor sürücüsü, 3 fazlı asenkron motor, mekanik yük, AC ve DC beslemeler kullanılarak

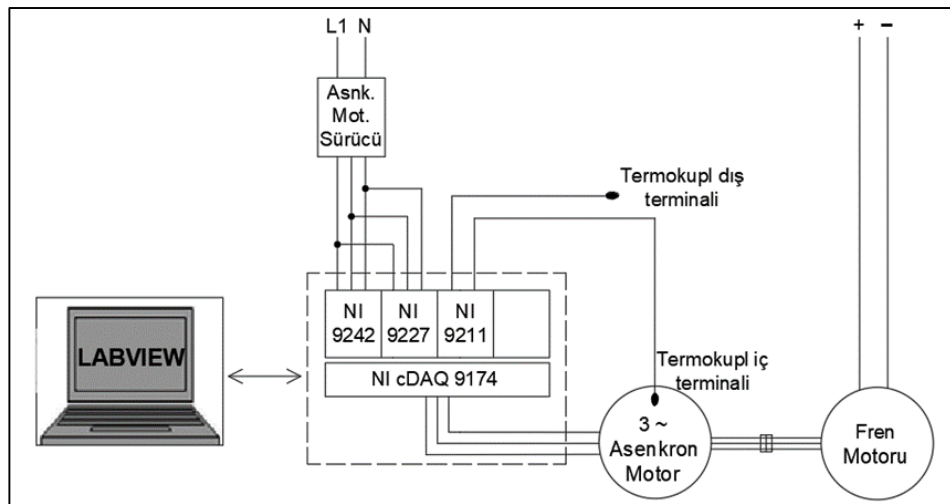


Şekil 3.10'da verilen deney düzeneği kurulmuştur. Motor üzerinden yapılacak sinyal okumaları için bilgisayar ve veri toplama düzeneği ile termokupllar da deney düzeneğinde bulunan diğer elemanlardır.



Şekil 3.10. Deney düzeneği

Şekil 3.11'de deney düzeneğinde kullanılan elemanların bağlantı şeması verilmiştir. 3 fazlı asenkron motor, sürücü üzerinden beslenmiştir. Motor çalışması esnasında akım, gerilim ve sıcaklık sinyallerinin okunması için motor ile NI modüller arasında bağlantılar yapılmıştır. Fren motoru olarak kullanılan motor ayrıca bir DC kaynak üzerinden beslenmiştir. Sinyallerin bilgisayar ortamına aktarılması için veri toplama düzeneği ile bilgisayar arasında bağlantı yapılmıştır.

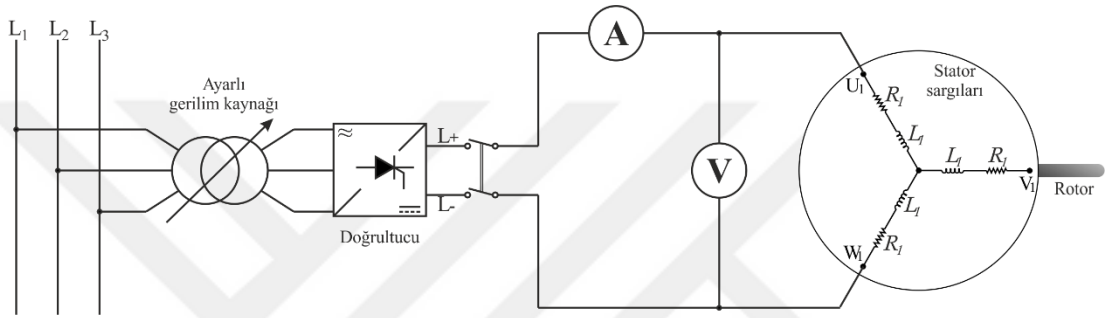


Şekil 3.11. Devre şeması

### 3.6. Deneyleer

#### 3.6.1. Stator Direnci İçin Doğru Akım Deneyi

Doğru akım deneyi stator sargı direncini hesaplamak için yapılan deneydir. Stator sargıları yıldız bağlanarak ve sargılara doğru akım uygulanarak yapılır. Uygulanan akım doğru akım olduğu için rotor devresinde gerilim indüklenmez ve rotordan akım akmaz. Akımı etkileyen tek büyüklük stator direncidir ve bu deney ile stator direnci belirlenir. Doğru akım deneyi için kullanılan bağlantı Şeması Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Doğru akım deneyi devresi

Doğru akım deneyinde ölçülen akım ve gerilim değerleri üzerinden stator direnci denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır. Hesaplanan doğru akım direnci kullanılarak (3.2) bağıntısına göre alternatif akım direnci bulunur. Bu direnç değeri sıcaklığa bağlı olarak deęiŐtięi için denklem 3.3 kullanılarak sıcaklığa göre düzenlenmiş stator direnç değeri bulunur.

$$R_{sdc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (3.1)$$

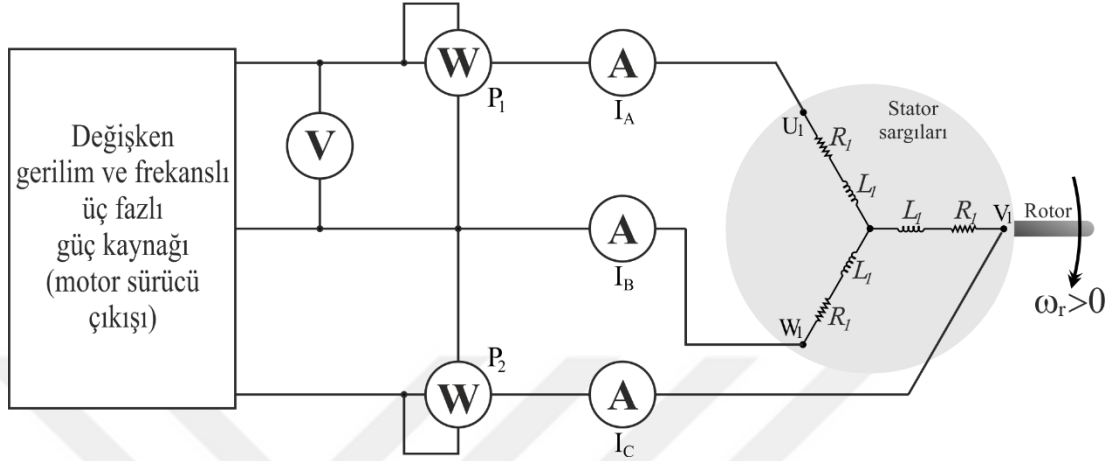
$$R_{sac} = R_{sdc} \cdot 1,1 \quad (3.2)$$

$$R_1 = R_{sac} \cdot \frac{235 + T_{10}}{235 + T_{20}} \quad (3.3)$$

#### 3.6.2. Motor Boşta alıŐma Deneyi

Bir asenkron motorun boşta çalışması miline herhangi bir yükün bağlı olmadığı durumdaki çalışma koŐulunu ifade eder. Motorun milinde yük olmasa da milin hareketinden kaynaklı olarak sürtünme ve vantilasyon kayıpları meydana geldiği için

rotorun hızı senkron hıza ulaşamaz ancak senkron hıza çok yakın bir değerde olur. Rotor hızının senkron hıza çok yakın olmasından dolayı kayma değeri de oldukça düşük olur. Bir asenkron motorun boşta çalışma deneyi Şekil 3.13’de verilen devreye göre yapılır.



**Şekil 3.13.** Asenkron motor boşta çalışma deneyi devresi

Boşta çalışma deneyinde motora ilişkin şebekeden çekilen akım, şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen toplam güç değerleri ölçülür. Ölçülen bu değerler üzerinden motorun stator demir ve stator bakır kayıpları ile sürtünme-vantilasyon kayıpları tespit edilir. Ölçülen toplam güç değerinden, stator sargılarından akan akımlardan dolayı oluşan bakır kayıp gücü çıkarıldığında geriye kalan güç stator demir kayıpları ile sürtünme ve vantilasyon kayıplarını verir.

Ölçülen gerilim ve akım arasında yazılan denklem (3.4) ile toplam empedans, ölçülen güç faktörü ile empedans arasında yazılan denklem (3.5) ve denklem (3.6) ile demir direnci ve mıknatıslanma reaktansı bulunur.

$$Z_0 = V_0 / I_0 \quad (3.4)$$

$$R_{1fe} = Z_0 / \cos\theta \quad (3.5)$$

$$X_{1h} = Z_0 / \sqrt{(1 - \cos^2\theta)} \quad (3.6)$$

Demir direnci değeri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir ve denklem (3.7) ile demir direncinin sıcaklığa bağlı değeri hesaplanabilmektedir.

$$R_{1fe}' = R_{1fe} \cdot \frac{235 + T_{10}}{235 + T_{20}} \quad (3.7)$$

Motorun çektiği akım değeri ile doğru akım deneyinden bulunan stator direnç değeri kullanılarak denklem (3.8) aracılığıyla stator bakır kayıpları hesaplanır. (3.9) ifadesi kullanılarak motorun toplam gücünden stator bakır kayıpları çıkarılarak sürtünme ve vantilasyon ile demir kayıplarının miktarı hesaplanmaktadır.

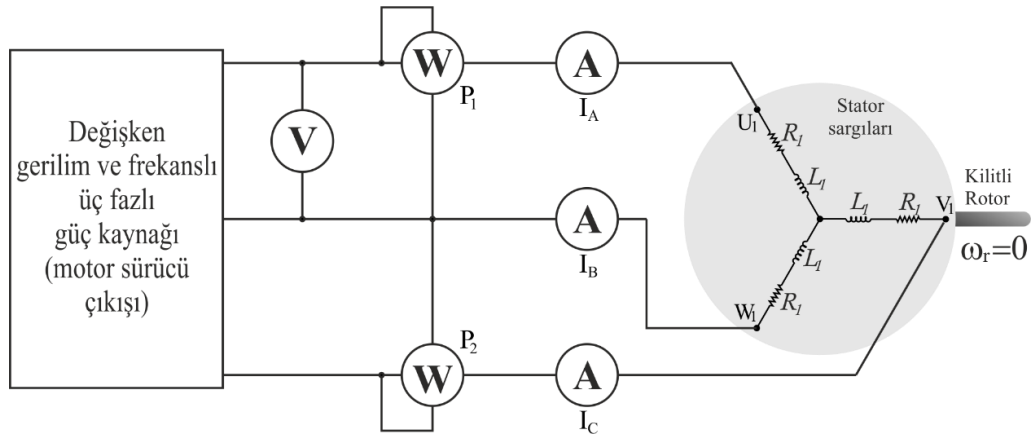
$$P_{cu1} = 3 \cdot I_0^2 \cdot R_1 \quad (3.8)$$

$$P_{rot} = P_1 - P_{cu1} \quad (3.9)$$

### 3.6.3. Kısa Devre Deneyi

Bir asenkron motorun kısa devre deneyi için Şekil 3.14'te verilen bağlantılar yapılır ve rotorun hareket etmemesi sağlanıp, motora gerilim uygulanarak deney gerçekleştirilir. Asenkron motorların kısa devre deneyinde rotor hareket etmediği için bu deney aynı zamanda kilitli rotor deneyi olarak da isimlendirilir. Uygulanan gerilim değeri sıfırdan başlayarak arttırılır ve stator akımı nominal değerine ulaştığında motorun akım, gerilim ve güç değerleri ölçülür.

Rotor dönme hareketi yapmadığı için kısa devre deneyinde kayma değeri 1 olur. Böylece eş değer devrede  $R_2/s$  olarak ifade edilen rotor direnci çok küçük bir değer alır. Eşdeğer devredeki rotor ve uyarım devre empedansları kıyaslandığında, uyarım devresinin eşdeğer empedansı daha büyük olur. Bu nedenle eş değer devre göz önüne alındığında stator akımının neredeyse tamamı rotor devresi üzerinden akmaktadır.



Şekil 3.14. Asenkron motor kısa devre deneyi devresi

Kısa devre deneyinde yapılan ölçümlerde bulunan akım ve gerilim değeri üzerinden (3.10)'da verilen denklem ile makinanın stator ve rotor devresi toplam empedansı bulunur. Kısa devre deneyi sırasında ölçülen güç faktörü değeri ve empedans değeri üzerinden (3.11) ve (3.12)'de verilen denklemler ile toplam direnç ve toplam reaktans değerleri bulunur.

$$Z_k = V_k / I_k \quad (3.10)$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos\theta_k \quad (3.11)$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin\theta_k \quad (3.12)$$

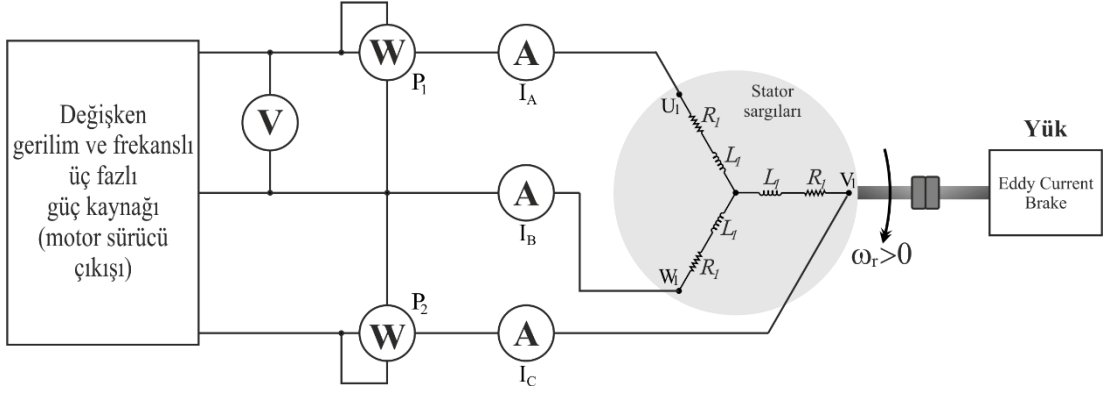
Denklem (3.11)'de bulunan kısa devre deneyi toplam direnç değerinden, doğru akım deneyinde hesaplanan stator direnç değeri çıkarıldığında rotor devresi direnci (3.13)'te verildiği gibi hesaplanmaktadır. Stator ve rotor devresindeki reaktans değerleri yaklaşık olarak eşittir ve (3.14)'te verilen denklemde görüleceği gibi toplam reaktansın yarısı alınarak hesaplanır.

$$R_2 = R_k - R_1 \quad (3.13)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_k}{2} \quad (3.14)$$

#### **3.6.4. Motor Yüklü Çalışma Deneyi**

Bir asenkron motorun yüklü çalışma deneyi Şekil 3.15'te verilen düzeneğe göre, motorun miline bağlanacak bir fren motoru ile farklı yükleme koşulları için yapılmaktadır. Yüklü çalışma deneyi ile motorda meydana gelen kayıplar, verim ve kayma gibi değerler bulunur.



Şekil 3.15. Asenkron motor yüklü çalışma deneyi devresi

Yüklü çalışma deneyinde ölçülen makine giriş gücünden, boşa çalışma deneyi ile hesaplanan stator bakır kaybı gücü çıkarıldığında (3.15)'te verildiği gibi hava aralığı gücü bulunur. Hava aralığı gücünden (3.16)'deki eşitlik kullanılarak dönüştürülmüş güç değeri hesaplanır. Denklem (3.17) kullanılarak dönüştürülmüş güç ile sürtünme-vantilasyon ve diğer güçler arasındaki fark alınarak, motorun çıkış gücü bulunur. Hesaplanan çıkış gücü ile motorun giriş gücü arasında yazılacak (3.18) denkleme göre makinanın yüklü çalışma durumundaki verim değeri hesaplanmaktadır.

$$P_i = P_1 - P_{cu1} \quad (3.15)$$

$$P_{conv} = P_i \cdot (1 - s) \quad (3.16)$$

$$P_2 = P_{conv} - P_{rot} \quad (3.17)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.18)$$

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada IE2 ve IE3 verim sınıfına ait aynı güç değerindeki iki asenkron motor için doğru akım, kısa devre, boşa çalışma ve yüklü çalışma deneyleri ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan deneylerde motorlara ait akım, gerilim ve güç değerleri LabVIEW programı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen değerler kullanılarak motorların eşdeğer devre parametreleri çıkarılmıştır. Motorlardaki kayıplar ve buna bağlı verim değerleri eşdeğer devre parametreleri üzerinden hesaplanmıştır.

### 4.1. IE2 Verim Sınıfındaki Asenkron Motora İlişkin Deneyler

#### 4.1.1. Doğru Akım Deneyi

Deney kapsamında asenkron motorlar için yapılan doğru akım deneyinde hesaplanan stator doğru akım direnci, alternatif akım direnci ve stator direnci Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablodaki değerler doğruluk değerinin yüksek tutulması amacıyla beş farklı ölçüm sonucu hesaplanan değerlerin ortalamasından elde edilmiştir. Tablo 4.1'de verilen direnç değerleri, deneyin yapılışında uygulanan gerilim değeri ve motorun çektiği akım değeri üzerinden (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

**Tablo 4.1.** IE2 motorunun doğru akım deneyinde elde edilen sonuçlar

$R_{sdc}$	$R_{sac}$	$R_1$
7.18	7.89	8.01

#### 4.1.2. Boşa Çalışma Deneyi

Boşa çalışma deneyinde motorun çektiği boşa çalışma akımı, motora uygulanan boşa çalışma gerilimi, motorun çektiği güç, güç faktörü ile motorun iç ve dış sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Alınan ölçüm sonuçları (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) ve (3.9) denklemlerine uygulanarak hesaplanan parametreler Tablo 4.2'de verilmiştir.

**Tablo 4.2.** IE2 motorunun boşa çalışma deneyinde hesaplanan parametreler

$Z_0$	$R_{1fe}$	$R_{1fe}'$	$X_{1h}$	$P_{cu1}$	$P_{rot}$
234,72	462,83	469,71	272,37	9,30	36,78

#### 4.1.3. Kısa Devre Deneyi

Kısa devre deneyinde motorun çektiği kısa devre akımı, motora uygulanan kısa devre gerilimi ve motorun deneydeki güç faktörü değerleri ölçülmüştür. Alınan ölçüm sonuçları (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) ve (3.14) denklemlerine uygulanarak hesaplanan parametreler Tablo 4.3’de verilmiştir.

**Tablo 4.3.** IE2 motorunun kısa devre deneyinde hesaplanan parametreler

$Z_k$	$R_k$	$R_2$	$X_k$	$X_1$	$X_2$
17,52	12,78	4,76	11,98	5,99	5,99

#### 4.1.4. Yüklü Çalışma Deneyi

Yüklü çalışma deneyi, farklı yükleme koşullarında makinanın verim değerinin ölçülmesi için gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde, farklı yükleme koşulları altındaki rotorun hızı ölçülmüş ve kayma değeri hesaplanmıştır. Ayrıca yüklü çalışma deneyinde motorda meydana gelen kayıplar (3.15), (3.16) ve (3.17) kullanılarak hesaplanmıştır ve motorun verim değeri (3.18) ile bulunmuştur. Yüklü çalışma deneyi sonucunda hesaplanan parametreler Tablo 4.4’de verilmiştir.

**Tablo 4.4.** IE2 motorunun yüklü çalışma deneyinde hesaplanan parametreler

$s$	$P_i$	$P_{conv}$	$P_2$	$\eta$
0,08	195,42	177,12	140,33	68,54

#### 4.2. IE3 Verim Sınıfındaki Asenkron Motora İlişkin Deneyler

IE2 verimlilik sınıfındaki asenkron motor parametrelerinin hesaplanması için kullanılan denklemler, IE3 verim sınıfındaki asenkron motor için de kullanılmıştır. Yapılan deneylerde IE2 motor için ölçülen parametreler, IE3 motorda da ölçülmüştür.

##### 4.2.1. Doğru Akım Deneyi

IE3 verim sınıfındaki asenkron motor ile yapılan doğru akım deneyinde hesaplanan parametreler Tablo 4.5’de verilmiştir.

**Tablo 4.5.** IE3 motorunun doğru akım deneyinde elde edilen sonuçlar

$R_{sdc}$	$R_{sac}$	$R_1$
4.95	5.45	5.53



#### 4.2.2. Boşta Çalışma Deneyi

IE3 verimlilik sınıfındaki asenkron motor parametrelerinin boşta çalışma deneyi ile elde edilen sonuçları Tablo 4.6’da verilmiştir.

**Tablo 4.6.** IE3 motorunun boşta çalışma deneyinde hesaplanan parametreler

$Z_0$	$R_{1fe}$	$R_{1fe}'$	$X_{1h}$	$P_{cu1}$	$P_{rot}$
206,89	529,20	540,95	224,83	8,26	32,01

#### 4.2.3. Kısa Devre Deneyi

Kısa devre deneyinde IE3 verim sınıfındaki motorun hesaplanan parametreleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

**Tablo 4.7.** IE3 motorunun kısa devre deneyinde hesaplanan parametreler

$Z_k$	$R_k$	$R_2$	$X_k$	$X_1$	$X_2$
13,59	5,53	3,43	10,18	5,09	5,09

#### 4.2.4. Yüklü Çalışma Deneyi

IE3 verimlilik sınıfındaki asenkron motor parametrelerinin yüklü çalışma deneyi ile elde edilen sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir.

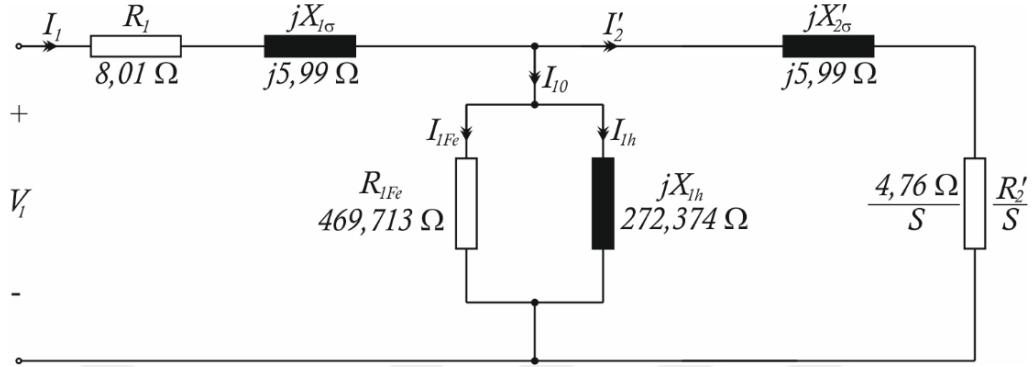
**Tablo 4.8.** IE3 motorunun yüklü çalışma deneyinde hesaplanan parametreler

$s$	$P_i$	$P_{conv}$	$P_2$	$\eta$
0,06	206,82	192,37	160,36	74,56

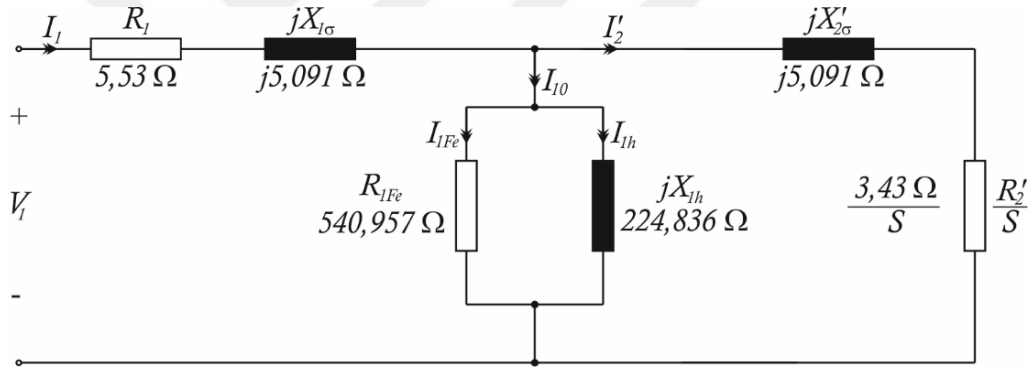
### 4.3. IE2 ve IE3 Verim Sınıfındaki Asenkron Motorların Eşdeğer Devreleri

Asenkron motorların eşdeğer devre parametrelerinin bulunması için deneyler yapılmıştır. Yapılan doğru akım deneyi ile stator direnci hesaplanmıştır. Boşta çalışma deneyi demir direncinin ve mıknatıslanma reaktansının bulunması için yapılmıştır. Kısa devre deneyi sayesinde rotor direnci ile stator ve rotor reaktansları hesaplanmıştır. Yapılan deneylerde alınan ölçümlere göre yapılan hesaplamalar ile elde edilen eşdeğer devreler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi IE2 sınıfı asenkron motor rotor ve stator sargı dirençleri IE3 sınıfına göre yaklaşık %30 daha büyüktür. Buna karşın kaçak akı reaktansları arasındaki farklar ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu durumda manyetik devre relüktanslarında önemli bir fark olmadığı söylenebilir. Buna karşın hava aralığını temsil eden düşey empedans bileşenleri arasında yaklaşık %13 fark bulunmaktadır. Bu fark hava aralığındaki çok küçük

farklardan dolayı oluşabilir. Her iki motorun daha önce herhangi bir onarım geçirmemiş olmaları nedeniyle manyetik devredeki tüm bileşenlerin eşit olduğu kabul edilse bile bu oranda farkların olması muhtemeldir. Düşey empedanstaki bu fark nedeniyle IE3 sınıfı asenkron motor boşa çalışmada daha az akım çekecektir.



Şekil 4.1. IE2 verim sınıfındaki asenkron motorun elde edilen eşdeğer devresi



Şekil 4.2. IE3 verim sınıfındaki asenkron motorun elde edilen eşdeğer devresi

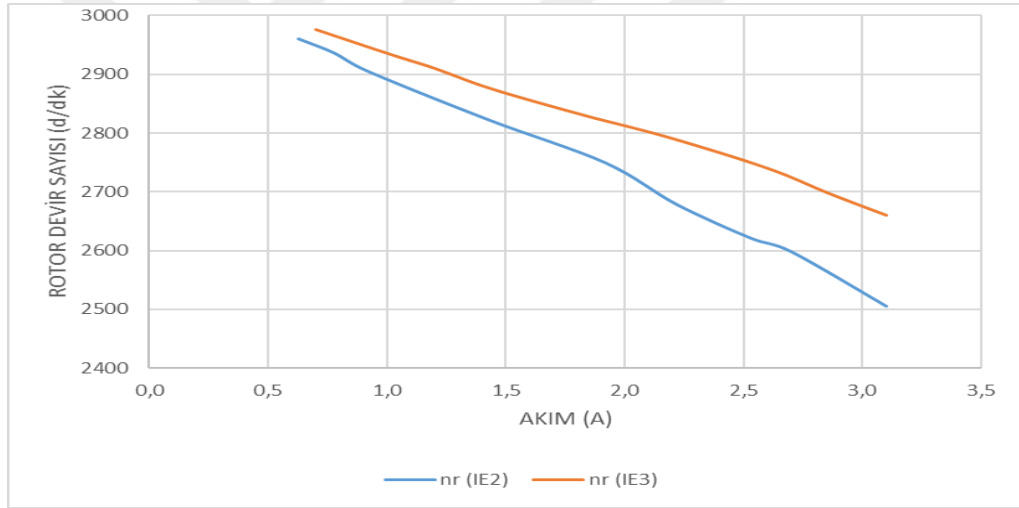
#### 4.4. IE2 ve IE3 Verim Sınıfındaki Asenkron Motor Parametrelerinin Kıyaslanması

Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler ile motorlara ilişkin eşdeğer devre parametreleri elde edilmiştir ve eşdeğer devreler çizilmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri üzerinden motorlarda meydana gelen kayıplar ve motorların verim değerleri hesaplanmıştır.

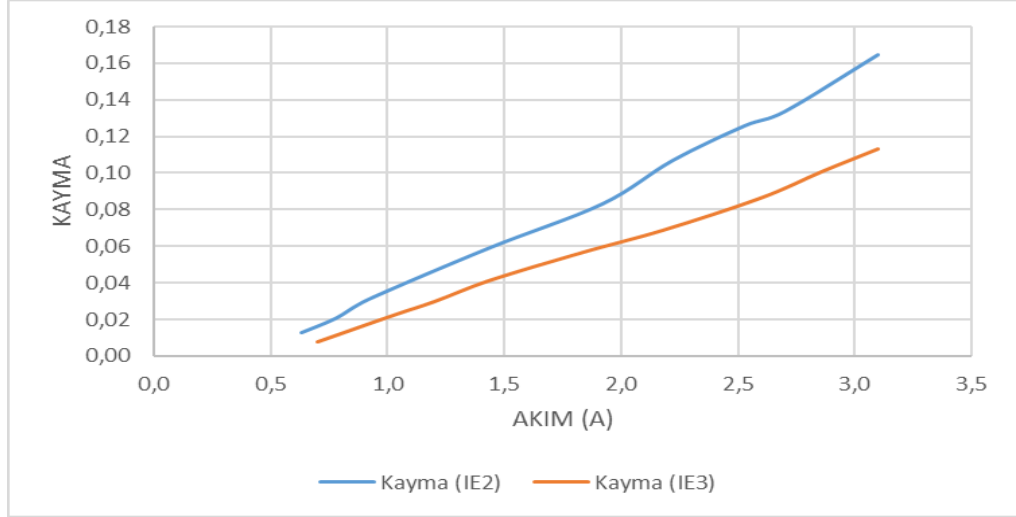
Şekil 4.3'te asenkron motorların farklı yükleme koşulları için rotor devir sayısına ilişkin grafik verilmiştir. Asenkron motorlar yüklendikçe devir sayılarının azaldığı bu grafikte görülmektedir. Aynı yük değişimi için, IE2 verim sınıfı motorların devir sayısındaki azalma IE3 verim sınıfındaki motorlara kıyasla daha fazla olmaktadır. Şekil 4.4'de rotor devir sayısı ile da ilişkili bir parametre olan kaymanın

farklı yükleme şartlarındaki değişim grafiği hem IE2 hem de IE3 verim sınıfındaki motor için gösterilmiştir. Aynı yük değişimi için rotor devir sayısındaki değişim IE2 verim sınıfındaki asenkron motorda daha fazla olduğu için kayma parametresindeki değişim de buna bağlı olarak IE2 verim sınıfı motorda daha fazla olmaktadır.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 birlikte değerlendirildiğinde asenkron motorlar yüklendikçe rotor devir sayıları azalmaktadır. Ancak, motorun besleme frekansı ve kutup sayısına bağlı olan senkron hız sabit olduğu için senkron hız ile rotor devir sayısı arasındaki fark artmaktadır ve buna bağlı olarak kayma değeri artmaktadır. Ayrıca, bu iki grafik asenkron motorların yüklendikçe rotor devir sayısının, senkron hıza ulaşamadığını ve bir kaymanın ortaya çıktığını göstermektedir. Hem rotor devir sayısı hem de kayma değerleri arasındaki fark motorların nominal yük akımı (2,4 A) için yaklaşık %3,3 olarak belirlenmiştir.

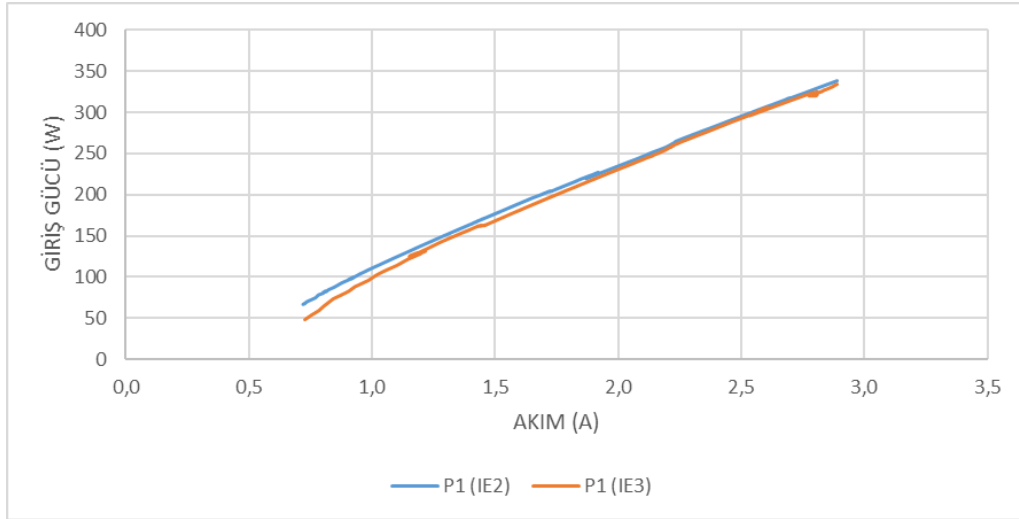


Şekil 4.3. IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-rotor devir sayısı grafiği

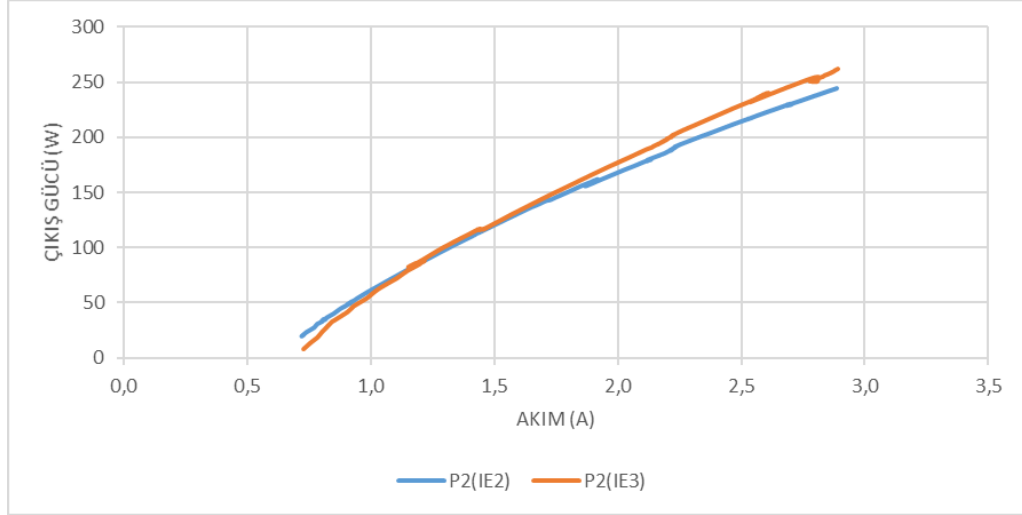


**Şekil 4.4.** IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-kayma grafiği

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da tez çalışması kapsamında kullanılan asenkron motorların giriş ve çıkış güçlerinin farklı yükleme koşullarındaki grafikleri verilmiştir. Giriş güçleri neredeyse aynı olan iki motorun çıkış güçleri özellikle yüklendikçe değişmektedir. Bu motorların nominal yük akımı (2,4 A) için çıkış güçleri arasındaki fark yaklaşık %6,1 olarak belirlenmiştir ve IE3 verim sınıfındaki motorun çıkış gücünün daha yüksek olduğu görülmektedir.

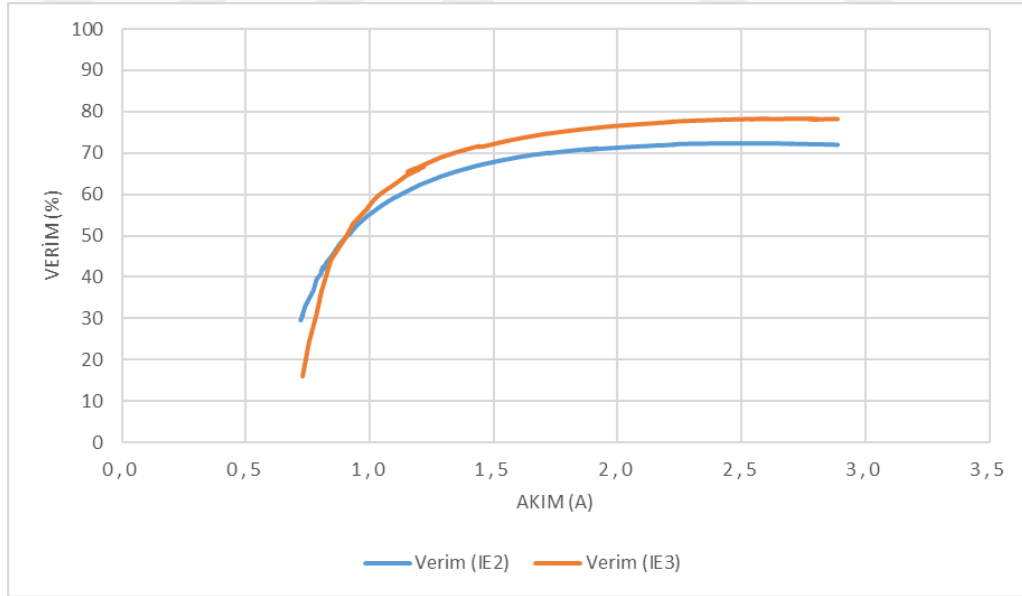


**Şekil 4.5.** IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-giriş gücü grafiği



**Şekil 4.6.** IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-çıkış gücü grafiği

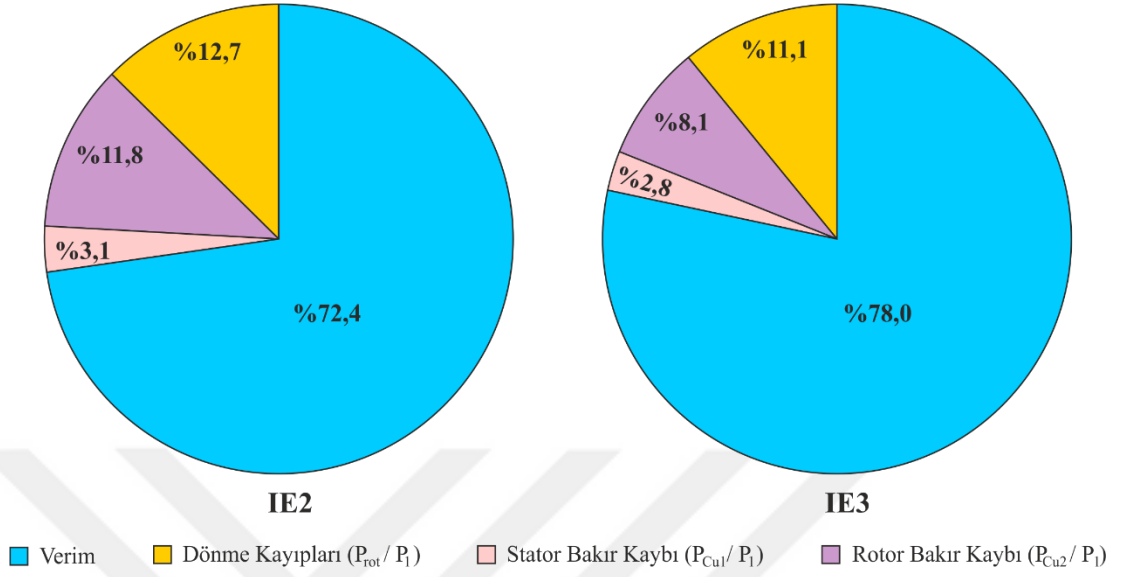
Şekil 4.7’de her iki motor türü için verim değerinin akım değerine bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Giriş ve çıkış güçleri arasındaki ilişkiye bağlı olarak elde edilen verim değeri nominal yük akımı (2,4 A) için IE2 motorda %72,4 ve IE3 motorda %78,0 olup aradaki fark %5,6’dır. Şekil 4.7’de de görüldüğü gibi IE3 motorun verim değeri IE2 motora göre daha yüksektir.



**Şekil 4.7.** IE2 ve IE3 asenkron motorların akım-verim grafiği

Şekil 4.8’de tez çalışmasında kullanılan IE2 ve IE3 verim sınıfındaki asenkron motorlar ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda nominal yük akımı (2,4 A) için elde edilen güç dağılım grafikleri verilmiştir. IE2 verim sınıfındaki motorun bakır ve

dönme kayıpları daha yüksek olduğu için verim değerinin de IE3 sınıfındaki motora göre daha düşük olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.8.** IE2 ve IE3 asenkron motorların tam yükte güç dağılım grafikleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, endüstriyel sistemlerin çok büyük bir kısmında tahrik elemanı olarak kullanılan asenkron motorların verimliliğine etki eden parametreler incelenmiştir. Bu amaçla, IEC standartlarında tanımlanmış olan IE2, IE3, IE4 ve IE5 verim sınıfları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Asenkron motorlar genelleştirilmiş elektrik makineleri kategorisinde eşdeğer devreleri ve matematiksel modelleri çok yaygın olarak incelenen tahrik elemanlarıdır. Çok yaygın kullanım alanları bu makinelerin dünya çapında standart fiziksel ve elektriksel özelliklerde üretimlerini mümkün hale getirmiştir. Tezin ana fikri günümüzde giderek daha çok teşvik edilen sürücü beslemeli asenkron motorlarda standart verim sınıfları arasında deneysel sonuçlara dayalı karşılaştırma yapılması üzerine kurulmuştur.

Bu ana amaca ulaşmak için verim sınıflarının yanı sıra asenkron motorların yapısı, çalışma prensibi ve bu makinelerde verimlilik analizlerine dayalı akademik çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. İkinci aşamada bu motorların kayıplarının hangi etkenlere bağlı olduğu incelenerek tez çalışmasında kurulacak deney setindeki temel bileşenler belirlenmiştir. Bu aşamada deney setinde kullanılan asenkron motor, sürücü, mekanik yük (fren) ünitesi, veri toplama bileşenleri ve LabVIEW yazılımı tanıtılmıştır. Kurulan deney setinde iki farklı (IE2 ve IE3) verim sınıfında, aynı güçte, fiziksel (boyutlar, mil yüksekliği vb.) ve elektriksel (kutup sayısı, sarım şekli vb.) özelliklerde iki motor üzerinde temel deneyler ve yüklü çalışma performans testleri yapılmıştır. Böylece her iki motorun eşdeğer devreleri ve yüke bağlı temel parametrelerinin değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmada, direnç değerinin sıcaklıkla değişim etkisinin de dikkate alınması amacıyla hem ortam sıcaklığı hem de motorların sargı sıcaklıkları sürekli olarak ölçülerek sargı dirençlerinin gerçek zamanlı çalışma şartlarındaki değerleri dikkate alınmıştır. Ayrıca motorlar aynı sürücü ile ve eşdeğer parametre ayarları ile sürülerek referans değerlerin değişmemesi sağlanmaya çalışılmıştır. Elde edilen bulgular önceki bölümde ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Kısaca özetlemek gerekirse; deney sonuçlarında IE2 verim sınıfındaki asenkron motor için stator bakır kayıplarının motor giriş gücüne oranı %3,1, IE3 verim sınıfındaki motor için ise %2,8 olarak hesaplanmıştır. Rotor bakır kayıplarının giriş gücüne oranı ise IE2 motor için yaklaşık %11,8 olurken, IE3 motor için %8,1 olarak ölçülmüştür. Motorda

meydana gelen dönme kaybının giriş gücüne oranı IE2 motorda %12,7 iken, IE3 motorda %11,1 olmuştur. Bu veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar sıralanabilir.

- ✓ IE2 sınıfı motorların sargı dirençleri IE3 sınıfına oranla yaklaşık %30 daha büyüktür. IE3 motorların sarımında %30 daha büyük kesitli iletken kullanılmıştır. İletken kesitinin artırılarak bakır kayıplarının azaltılması yoluyla verimlilik artışı literatürde de incelenen konular arasındadır.
- ✓ Motorların rotor çapı, hava aralığı, oluk tipi gibi parametrelerinin eşdeğer olması nedeniyle stator ve rotor kaçak akı reaktans değerlerinin yaklaşık eşit olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Daha büyük kesitli iletken kullanımı sonucu oluk derinliğindeki değişmelere bağlı olarak meydana gelen relüktans farklılıkları ve üretimde oluşabilecek ihmal edilebilecek kadar küçük değişimler manyetik devre parametrelerini etkileyebilir. Bu çalışmada da demir kaybı direnci ve faydalı akı reaktansı değerlerinin IE3 sınıfı motorda yaklaşık %13 daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu durumda IE3 sınıfı motorun boş çalışma akımının da IE2 motora göre daha düşük olduğu sonucu çıkmaktadır. Boştaki kayıpların azalması motor verimini arttırmaktadır.
- ✓ Motorların mekanik çıktısı olan devir sayısı (dolayısıyla kayma) değişimleri incelendiğinde tam yükte IE3 sınıfı motorun yaklaşık 100 devir daha yüksek devir sayısı çıkışı verdiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla iki kutuplu 3000 d/dk senkron hıza oranla iki motor arasında %3,3'lük bir kayma farkı oluşmaktadır. Bu durumda IE3 sınıfı asenkron motorun manyetik devre kayıplarının daha düşük olduğu sonucu çıkarılmıştır. Yüksek devir sayısı IE3 sınıfı motorun sürtünme ve rüzgâr kayıplarını arttırsa da toplam verim değerinde önemli bir değişiklik oluşturmaz.
- ✓ IE2 ve IE3 sınıfı asenkron motorlarda etiket değerlerine göre tam yükte aralarında yaklaşık %2,1 verim farkı öngörülmektedir. Deneysel



sonuçlarımıza göre tam yükteki verim farkı yaklaşık %5,6 olmuştur. Benzer fark çıkış güçleri arasında da ölçülmüştür. Bu farkın oluşmasında motorun sürücü ile tahrik edilmesinin de etken olduğu söylenebilir. Sürücü parametreleri değişmese de motorların özellikle stator ve rotor sargı dirençleri arasındaki %30'luk fark bu sonucu doğurmaktadır. Dolayısıyla verim sınıfı yükseldikçe sürücü ile beslemenin daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

- ✓ Asenkron motorların sürücü ile beslenmeleri sonucu toplam verimlerinde azalmalar olabilir. Çünkü özellikle küçük güçlü sürücülere bir faz girişi yapılarak sürücü çıkışında üç faza dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm sürücü çıkışındaki sinüsoidal gerilim ve akımın harmoniklerinin artması sonucunu doğurmaktadır. Bu çalışmada da nominal yükte elde edilen verim değerleri motorun etiketinde belirtilen değerlerden IE2 için %7,2 IE3 için %3,7 daha düşük çıkmıştır. Sürücü ile beslenen motorların seçiminde bu etkenin dikkate alınması önemlidir.

Bu sonuçlara dayanılarak çalışma kapsamının genişletilmesi ve farklı verimlilik etkenlerinin araştırılabilmesi için getirilen öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Bu çalışmada 1,1 kW asenkron motorlar kullanılmıştır. Üretici firmalar 2,2 kW altındaki güçlerde IE4 sınıfı motorları ticari olarak sunmamaktadır. Bu nedenle kıyaslama iki motor sınıfı arasında gerçekleşmiştir. İleri çalışmalarda daha yüksek güçlü motorlarla çalışma üç farklı verim sınıfı karşılaştırması yapılabilir. Bu durumda deney setinin donanım bileşenleri (sürücü, fren, güç kaynakları) de yeniden belirlenmelidir.
- Asenkron motorların mekanik veya elektriksel arızaları sonucunda onarımlarının verimlilik üzerine etkileri araştırılabilir. Asenkron motorlar kullandıkları sistemlerde periyodik bakımlardan geçirilmektedir. Mekanik olarak sökülüp takılmalarının rotor dengesi (balansı) üzerinde yapacağı değişimler küçük de olsa verim değişimleri oluşturabilir. Özellikle sargı arızalarında sökme esnasında yapılan ısı

işlemlerin manyetik devredeki histeresiz kayıplarını arttırdığı literatür çalışmaları ile ortaya konulmuştur [44]. Bobinaj işlemi olarak adlandırılan bu uygulamaların verimlilik üzerindeki etkilerine dayanılarak sargı arızası sonucu motorların değiştirilmesinin daha doğru bir yaklaşım olduğu söylenebilir. Bobinaj işleminin verimliliğe etkileri de ayrı bir çalışma konusu yapılabilir.

- Asenkron motor sürücülerinin motor parametreleri üzerindeki etkileri daha ayrıntılı olarak incelenebilir. Sürücü kullanımında ortaya çıkan ilave harmoniklerin ayrıntılı analizi yapılarak motorlarda oluşturdukları akustik etkiler, titreşim farklılıkları ile diğer mekanik ve elektriksel etkiler ayrı bir çalışma konusu yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Waide, P., Brunner, C.U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. International Energy Agency. Paris, 2011, 130s.
- [2] Esen, G.K. TSE Elektrik Motoru Deneý Laboratuvarı Projesi Milli Katkısı ve Hedefleri. Anahtar Dergisi. 2017, 29(337) 13-16.
- [3] İmalat Sanayinde Kullanılan Elektrik Motorları Envanter Çalışması ve Motor Dönüşüm Programı. <http://www.yegm.gov.tr/verimlilik/sunum2017/7.Enerji%20Verimlili%C4%9Finde%20Ulusal%20Teknoloji%20Geli%C5%9Ftirme%20%C3%87abalar%C4%B1/Motor%20Envanteri%20ve%20D%C3%B6nüşüm%20Program%C4%B1.pdf>. ET: 15.05.2020.
- [4] Lukaszcyk, M. Improving efficiency in electric motors. World Pumps. 2014, 2014(4), 34-41.
- [5] Verucchi, C., Ruschetti, C., Giraldo, E., Bossio, G., Bossio, J. Efficiency optimization in small induction motors using magnetic slot wedges. Electric Power Systems Research. 2017, 152, 1-8.
- [6] Mach, M. Hajek, V. Practical Testing Of Methods For Improvement Of Efficiency Of A Small Induction Motor. IEEE 15th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC, 2015, USA, (901–906).
- [7] de Carvalho, D. P., Silva, F. B., Vanço, W. E., da Silva Gonçalves, F. A., Bissochi Jr, C. A., Monteiro, R. V. A., Guimaraes, G.C., de Andrade, D. A. A method for real-time wireless monitoring of the efficiency and conditions of three-phase induction motor operation. Electric Power Systems Research, 2018, 157, 70-82.
- [8] Çunkaş, M., Sağ, T. Efficiency determination of induction motors using multi-objective evolutionary algorithms. Advances in Engineering Software, 2010, 41(2), 255-261.
- [9] Zhang, H., Zanchetta, P., Gerada, C., Bradley, K., Liu, J. Performance evaluation of induction motor efficiency and in-service losses measurement using standard test methods. International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 14 May, 2011, Canada (913-917).
- [10] Agamloh, E.B. Induction Motor Efficiency. IEEE Industry Applications Magazine. 2011, 17(6), 20-28.
- [11] Jirasuwankul, N., Manop, C. Air-gap power and rotor loss estimation for induction motor efficiency monitoring based on Kalman filtering. 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 27-30 August, 2013, Valencia-Spain (85-90).

- [12] Santos, V. S., Felipe, P. R. V., Sarduy, J. R. G., Lemozy, N. A., Jurado, A., Quispe, E. C. Procedure for determining induction motor efficiency working under distorted grid voltages. *IEEE Transactions on energy conversion*. 2014, 30(1), 331-339.
- [13] Salomon, C. P., Sant'Ana, W. C., da Silva, L. E. B., Lambert-Torres, G., Bonaldi, E. L., de Oliveira, L. E., da Silva, J. G. B. Induction motor efficiency evaluation using a new concept of stator resistance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2015, 64(11), 2908-2917.
- [14] Esen, G. K., Özdemir, E. A new field test method for determining energy efficiency of induction motor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017, 66(12), 3170-3179.
- [15] Saini, R. K., Saini, D. K., Gupta, R., Verma, P. A software approach for the prediction of efficiency of three phase induction motor at optimize iron losses. 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), 17-19 November, 2016, Patiala-India (1-7).
- [16] Agamloh, E., Cavagnino, A., Vaschetto, S. Induction machine efficiency measurement using a variable frequency drive source. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1-5 October, 2017, Cincinnati, USA (768-775).
- [17] Trinchuk, D. Analysis of the efficiency of energy transformation in induction motor electric drives with independent power supply. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 17 October, 2017, Lviv-Ukraine (24-27).
- [18] De Almeida, A. T., Ferreira, F., Electrotecnica, E. Efficiency testing of electric induction motors. *ISR, Dep. Eng. Electronica University of Coimbra*, 1997.
- [19] Karkkainen, H., Aarniovuori, L., Niemela, M., Pyrhonen, J. Converter-fed induction motor efficiency: Practical applicability of IEC methods. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2017, 11(2), 45-57.
- [20] Bazurto, A. J., Quispe, E. C., Mendoza, R. C. Causes and failures classification of industrial electric motor. 2016 IEEE ANDESCON, 19-21 October, 2016, Arequipa (1-4).
- [21] Prainetr, S., Wangnippanto, S., Tunyasirut, S. Detection mechanical fault of induction motor using harmonic current and sound acoustic. 2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON), 8-10 March, 2017, Pattaya-Thailand (1-4).
- [22] Glowacz, A. Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor. *Applied Acoustics*, 2018, 137, 82-89.

- [23] Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., Pastorelli, M. International standards for the induction motor efficiency evaluation: a critical analysis of the stray-load loss determination. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 12-16 October, 2003, Salt Lake City-USA (841-848).
- [24] Tinazzi, F., Zigliotto, M., Boglietti, A., Cavagnino, A., Cossale, M. Energy efficiency assessment for inverter-fed induction motors. 2016.
- [25] Deda, S., De Kock, J. A. Induction motor efficiency test methods: A comparison of standards. 2017 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 15-16 August, 2018, Rosebank-South Africa (1-6).
- [26] Safin, N., Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V. Calculation of the efficiency and power consumption of induction IE2 and synchronous reluctance IE5 electric drives in the pump application based on the passport specification according to the IEC 60034-30-2. 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), 31 January-02 February, 2018, Moscow-Russia (1-5).
- [27] Al-Sharif, L., An Overview of AC Induction Motor Testing In Accordance With BS 4999 Part 143, 1996.
- [28] Singh, G., Kumar, T. C. A., Naikan, V. N. A. Efficiency monitoring as a strategy for cost effective maintenance of induction motors for minimizing carbon emission and energy consumption. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 184, 193-201.
- [29] Soleimani, M., Alizadeh, M. N., Moallem, M. Economical replacement decision for induction motors in industry. 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 08-09 February, 2018, Texas-USA (1-6).
- [30] Işık, Fuat. Gerilim dengesizliklerinin asenkron motor performansına etkilerinin incelenmesi. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 2011, 64. (Yüksek Lisans Tezi)
- [31] Kartal, Mehmet Yasin. 3 faz asenkron motor verimlilik ve yenileme kararlılık analizi. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Muğla, 2018, 92. (Yüksek Lisans Tezi)
- [32] Büyük, Serdar. Elektrik motorlarında enerji verimliliği mevzuatının Türkiye pazarına etkisinin analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul, 2018, 89. (Yüksek Lisans Tezi)
- [33] Gök, Orhan. Yüksek verimli ve standart verimli sincap kafesli asenkron motorların performans analizi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 2015, 73. (Yüksek Lisans Tezi)

- [34] Sarioğlu, M.K., Boğosyan, S., Gökaşan, M. Asenkron Makinalar ve Kontrolü. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 2003, 392.
- [35] Sarioğlu, M.K., Elektrik Makinalarının Temelleri Asenkron Makinalar. Çağlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 1983, 342.
- [36] Fitzgerald, A. E., Kingsley Jr.C., Umans, S.D. Elektrik Makineleri, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2014, 688.
- [37] Onat, Nevzat. Mini hidroelektrik santraller için güneş pilleri ile uyarılan senkron generatör tasarımı. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul, 2005, 177. (Doktora Tezi).
- [38] Chapman, S.J. Elektrik Makinalarının Temelleri. Avcı Ofset/Çağlayan Kitabevi ve Eğitim Çözümleri Ticaret A.Ş, İstanbul, Türkiye, 2017, 746.
- [39] Çolak, İ. Asenkron Motorlar. Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, Türkiye, 2001, 204.
- [40] Kuyucuoğlu, F., Onat, N., Taşkın, S. Experimental investigation of factors affecting efficiency in IE2 and IE3 class squirrel cage induction motors. 8th International Advanced Technologies Symposium, 19-22 October, 2017, Elazığ-Türkiye (2345-2352).
- [41] Ferreira, F. J., Silva, A. M., Aguiar, V. P., Pontes, R. S., Quispe, E. C., de Almeida, A. T. Overview of retrofitting options in induction motors to improve their efficiency and reliability. In 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) 12-15 June, 2018, Palermo-Italy (1-12).
- [42] IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors. [https://library.e.abb.com/public/0451229996ff4b0786505fd9a4075645/9AKK107319%20EN%2005-2018\\_20848\\_ABB\\_Technical\\_note\\_IEC\\_60034\\_30\\_1.pdf](https://library.e.abb.com/public/0451229996ff4b0786505fd9a4075645/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf) ET: 16.05.2020.
- [43] IEC 60034-30-1:Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE-code)
- [44] Kentli, F., Terzi, U. K. The effect of heat on the metallurgical structure and BH characteristic of (stator) armature with iron-silicon alloy in electric machines. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2010, 18(2), 299-312.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Osman GÜÇTEKİN  
Doğum Yeri ve Yılı : Manisa, 1976  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : osman.guctekin@cbu.edu.tr

### Eğitim Durumu

Lise : Manisa Teknik Lisesi, 1994  
Lisans : Marmara Üniversitesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, 1999  
Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020

### Mesleki Deneyim

MEB Saruhanlı Almış-Şentürk METEM	1999-2017
MCBÜ Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu	2017- ...