KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ TESPİTİ İÇİN SAHA DENEYİNE DAYANAN YENİ BİR YAKLAŞIM

GÜVENİR KAAN ESEN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ TESPİTİ İÇİN SAHA DENEYİNE DAYANAN YENİ BİR YAKLAŞIM

GÜVENİR KAAN ESEN

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR
Danışman, **Kocaeli Üniversitesi** .....

Prof. Dr. İlhami ÇOLAK
Jüri Üyesi, **Nişantaşı Üniversitesi** .....

Prof. Dr. Erkan MEŞE
Jüri Üyesi, **Ege Üniversitesi** .....

Dr. Öğr. Üyesi Kadir YILMAZ
Jüri Üyesi, **Kocaeli Üniversitesi** .....

Dr. Öğr. Üyesi Murat AYAZ
Jüri Üyesi, **Kocaeli Üniversitesi** .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.12.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle eğitim-öğretim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm öğretmenlerime ve özellikle tez çalışmam sırasında, değerli zamanını ayırarak çalışmamı yönlendiren değerli hocam sayın Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR'e ve tez izleme komitesinde yer alarak değerli fikirlerini paylaşan sayın Dr. Öğr. Üyesi Kadir YILMAZ ve Dr. Öğr. Üyesi Murat AYAZ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında iyi dilek ve temennilerini manevi desteklerini her zaman hissettiren sevgili babam, annem ve kardeşlerime, bu süre boyunca sabır ve hoşgörü ile yardımcı olan sevgili eşime ve son olarak gayretimin en büyük motivasyon kaynağı kızlarıma güler yüzleri için teşekkürlerimi sunarım.

Aralık – 2018 Güvenir Kaan ESEN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. ELEKTRİK MOTORLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ 3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN AMACI 11
3. ASENKRON MOTORLAR 17
3.1. Asenkron Motorlar 18
3.2. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Konstrüksiyonu 18
3.3. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Bir Faz Eşdeğer Devresi 22
4. ASENKRON MOTOR VERİMLİLİK ÖLÇME YÖNTEMLERİ 25
4.1. TS EN 60034-2-1:2014 Döner Elektrik Makineleri - Bölüm 2-1 25
4.2. CSA C390-10 (R2015) Üç Fazlı Asenkron Motorlar İçin Deney Yöntemleri 26
4.3. IEE112 3 Fazlı Asenkron Motorlar ve Generatörler için IEEE Standart Deney Prosedürü 28
4.4. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Tespit Edilmesi 28
5. TEZ ÇALIŞMASINDA ÖNERİLEN SAHA DENEY YÖNTEMİ 32
5.1. Saha Deney Yöntemi Adımları 32
5.2. Tezde Önerilen Saha Deney Yöntemine Ait Denklemlerin Tespit Edilmesi 36
5.2.1. Verim hesaplama denkleminde bulunan katsayıların belirlenmesi 39
5.2.2. Tezde önerilen saha deney yöntemi sonuçlarının motor güç ve yapısına göre hata dağılımı 43
5.3. Mobil Deney Cihazı Tasarımı 44
5.4. Tez Çalışmasında Önerilen Saha Deney Yöntemi Üzerine Deneysel Doğrulama Çalışmaları 46
5.4.1. Doğrulama deneylerinin yapıldığı elektrik motoru deney laboratuvarı 46
5.4.2. Önerilen saha deney yöntemine göre elde edilen deneysel sonuçlar 47
5.4.3. Üretici laboratuvarlarda yapılan deneysel ölçümler ve sonuçları 51
5.4.4. Önerilen saha deney yöntemi “durum-2” doğrulaması 52
5.4.5. Mobil deney cihazı ile elde edilen sonuçlar 53
5.4.6. Doğrulama sonuçlarının değerlendirilmesi 54
5.5. Ölçüm Belirsizliği Gerekliliği, Temel Bileşenleri ve Hesabı 55
5.5.1. Varyans ve standart sapma 56
5.5.2. Belirsizlik bütçesi 56
5.5.3. Genişletilmiş belirsizlik 57

5.5.4. A Tipi değerlendirme metodu 57
5.5.5. B Tipi değerlendirme metodu 57
5.5.6. Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin ölçüm belirsizliğinin hesaplaması 58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 62
KAYNAKLAR 65
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 71
ÖZGEÇMİŞ 72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektrik motorlarında doğrudan etkili yasal düzenlemeler 4
Şekil 1.2. Türkiye'de elektrik motorlarının sektörlere göre enerji tüketimi 5
Şekil 1.3. Türkiye'de işletmedeki elektrik motorlarının verim sınıflarına göre adet bazında oransal dağılım grafiği 6
Şekil 1.4. Elektrik motorları küresel pazar ve enerji tüketim payı oranları grafiği 7
Şekil 1.5. IE1 ile IE4 Sınıfları arası (%) verim değeri farkı grafiği 8
Şekil 3.1. Elektrik motoru çalışma prensibi şematik gösterimi 17
Şekil 3.2. Elektrik motorlarının türlerine göre şematik gösterimi 18
Şekil 3.3. Asenkron motorun başlıca yapısal parçalarının gösterimi 19
Şekil 3.4. Stator ve rotor laminasyonu örneği 20
Şekil 3.5. Rotor ve stator sac paketleri fotoğrafı 20
Şekil 3.6. Rotor iletkenleri kafes yapısı gösterimi 21
Şekil 3.7. Stator sargıları şematik gösterimi 22
Şekil 3.8. Motor çalışma şematik gösterimi 22
Şekil 3.9. Asenkron motor bir fazlı eşdeğer devre şematik gösterimi 23
Şekil 3.10. Asenkron motorun (rotor devresi) statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi şematik gösterimi 24
Şekil 4.1. Sincap kafesli asenkron motorun boşta çalışma bir faz eşdeğer devresi 29
Şekil 4.2. Sincap kafesli asenkron motorun kısa devre çalışma durumu bir faz eşdeğer devresi 30
Şekil 4.3. Sincap kafesli asenkron motorun eşdeğer devresi 31
Şekil 5.1. Tezde önerilen saha deney yöntemine ait akış şeması 33
Şekil 5.2. TS EN 60034-1:2012 standardı gereklerine uygun motor etiketi görseli 34
Şekil 5.3. Veri havuzunun motor gücüne (kW) göre dağılımı grafiği 40
Şekil 5.4. Veri havuzunda bulunan motorların frekans ve kutup sayısı dağılımları 40
Şekil 5.5. Veri havuzunda bulunan motorların nominal gerilim ve enerji sınıfı dağılımları 40
Şekil 5.6. Tezde önerilen saha deney yöntemi ile standard deney yöntemi arasındaki tüm yüklenme oranlarına ait hata dağılımı histogram grafiği 41
Şekil 5.7. Tezde önerilen saha deney yöntemi ile standard deney yöntemi arasındaki tüm yüklenme oranlarına ait hata dağılımı grafiği 42
Şekil 5.8. Sadece etiket bilgileri ve boşta deney ile elde edilen sonuçların hata dağılımı grafiği 43
Şekil 5.9. Motor gücü - Ortalama hata grafiği 43
Şekil 5.10. Motor "Frame" - Ortalama hata grafiği 44
Şekil 5.11. Mobil deney cihazı fotoğrafları 45
Şekil 5.12. Mobil deney cihazı kumanda paneli 45
Şekil 5.13. TSE elektrik motoru deney laboratuvarı fotoğrafı 47

Şekil 5.14. Rejeneratif dinamofren sistemi temel çalışma prensibi şematik gösterimi 47
Şekil 5.15. Yüklemme oranına karşın verim fonksiyonu grafiği 50
Şekil 5.16. Normal dağılım fonksiyonu grafiği (k=2 %95 güvenilirlik) 59
Şekil 5.17. Üçgen dağılım fonksiyonu grafiği 60
Şekil 5.18. Olasılık dağılım fonksiyonu grafiği 60

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Başlıca ülkelerin zorunlu verimlilik sınıfı uygulama tarihleri tablosu 5
Tablo 1.2 Türkiye 2006 yılı elektrik motorlarının sektörel enerji tüketimi dağılımı tablosu 6
Tablo 1.3. Elektrik motorlarının türlerine göre dağılımı..... 8
Tablo 1.4. IE4 ile IE1 arasındaki ortalama verim değeri farkı (%) tablosu 9
Tablo 4.1. TS EN 60034-2-1:2014 Standardı deney akış tablosu..... 26
Tablo 4.2. C390-10 (R2015) Standardı deney akış tablosu 27
Tablo 4.3. IEEE112-B Standardı deney akış tablosu..... 28
Tablo 4.4. Eşdeğer devre parametreleri tespiti deneyleri akış tablosu..... 29
Tablo 4.5. Asenkton motor kaçak rekatansını stator ve rotor arasındaki dağılımı..... 30
Tablo 5.1. Tezde önerilen saha deney yöntemi ile standard deney yöntemleri arasında karşılaştırma tablosu 32
Tablo 5.2. Deneysel çalışma numune etiket verileri tablosu 46
Tablo 5.3. İşletme şartlarında yükte çalışma deney verileri tablosu 48
Tablo 5.4. Önerilen saha deney yöntemşne göre gerçekleştirilen deneye ait hesaplama tablosu..... 49
Tablo 5.5. Tezde önerilen saha deney yöntemine göre 3 farklı durumun karşılaştırma tablosu..... 51
Tablo 5.6. Önerilen saha deney yöntemi ile standard yöntemler arası karşılaştırma tablosu..... 51
Tablo 5.7. Üretici laboratuvarları deney sonuçları tablosu 52
Tablo 5.8. Boşta deney ve etiket değerli ile elde edilen verim değerleri tablosu 53
Tablo 5.9. Deney numunesi etiket bilgileri tablosu 53
Tablo 5.10. Mobil deney cihazı ile elde edilen sonuç tablosu 54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$P_1^{Yükte}$: Yükte ölçülen giriş gücü, (W)
$P_2^{Yükte}$: Yükte hesaplanan çıkış gücü, (W)
P_1^{Etiket} : Etiket değeri giriş gücü, (W)
P_2^{Etiket} : Etiket değeri çıkış gücü, (W)
$P_s^{Yükte}$: Yükte hesaplanan stator kayıpları, (W)
P_s^{Etiket} : Etiket değeri stator kayıpları, (W)
P_0 : Boşta hesaplanan giriş gücü, (W)
P_{s_0} : Boşta hesaplanan stator kayıpları, (W)
P_c : Sabit kayıplar, (W)
$P_r^{Yükte}$: Yükte hesaplanan rotor kayıpları, (W)
P_r^{Etiket} : Etiket değeri rotor kayıpları, (W)
P_{ek}^{Etiket} : Etiket değeri ek kayıplar, (W)
$P_{ek}^{Yükte}$: Yükte hesaplanan ek kayıplar, (W)
$\eta^{Yükte}$: Yükte hesaplanan verim değeri
η : Hesaplanan nominal verim değeri
$V^{Yükte}$: Yükte ölçülen faz – faz arası gerilim, (V)
V^{Etiket} : Etiket değeri faz – faz arası gerilim, (V)
V_0 : Boşta ölçülen faz – faz arası gerilim, (V)
$f^{Yükte}$: Yükte ölçülen frekans değeri, (Hz)
f^{Etiket} : Etiket frekans değeri, (Hz)
$I^{Yükte}$: Yükte ölçülen faz-faz arası akım, (A)
I^{Etiket} : Etiket değeri nominal faz-faz arası akım, (A)
I_0 : Boşta ölçülen faz-faz arası akım, (A)
$\cos\varphi^{Etiket}$: Etiket değeri güç faktörü
$\cos\varphi^{Yükte}$: Yükte ölçülen güç faktörü
$\cos\varphi_0$: Boşta ölçülen güç faktörü
YO : Yüklenme oranı
s : Etiket değeri hesaplanan kayma
$R_{soğuk}$: Deney öncesi ölçülen sargı direnci, (ohm)
$R_{sıcak}$: Yükte deney sonrası ölçülen sargı direnci, (ohm)
R_0 : Boşta deney sonrası ölçülen sargı direnci, (ohm)
P_{stv} : Sürtünme ventilasyon kayıpları, (W)
P_{fe} : Demir kayıpları, (W)
$n_{senkron}$: Senkron devir sayısı, (rpm)
n_{etiket} : Etiket değeri devir sayısı, (rpm)
K_t : Sıcaklık düzeltme katsayısı
θ_W : Yük deneyi sonrası sargı sıcaklığı, (°C)
θ_C : Yük deneyi sonrası ortam sıcaklığı, (°C)
θ_1 : Deney öncesi ortam sıcaklığı, (°C)
k : İletken malzemenin 0°C sıcaklıktaki direnç değişim katsayısı

k1 : "Önerilen saha deney yöntemine" ait stator kayıpları katsayısı
k2 : "Önerilen saha deney yöntemine" ait rotor kayıpları katsayısı
k3 : "Önerilen saha deney yöntemine" ait ek kayıplar katsayısı
X_s : Stator kaçak reaktans, (ohm)
R_s : Stator devre direnci, (ohm)
$R_r^{'}$: Rotor devre direnci, (ohm)
$X_r^{'}$: Rotor kaçak reaktans, (ohm)
X_m : Mıknatıslanma reaktansı, (ohm)
R_c : Eşdeğer devre demir kayıpları direnci, (ohm)
E_s : Eşdeğer devre stator endüklenen gerilim, (V)
V_s : Eşdeğer devre stator uygulanan gerilim (V)
I_s : Stator çekilen akım, (A)
$I_r^{'}$: Rotor çekilen akım, (A)
σ^2 : Varyans
S : Standard sapma
x_i : Belirsizlik bileşeni
$u(x_i)$: "i" bileşenine ait ölçüm belirsizliği
$\bar{x}_i$: Aritmetik ortalama
p(x) : Olasılık dağılım fonksiyonun
T : Tork, (Nm)

Kısaltmalar

AA : Alternatif Akım
AB : Avrupa Birliği
AGT : Air Gap Torque (Hava Aralığı Torku)
CEMEP : European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (Avrupa Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği İmalatçıları Komitesi)
CENELEC : European Committee for Electrotechnical Standardization (Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi)
CSA : Canadian Standards Asosiations (Kanada Standartları Birliği)
DA : Doğru Akım
DSP : Digital Signal Processor (Digital Sinyal İşlemcisi)
EFF : Efficiency (Verim)
EC : European Council (Avrupa Komisyonu)
EN : European Norm (Avrupa Normu)
IE : International Energy Efficiency Class (Uluslararası Enerji Verimliliği Sınıfı)
IEC : International Electrical Comittee (Uluslararası Elektrik Komitesi)
IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Edilmiş Kapalı İki Kutuplu Tranzistör)
ISO : International Standard Organization (Uluslararası Standard Organizasyonu)
KOBİ : Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler

NEMA	: National Electrical Manufacturers Association (Amerika Ulusal Elektrik İmalatçıları Birliği)
UL	: Underwriters Laboratories (Underwriters Laboratuvarları)
PGD	: Piyasa Gözetim ve Denetimi
PSO	: Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
SASO	: Saudi Standards Organization (Suudi Standardları Organizasyonu)
SGM	: Sanayi Genel Müdürlüğü
STB	: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TS	: Türk Standardı
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TÜRKAK	: Türk Akreditasyon Kurumu
YO	: Yüklenme Oranı

SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ TESPİTİ İÇİN SAHA DENEYİNE DAYANAN YENİ BİR YAKLAŞIM

ÖZET

Elektrik motorları ve bağlı sistemler küresel elektrik enerjisi arzının yaklaşık olarak yarısını tüketmekte ve atmosfere 6.040 milyon ton karbondioksit emisyonu bırakmaktadır. Avrupa Birliği ve Türkiye'de, elektrik motorları ve bağlı sistemlerinin sanayide tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %70'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle potansiyel açıdan tüketimde payın yüksek olduğu böylesine önemli bir enerji tüketim kaynağında verimlilik kapsamında çalışmalar yapılagelmiştir. Üretimde eko-tasarım gereksinimleri, asgari enerji verimlilik sınıfları, gümrük ve piyasa kontrolü vb. uygulamalar bunlardan sadece bir kaçı olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik motoru küresel pazarının büyüklüğü ve enerji tüketimindeki payı ulusal veya Avrupa Birliği gibi uluslararası düzeyde mevzuatta yer alan zorunlu uygulamaları ve bu uygulamalara bağlı olarak enerji verimliliği ölçümü ve denetimlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Denetimin olduğu her noktada ölçüm, muayene ve deneyler kaçınılmaz hususlardır. Bu bağlamda gerçekleştirilecek uygunluk değerlendirme deneyleri güvenilir, doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar vermelidir.

Bu çalışmanın amacı, uygulanması zaman alan ve ekonomik olmayan laboratuvar deneyleri yerine, endüstriyel çalışma şartlarında sincap kafesli asenkron motorların nominal ve yük altındaki verim değerini, bilinen standard deney yöntemler esas alınarak, moment sensörleri gerektirmeksizin ölçümler aracılığı ile hesaplamak adına deney yöntemi geliştirmektir. Bu sayede verimsiz asenkron motorları yenileme veya tespit etme projelerinde doğru karar verilmesine katkı sağlayacak bir metot belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışma sonucunda, sincap kafesli asenkron motorlarda verim tespiti açısından endüstriyel işletme şartlarında kolaylıkla uygulanabilir, tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik açısından çeşitli deneyler ile doğrulanmış, ölçüm belirsizliği bilinen ekonomik bir deney yöntemi ve hesaplama adımları ortaya konmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motorlar, Asenkron Motorlarda Enerji Verimliliği, Elektrik Motorları, Saha Deney Yöntemi.

A NEW APPROACH FOR DETERMINING ENERGY EFFICIENCY OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS BASED ON FIELD TEST METHOD

ABSTRACT

Electric motors and the drive systems approximately consume half of the global electricity consumption and release 6.040 Mt of CO2 emissions to the atmosphere. In the European Union and Turkey, electric motors and drive systems estimated to account for about 70% of all industrial electricity consumption. For this reason, studies have been carried out within the scope of efficiency in such an important source of energy consumption where the share of potential consumption is high. Eco-design requirements, minimum energy efficiency classes, customs and market control, etc. applications emerged as only a few of these studies. The size of the electric motor global market and its share in the energy consumption demonstrates the necessity of mandatory applications in the legislation at the national or international level such as European Union and energy efficiency measurement and audits depending on these applications. Measurement, inspection and testing are inevitable at every point where they are audited. Conformity assessment trials to be carried out in this context should give reliable, accurate and reproducible results.

The aim of this study is to improve a method and calculation algorithm based on known standard methods for determining nominal and load efficiency values of squirrel-cage induction motors in industrial conditions without torque sensors instead of time-consuming and non-economic laboratory tests. Therefore, that will contribute to making the right decision in the renewal or detection projects of inefficient induction motors.

In conclusion, this study presents an economical validated test method and calculation steps, which can be easily applied in industrial operating conditions, in terms of reproducibility and reproducibility with the known measurement uncertainty for squirrel cage induction motors.

Keywords: Induction Motors, Energy Efficiency in Induction Motors, Electric Motors, Field Test Method.

GİRİŞ

Enerjide arz güvenliğinin sanayide, sanayide sürdürülebilirliğinin ve büyümenin ise kalkınmada oldukça önem taşıdığı günümüzde, saklı enerji kaynağı sayılabilecek olan verimlilik hususu oldukça önem arz etmektedir.

2040 yılına kadar, nüfusun %25, ekonominin 2,5 kat daha büyük olduğu senaryoya göre dünya birincil enerji kaynak talebinin günümüzden yaklaşık %30 daha fazla olarak 18.000 milyon ton eşdeğer petrol olması beklenmektedir [1]. 2030 yılı için Avrupa Birliği iklim ve enerji çerçeve hedefi; sera gazı salımında %40 azalma (1990'ların seviyesi), enerjide yenilenebilir enerjinin payını en az %27 seviyesine yükseltme ve enerji verimliliği faaliyetlerinde %27 gelişim sağlama olarak ifade edilmiştir [2]. Bu kapsamda elektrik motorlarında yapılacak verimlilik faaliyetlerinin önemini ifade etmek için bazı temel veriler yeterli olacaktır.

Elektrik motorları kapsamında hazırlanan Uluslararası Enerji Ajansı'nın 29 ülke üzerinde gerçekleştirdiği çalışması sonucu oluşan ve 2011 yılında yayımlanan rapora göre, elektrik motorları arz edilen tüm elektrik enerjisinin yaklaşık %46'sını, sanayi sektöründe ise %69'unu tüketmektedir. Bu aynı zamanda atmosfere 6.040 milyon ton karbondioksit emisyonu bırakıldığı anlamına gelir [3]. Oldukça çarpıcı olan bu sonucu destekleyecek bir başka çalışma ise, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü tarafından yapılmıştır. 2015 yılında başlatılan ve 2016 yılında sonuçlanan "Elektrik Motorları Envanteri Analiz Raporu" oldukça önemli ve literatürdeki bilinen en kapsamlı çalışmalardan biridir. Dünyada 2,23 milyar motorun işletmede olduğu tahmin edilmektedir [3, 4]. Ancak ülkemizdeki durumu net bir şekilde oraya koyan bir değerlendirme bu rapora kadar yapılamamıştır [5]. Ayrıca 2016 yılı TÜİK verilerine göre Türkiye'de tüketilen elektrik enerjisinin %46,9'si sanayi sektöründe tüketilmiş bulunmaktadır [6, 7]. Sanayide tüketilen elektrik enerjisinin ise yaklaşık %70'i elektrik motorlarında tüketilmektedir. Bu veriler enerji verimliliğinde hedeflenmesi gereken noktaların başında sanayi sektörünün ve özellikle de sanayide elektrik motorlarının olduğunu göstermektedir.

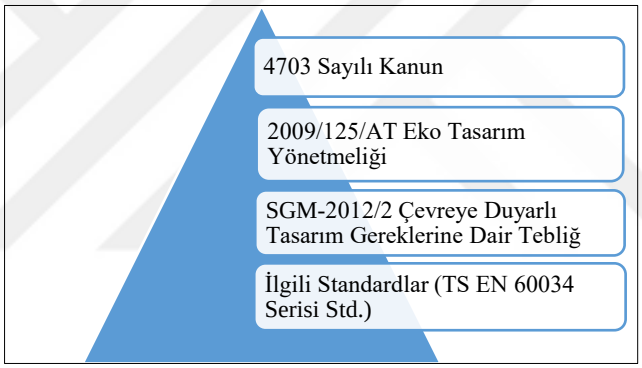
Ülkemizde sanayinin ekonomik büyümeye ve son yıllardaki Ar-Ge desteklerine endeksli olarak gelişmesi, otomasyon sistemleri ile daha teknoloji yoğun olma yolunda ilerlemesi, her yıl Türkiye piyasasına 1 milyon adedin üzerinde elektrik motoru arz edilmesine neden olmaktadır. Türkiye'de sadece düşük verimli elektrik motorlarının yüksek verimli olanlar ile değiştirilmesi yoluyla yaklaşık yılda 2.500 GWh'lik enerji tasarrufu sağlanabileceği ifade edilmektedir [8]. Bu tasarruf, Birecik Barajının yıllık ürettiği enerji ya da bir başka deyişle Keban Barajının yıllık ürettiği enerjinin yarısı kadar bir enerji ile özdeştir. Ek olarak Türkiye'de Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından Avrupa Birliği mevzuatı ile uyumlu hale getirilen yerel mevzuat, söz konusu elektrik motorları için enerji verimlilik endeksi beyanını ve bulunması gereken en düşük seviyeyi zorunlu kılmaktadır.

1. ELEKTRİK MOTORLARINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Elektrik motorlarında enerji verimliliği üzerine kurulan ilk birlik, tüketiciyi korumak ve haksız rekabeti önlemek için 1998 yılında CEMEP (Avrupa Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği İmalatçıları Komitesi) tarafından kabul edilen ve tamamen ihtiyari olan elektrik motorlarını, EFF3, EFF2 ve EFF1 olmak üzere verimlilik değerlerine göre sınıflandıran uygulamadır. 1,1 kW ila 90 kW arasındaki asenkron motorları kapsayan bu uygulamada EFF3 en düşük verimlilik sınıfı, EFF1 en yüksek verimlilik sınıfı olarak belirlenmiştir [9].

Bu gönüllü uygulama sonrasında ortaya çıkan ihtiyaca binaen 2008 yılında IEC tarafından yayımlanan ve 2009 yılında CENELEC ile Avrupa Normu haline gelen ve 2010 yılında ise TSE tarafından kabul edilen TS EN 60034-30 standardı, verimlilik sınıflarına IE1, IE2, IE3, IE4 şeklinde yeni bir tanımlama getirmiştir. Bu yeni tanımlamaya göre IE1 => EEF2'nin, IE2 => EFF1'in yaklaşık karşılığı olup, IE1 Standard verimli, IE2 Yüksek verimli, IE3 Çok Yüksek Verimli Motorlar ve IE4 Süper Çok Yüksek Verimli Motorlar olarak tanımlanmıştır [10, 11]. İlk olarak 2/4/6 kutuplu anma gerilimi 1.000V aşmayan ve 0,75 ila 375 kW güç aralığında sincap kafesli asenkron motorları kapsayan TS EN 60034-30 standardı, 2014 yılında doğrudan şebekeden beslenen motorlar ve değişken hız sürücülü motorlar olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Şebeke tarafından doğrudan beslenen motorlar için verimlilik sınıflarını tayin eden TS EN 60034-30-1:2014 standardı yayımlanmıştır [12]. Değişken hız sürücülü motorları kapsayan IEC TS 60034-30-2 teknik dokümanı ise henüz standard olarak yayınlanmamıştır. TS EN 60034-30-1:2014 standardı bir önceki versiyonundan farklı olarak 0,12 kW ila 1.000 kW güç aralığını kapsamakta ve IE4 verimlilik sınıfına ait limitleri tanımlarken IE5 verimlilik sınıfının ileride yayımlanacağını bildirmektedir. Ayrıca 8 kutuplu motorlar da bu değişiklik ile yeni kapsama dâhil olmuş bulunmaktadır [13, 14]. Elektrik motorları hususunda ilk yasal düzenleme Avrupa Birliği'nin Elektrik Motorları ile İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklerine Dair EC/640/2009 sayılı tüzüğüdür.

Beraberinde, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi 4703 sayılı Ürünlere İlişkin Teknik Mevzuatın Hazırlanması ve Uygulanmasına Dair Kanunun 14'üncü maddesine dayanılarak hazırlanan "Enerji ile İlgili Ürünlerin Çevreye Duyarlı Tasarımına İlişkin Yönetmelik" 2010 yılında yürürlüğe girmiştir. Daha sonra 2012 yılında EC/640/2009 referans alınarak hazırlanan ve uyumlaştırılan SGM-2012/2 "Elektrik Motorları İle İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklerine Dair Tebliğ" yayımlanarak ulusal mevzuata kazandırılmıştır [15]. Yasal düzenlemeler ile elektrik motorlarına dair mevzuat, piyasa gözetim ve denetim faaliyetlerini de uygulanabilir kılmıştır. Türkiye'de ise SGM-2012/2 sayılı tebliğ ile 2, 4, 6 kutuplu, anma gerilimi en fazla 1.000 V olan, anma çıkış gücü 0,75 kW ile 375 kW arasında olan ve sürekli çalışacak şekilde tasarlanmış tek hızlı, 3 fazlı, 50 Hz veya 50/60 Hz sincap kafesli asenkron motorlar denetim ve kontrol kapsamına alınmış bulunmaktadır [16].



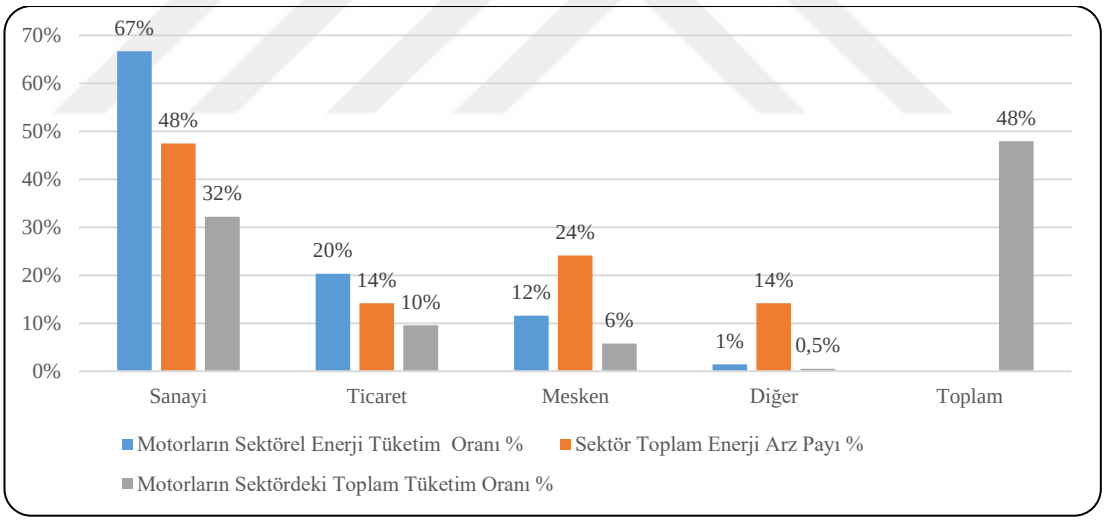
Şekil 1.1. Elektrik motorlarında doğrudan etkili yasal düzenlemeler

Tebliğde göze çarpan en önemli husus zorunlu uygulamaya dair düzenlemelerdir. Tebliğ 02.04.2012 tarihi itibariye IE1 verimlilik sınıfı motorların piyasaya arz edilmesini yasaklamakta ve diğer verimlilik sınıfları için süreç tanımlamaktadır. Bunun dışında 01.01.2015 tarihinden itibaren, anma çıkış gücü 7,5 kW ile 375 kW arasında olan motorların veriminin, IE3 verim seviyesinden düşük olmayacağını veya piyasaya arz edilen motorların IE2 verim seviyesini karşılayacak şekilde ve değişken hızlı tahrikle teçhiz edilmesi gerektiğini bildirmektedir. Sürecin devamında ise 01.01.2017 tarihinden itibaren, anma çıkış gücü 0,75 kW ile 375 kW arasında olan motorların verimi, IE3 verim seviyesinden düşük olmamasını veya piyasaya arz edilen motorların IE2 verim seviyesini karşılaması halinde değişken hızlı tahrikle teçhiz edilmesi zorunluluğunu getirmektedir [16].

Tablo 1.1. Başlıca ülkelerin zorunlu verimlilik sınıfı uygulama tarihleri tablosu

BÖLGE	IE1	IE2	IE3
Amerika Birleşik Devletleri	-	1998	2011
Avrupa Birliği	-	2011	2015
Çin Halk Cumhuriyeti	2006	2011	2015
Türkiye	-	2012	2015

Tablo 1.1.'de başlıca ülkelerin verimlilik sınıfı uygulama tarihleri verilmektedir [9]. Buna göre 1998 yılından 2011 yılına kadar Amerika Birleşik Devletleri'nde en az IE2 verimlilik sınıfında motorların, 2011 yılından itibaren ise en az IE3 sınıfı motorların piyasaya arz edilmesine müsaade edilmektedir. Avrupa Birliği ve Çin'de ise 2011-2015 yılları arası IE2 sınıf motorlar, 2015 sonrası ise en IE3 sınıf motorların kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Türkiye'de ise bir yıl gecikme ile IE2 sınıfı ve Avrupa Birliği ve Çin'e benzer olarak IE3 sınıfı zorunlu uygulamaya geçmiş bulunmaktadır [17].



Şekil 1.2. Türkiye'de elektrik motorlarının sektörlere göre enerji tüketimi

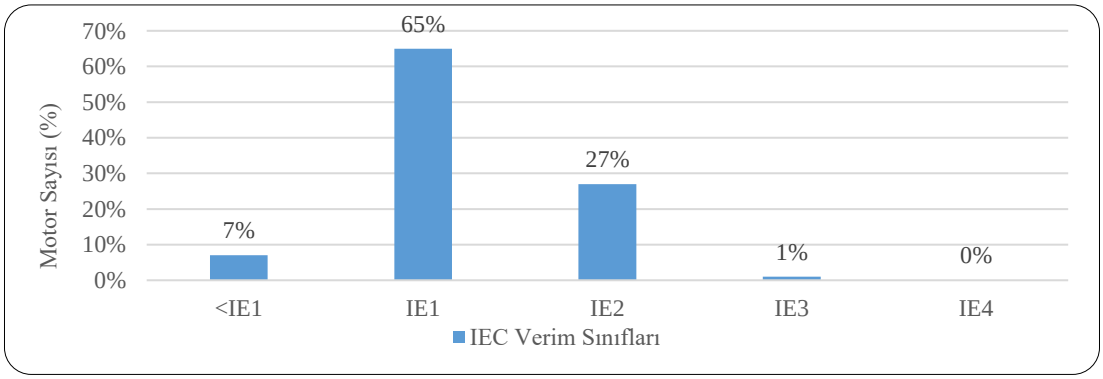
2016 yılı TÜİK verilerine göre Türkiye'de toplam 231.204 GWh elektrik enerjisi tüketilmiştir. 2016 yılında 108.435 GWh elektrik, sanayi sektöründe tüketilmiş bulunmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı tarafından 2011 yılında yayımlanan ve 29 ülke üzerinde yapılan çalışma neticesinde elektrik motorlarının, arz edilen tüm elektrik enerjisinin yaklaşık %46'sını, sanayi sektöründe ise %69'unu tüketmektedir.

Söz konusu araştırmada Türkiye'ye ait 2006 yılı verileri kullanılmış olup Şekil 1.2'de oransal Tablo 1.2'de ise sektörlere göre elektrik motorlarının enerji tüketimleri TWh cinsinden verilmiştir [3, 17].

Tablo 1.2 Türkiye 2006 yılı elektrik motorlarının sektörel enerji tüketimi dağılımı tablosu

Sektör	Elektrik Motorların Sektörel Tüketimi TWh/Yıl	Sektörün Toplam Enerji Tüketimi TWh/Yıl	Elektrik Motorların Sektörel Tüketime Oranı
Sanayi	46	68	%68
Ticaret	14	20	%70
Mesken	8	35	%23
Diğer	1	20	%5
Toplam	69	144	%48

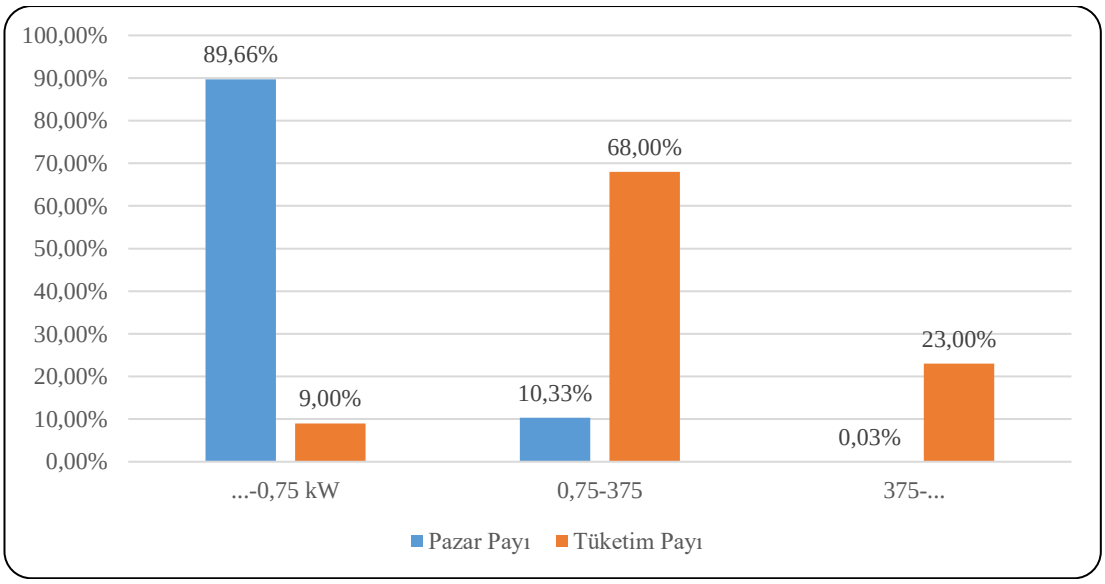
Şekil 1.2'de verilen, Türkiye'de elektrik motorlarının toplam arz ve sanayide kullanım oranı Uluslararası Enerji Ajansı çalışmasına esas 29 ülke ortalaması ile örtüştüğünü söyleyebiliriz. Bu kapsamda, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü tarafından 2015 yılında başlatılan ve 2016 yılında nihayete eren 62 ilde ve 23 sanayi sektöründe faaliyet gösteren toplam 887 firmaya ait 7,5 kW ve üzeri güç değerlerine sahip 93.139 adet AA, 1.755 adet DA motor verisi kullanılarak hazırlanan "Elektrik Motorları Envanteri Analiz Raporu" oldukça önemlidir [5]. Raporun en önemli çıktılarından birisi de hâlihazırda sanayide 4.306.622 adet 7,5 kW ve üzeri AA motor kullanıldığına ilişkin tahmindir. Yapılan değerlendirmeler sonucu sanayide kullanılan 7,5 kW ve üzeri AA motorların enerji verimliliği sınıflarına göre dağılımı verilmiştir.



Şekil 1.3. Türkiye'de işletmedeki elektrik motorlarının verim sınıflarına göre adet bazında oransal dağılım grafiği

Şekil 1.3'de görüldüğü üzere sanayide kullanılan 7,5 kW ve üzeri AA motorların %65'lik bir kısmının IE1, %27'lik bir kısmınınsa IE2 ve %7'lik kısmının IE1'den de aşağıda verim sınıfına sahip olduğu düşünüldüğünde, verimsiz motorların dönüşümünün enerji verimliliği açısından kaçınılmaz olduğu görülmektedir. Aynı çalışmada işletmede yer alan 7,5 kW ve üzeri AA motorların ortalama 45 kW gücünde ve ortalama 12 yaşında olduğu tahmin edilmektedir. Yine aynı raporda ortalama yıllık çalışma saatinin 5.456 saat olduğu da ifade edilmektedir. Bu bilgiler ışığında yapılan analizler sonucunda sanayide hâlen kullanılan ve verimsiz olarak kabul edilen toplam 3.783.694 adet 7,5 kW ve üzeri AA motorun bulunduğu söylenebilir. Söz konusu verimsiz motorların tamamının yenilendiği senaryoda yıllık; yaklaşık 34 milyar kWh elektrik tasarrufu sağlanacağı öngörülmektedir. Böylece 2016 yılı projeksiyonuna göre dönüşüm sağlanabilirse, her yıl yaklaşık 8,5 milyar TL tasarruf sağlanmış olacaktır. Motor dönüşüm senaryosu için gereken yaklaşık yatırım maliyeti ise 14,6 milyar TL değerindedir. Muhtemel yıllık tasarruf miktarı ve yatırım maliyeti hesaba katıldığında bu senaryoya ait programının yaklaşık 21 aylık bir sürede geri döneceği tahmin edilmektedir [5, 18].

Elektrik motorlarının enerji tüketiminde sektörel durum tespitinden sonra adet bazında pazar ile enerji tüketimi hususu da enerji verimliliği çalışmalarında hedeflenmesi gereken güç aralığı açısından oldukça önem taşımaktadır.



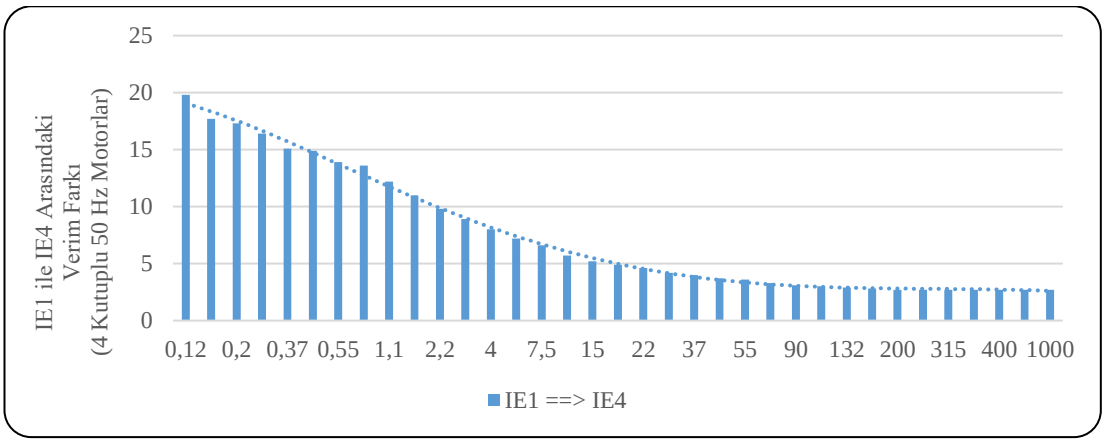
Şekil 1.4. Elektrik motorları küresel pazar ve enerji tüketim payı oranları grafiği

Dünyada işletmede olan elektrik motorlarının, 2,23 milyar adet olduğu tahmin edilmektedir. Bu motorların yaklaşık 2 milyar adedinin 0,75 kW ve altında güce sahip olduğu düşünülmektedir. Ancak Şekil 1.4'de görüldüğü gibi adet bazında yaklaşık %89 seviyesinde bu tarz küçük motorlar enerji tüketimi açısından %9 seviyesinde kalmaktadır. Adet bazında toplamın yaklaşık %11'i seviyesinde kalan 0,75-375 kW aralığı ise toplam enerji tüketiminde %68'lik orana sahiptir. 375 kW ve üzeri motorların adet bazında %1'den az olmasına rağmen enerji tüketiminin ise %23 seviyesinde kaldığı görülmektedir [4].

Tablo 1.3. Elektrik motorlarının türlerine göre dağılımı

Tipi	≤ 750 W	0,75 - 375 kW	> 375 kW
DA Motor ve Generatörler	%56	%21	%5
AA Tek Fazlı Motorlar	%29	%30	-
AA Üç Fazlı Motorlar	%5	%49	%95
Diğer	%10	-	-

Ayrıca Tablo 1.3'de gösterildiği gibi 0,75-375 kW güç aralığında bulunan motorların yaklaşık %80'i asenkron motorlardan oluşmaktadır [4]. Sonuç olarak eldeki veriler ışığında Türkiye'de elektrik enerjisinin %46,9'i sanayide, sanayide tüketilen elektrik enerjisinin ise %72'sinin elektrik motorlarında, motorlarda tüketilen elektrik enerjisinin %91'i 0,75-1.000 kW güç aralığındaki motorlarda tüketilmekte ve bu motorların %87'sinin asenkron motorlar olduğu söylenebilir. Bu değerler sanayide kullanılan asenkron motorların toplam enerji tüketiminin yaklaşık %27'ini kapsadığını göstermektedir [4, 19]



Şekil 1.5. IE1 ile IE4 Sınıfları arası (%) verim değeri farkı grafiği

Mevcut yasal düzenlemeler ışığında hedeflenen enerji verimlilik sınıfı IE4 ile TS EN 60034-30-1:2014 standardının belirlediği en düşük verimlilik sınıfı IE1 arasında Şekil 1.5'de verilen yüzde cinsinden 4 kutuplu 50 Hz bir motor referans alınarak oluşturulan verim farkı grafiği mevcuttur. Tablo 1.4'de ise, yapılan sınıflandırmaya esas ortalamalar verilmektedir. Buna göre: 90 kW ve üzeri güç seviyelerinde ortalama fark yaklaşık %3 seviyesindedir. 0,75 kW ve daha düşük güç seviyelerinde verim farkı ortalama %17 seviyelerinde olsa da bu değerin toplam tüketimin yaklaşık %9'unu, adet bazında yaklaşık %90'ını kapsadığı göz önüne alınırsa, bu güç aralığında bulunan motorların verimli olanlara dönüşüm senaryosunun oldukça fazla maliyet ve zaman gerektireceği ve tasarruf açısından faydası düşünülmelidir. 0,75 kW ile 7,5 kW arasında ortalama verim farkı yaklaşık %10, 7,5 kW ile 90 kW aralığında ise ortalama verim farkı %5 seviyesindedir [4, 13].

Tablo 1.4. IE4 ile IE1 arasındaki ortalama verim değeri farkı (%) tablosu

Güç Aralığı	Ortalama IE1 - IE4 verim Farkı
0,12-0,75 kW	% 17
0,75-7,5 kW	% 10
7,5-90 kW	% 5
90-1.000 kW	% 3

SGM-2012/2 tebliğinin de kapsamının 2015-2017 arası için 7,5-375 kW ve 2017 sonrası için 0,75-375 kW olduğu göz önüne alınırsa, adet bazında yaklaşık %11 olan 0,75-375 kW güç aralığındaki motorlar verimlilik çalışması açısından daha anlamlı görünmektedir.

Dönüşümün yanı sıra denetiminde önemi oldukça fazladır. Bu bağlamda Nisan 2012 tarihinden sonra Türkiye'de üretilerek veya ithal edilerek piyasaya arz edilen, 2, 4, 6 kutuplu, anma gerilimi en fazla 1000 V olan, anma çıkış gücü 0,75 kW ile 375 kW arasında olan ve sürekli çalışacak şekilde tasarlanmış tek hızlı, 3 fazlı, 50 Hz veya 50/60 Hz sincap kafesli asenkron motorlarının, SGM-2012/2 tebliğinin gereklerini karşılayıp karşılamadığını kontrol etmek amacıyla STB tarafından piyasa gözetimi ve denetimi faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Deney ve muayene işlemleri, numune alma aşamasından raporlama aşamasına kadar tüm süreçleri ile SGM-2012/2 sayılı tebliğde gözetim ve denetim, faaliyetlerinde uygulanacak doğrulama prosedürü adı

altında tanımlamaktadır. Enerji verimliliği ile ilgili diğer yasal düzenlemelerde olduğu gibi elektrik motorlarında da numune alma işleminde 1+3 usulü geçerlidir. Bu usule göre öncelikle bir numune alınması ve test edilmesi gereklidir. Test edilen numune için nominal motor veriminde (η), kayıplar (1-η); SGM 2012/2 sayılı Tebliğ Ek-1'de belirtilen değerlerden, 0,75 – 150 kW güç aralığında %15'den, 150 – 375 kW güç aralığında ise %10'dan daha farklı değil ise söz konusu numune, tebliğin hükümlerine uygun kabul edilir. Deney sonuçları uygun çıkmadığı takdirde yılda beş adetten az sayıda üretilen motorlar hariç, ilave üç ünite daha test edilir ve yine aynı kriterlere göre 3 numunenin nominal verimi (η) ortalaması değerlendirilir. Uygunsuzluğun devam etmesi halinde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 4703 sayılı kanunun ilgili maddeleri gereğince söz konusu ürünlerin piyasadan toplatılmasına ek müteselsilen ilgililere 4703 sayılı kanunun öngördüğü cezai müeyyideleri uygulamaktadır [16, 20].

Sonuç olarak bu veriler ışığında dünyada ve Türkiye'de elektrik motoru sektörünün enerji verimliliği yönünden oldukça önemli olduğu görülmektedir. Ayrıca elektrik motorlarında yapılabilecek verimlilik çalışmaları sadece verimli motorların verimsiz olanlarla değiştirilmesi değil; bunun dışında doğru motor seçimi, değişken hız sürücüsü ile tahrik etme, zamanında bakım yapılması gibi hususlarla desteklendiği takdirde tüm dünyada %10'a yakın bir tasarruf potansiyeli öngörülmektedir [19].

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN AMACI

Sincap kafesli asenkron motorların verim sınıfını tespit etme adına bilinen ve yaygın standard yöntemlerin dışında literatürde bazı çalışmalara rastlanmıştır. Deney laboratuvarlarının kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olması ve sincap kafesli asenkron motorların yaygın kullanımı bu alanda daha ekonomik çözüm arayışlarını beraberinde gerektirmektedir.

Elektrik motorları küresel piyasasının büyüklüğü ve verimlilik ölçümünün gerekliliği sebebiyle, zamanla literatüre çeşitli uygunluk ve ön uygunluk yöntemleri kazandırılmıştır. Enerji yönetim sistemi gereği ve/veya verimlilik projeleri için, enerji uzmanları ve yöneticileri, işletmedeki motorlarının verimlilik düzeyini öğrenmek istemektedir. Ancak, yüksek test maliyetleri ve üretimin süreklilik kısıtlaması nedeniyle işletmedeki tüm motorları test etmek mümkün görünmemektedir.

Bununla beraber uygunluk değerlendirme deneyleri ve hesaplamaları doğası gereği güvenilir, doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar üretmelidir. CSA-C390-10, IEEE-112B, IEC-60034-2-1 gibi standard deney yöntemleri, dünyada akredite laboratuvarlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dünya genelinde motor üreticileri üretim çıktılarının uygunluk doğrulamalarını sağlamak adına, Üniversiteler ve Enstitülerde Ar-Ge çalışmaları adına, kamu ve özel deney merkezlerinde uygunluk değerlendirme faaliyetleri adına motor deney laboratuvarlarının mevcut olduğu görülmektedir. Ancak genel olarak akredite deney laboratuvarlarının yatırım maliyetleri oldukça yüksektir, ayrıca Ülkemiz adına yurtdışında deney yaptırma ücretleri sevkiyat bedelleri hariç 2.000 Avro ila 5.000 Avro arasında değişmektedir. Bu duruma örnek olarak Türkiye'de Türk Standardları Enstitüsü'nde kurulan, 0,18-90 kW güce kadar hizmet verebilen 800.000 Avro yatırım maliyetli deney laboratuvarı gösterilebilir. Yukarıda bahsedilen yüksek yatırım ve işletme maliyetleri, yüksek deney ücretleri ve zaman kısıtları gibi nedenlerden ötürü yerinde veya işletmede deney yöntemleri arayışı bilimsel çalışmaların yönlenmesinde oldukça etkili olduğu söylenebilir. Bu alanda literatüre yansıyan saha deney yöntemleri, bilinen tek bir basit yöntemi içermekte veya farklı temel yöntemlerin bir kombinasyonu kullanılarak oluşturulabilmektedir.

Literatürdeki temel yöntemler; kayma yöntemi, akım yöntemi, istatistiksel yöntem, eşdeğer devre yöntemi, hava aralığı moment yöntemi, şaft moment yöntemi ve benzeri olarak ifade edilebilir [21–25].

1990'lardan itibaren, literatürde çeşitli verimlilik tahmin yaklaşımları önerilmiştir. 1996 yılında Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda motorlarda verimlilik üzerine çalışan bir ekip, literatürde daha önce önerilen yöntemlerin 28'i üzerinde ekonomiklik ve belirsizlik tabanlı çalışma yapmıştır. Bu çalışmadan kısa süre sonra aynı ekip 6 aday yöntem üzerinde çalışmaya devam etmiş ve bunların içinden 3 metodu (hava aralığı moment metodu, düzeltilmiş Ontario Hydro metodu, etiket değerlerine dayalı eşdeğer devre metodu) maliyet ve belirsizlik açısından önermiştir [26]. Genellikle, saha testi yöntemleri, besleme gerilimi ve hat akımı, etiket verileri, stator direnci, hız değeri veya boşta deney sonuçları üzerine inşa edilmektedir. Al-Badri tarafından 2015 yılında dengesiz gerilim altında çalışan üç fazlı asenkron motorların saha verimlilik tahmini adına bir çalışma yayınlanmıştır. Önerilen yöntem IEEE 112 F2-Yöntemi F1 hesaplamalarını ve önceden test edilmiş motor istatistiklerini kullanarak; DA direnç deneyi, nominal yük gerilim değerleri, hat akımı değerleri, giriş gücü ve hız ölçümü gerektiren bir genetik algoritma inşa etmektedir [27].

Bir başka çalışma, 2015 yılında Camila P. Salomon ve diğ. tarafından yayınlanmıştır. Bu yöntemde ise stator sargı direnci üzerinden çıkış momentini tahmin etme üzerine "Hava aralığı moment metodu" tabanlı stator sargı direnci verim ölçme algoritması geliştirmiştir. Yönteme göre hat akımı, hat gerilimi ve motor etiket bilgileri yanı sıra stator sargı direnci ve mekanik kayıpları bilinmesi yeterlidir. Yöntem genel olarak motor etiket değerlerini başlangıç giriş koşulu olarak almaktadır. Daha sonra mekanik kayıpların etkilerini de içerdiği ifade edilen stator sargı direnci tahminini "Parçacık Sürü Optimizasyonu" (PSO) metodu ile tespit ederek AGT yöntemi ile mekanik kayıpları da dâhil etmektedir. Bu yöntem ile tahmin edilen verim değerinin %10'dan daha az hata içerdiği ifade edilmiştir [28].

V. Dlamini ise yaptığı çalışmada motor kaynaklı titreşim verilerinden yararlanarak kayma değeri hesaplaması üzerinden verim değeri tahmini yapmaktadır. Bu yöntem için motora magnetik olarak yerleştirilen bir ivmeölçer aracılığı ile ölçülen titreşim sinyali ve akım-gerilim-güç faktörü değerlerinin ölçümü yeterli olmaktadır. Titreşim

sinyalleri üzerinden motorun rotor hızı ve dolaysıyla kayma değeri elde edilmektedir. Bu kayma değeri "Ontario Hydro kayma metodu" içerisinde ölçülen, tahmin edilen ve motor etiket değerleri kullanılarak verim değerini tahmin etmektedir. Tahmin edilen verim değeri çalışma içerisinde doğrudan ölçülen verim değeri ile karşılaştırılmış ve %3,5 hata tespit edilmiştir [29]. 2012'de Phumiphak, yaptığı çalışmada sincap kafesli asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerini bulma üzerine bir yöntem geliştirmiştir. Bu yönteme göre motor etiket değerleri ve bir dizi alan testi genetik algoritma yardımıyla verim hesabında kullanılmaktadır. Bu yöntem ile boşta çalışma deneyi ve kısa devre deneylerine ihtiyaç duyulmadığı motorun işletme şartlarını muhafaza edeceği ifade edilmektedir. Hat gerilimi, hat akımı, güç faktörü, rotor hızı ve en az bir noktaya ait verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Genetik algoritma için kullanılan veriler IEEE-112B metodu ile elde edilmiştir. Bu yöntem ile verim değeri %2'dan daha az hata ile tahmin edildiği beyan edilmektedir [30].

Motor verimi tahmin yöntemlerinden boşta test verilerini kullanarak tahmin algoritması geliştiren çalışmalardan birisi ise Maher Al-Badri'nin çalışmasıdır. Bu yöntemde diğerlerinde olduğu gibi stator sargı direnci, motor etiket değerleri, rotor hızı ve en az 5 farklı gerilim kademesinde yapılan boşta çalışma sonuçları kullanılmaktadır. Bu sayede bakır, demir ve sürtünme ventilasyon kayıplarını hesaplamaktadır. Ek kayıplar ve eşdeğer devrenin diğer parametreleri için IEEE-112B standardının ilgili kısımlarından faydalanmaktadır. Önerilen metodun 60 Hz besleme frekansında çalışan sincap kafesli asenkron motorlar için hazırlandığı ve başka frekans ile beslenen ya da rotoru farklı olan motorlarda çalışmayabileceği de işaret edilmiştir [31]. Bir başka yayında ise Mahmud Ghasemi-Bijan ve diğ. asenkron motor parametrelerini kabul edilebilir şekilde saptamak için etiket bilgileri ile Hydro-Québec tarafından sağlanan geniş bir veri tabanı (test edilmiş indüksiyon motorlarına ait) arasındaki ilişki Genetik Algoritma yönetimi ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliği ve doğruluğu, farklı güç oranlarına sahip 4 asenkron motoru test edilerek doğrulanmaya çalışılmıştır [32].

Literatür açısından tez çalışmasına en yakın çalışma olarak Maher Al-Badri ve diğ. tarafından yayınlanan "Simple and Accurate Algorithm for Three-Phase IM Efficiency Estimation from Only No-Load Tests" yayını dikkat çekmektedir. Söz konusu yayında önerilen deney yöntemi başlıca şu adımları içermektedir;

- Soğuk Direnç Ölçümü (Deneysel)
- Etiket Bilgileri (Tahmin Girdileri)
- Boşta Deney Verileri (Deneysel)
- Tam Yük Sıcaklık Tahmini (Tahmin)
- Ek Kayıplar (Tahmin)
- Hava Aralığı Gücü (Hesaplama)
- Rotor Kayıpları (Hesaplama)
- Verim (Hesaplama)

Bu yayında, 3 fazlı asenkron motorun tam yük verimliliğini yalnızca boşta deney ile tahmin etmek için kullanılabilecek bir endüstriyel yöntem sunulmaktadır. Önerilen teknik, IEEE-112B ve CSA C390 standart prosedürlerine göre Hydro-Québec laboratuvarında test edilen ve 1-500 HP arasında değişen 129 motorun deney sonuçları verisini kullanmaktadır. Elde edilen yöntem 15 motor üzerinde uygulanmış ve sonuçlar yayında paylaşılmıştır. Önerilen yöntem %0,38 ortalama belirsizlik beyan etmektedir [33].

Bir başka yayında Maher Al-Badri dengesiz voltaj koşulları altında çalışan asenkron motorları için bir genetik algoritma sunulmaktadır. Önerilen yöntemde genetik algoritma; IEEE F2-yöntemi F1 hesaplamalarını esas alan 128 motora ait veri tabanını ve yeni ek kayıp formülünü kullanmaktadır. Yöntem, küçük ve orta büyüklükteki indüksiyon motorları test edilerek değerlendirilmiştir. Yayının öne sürdüğü yenilik formüllere dayanan ek yük kaybı ve sürtünme ve ventilasyon kayıplarının belirlenmesinde yeni bir yaklaşım göstermesi ve sadece bir yüklenme noktasının yeterli olması olarak sunulmuştur [34].

Marcelo M. Stopa ve diğ. yük altında olan asenkron motorların verimlilik tahmini algoritmalarında kullanımına ihtiyaç duyulan moment değerini tahmin etmek için yeni ve basit bir teknik sunduğunu ifade etmektedir. Bu yöntemin uygulanması için sadece tek faza ait akım ve gerilim değerlerinin yeterli olduğu ve tek fazın akım ve gerilim örneklerinden anlık moment, hız, güç ve verimin hesaplandığını önermektedir. Önerilen tekniğin geçerliliğini ve performansını kontrol etmek için IEEE-112B ve CSA C390 standart deney yöntemlerine göre Hydro-Québec laboratuvarında test edilmiş ve 1-500 HP arasında değişen 129 motorun deney sonuçları verisini kullanılmıştır. Tahmindeki hata oranı %2 altındadır [35]. M. Aminu, çalışmasında,

sadece boşta test ölçümleri kullanılarak verimlilik tahmini için basit bir yöntem sunduğunu ifade etmektedir. Yöntemin, yüksüz düşük voltaj testinden eşdeğer devre parametresi tanımlamasına ve tanımlanmış parametrelerin verimlilik hesaplamasının uygulanmasına dayandığı ifade edilmektedir. Eşdeğer devre parametreleri, yapay sinir ağları optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. 7,5 kW ve 11 kW gücünde iki asenkron motor test edilmiş ve sonuçlar IEEE-112B deney metodu ile karşılaştırılmıştır. 7,5 kW ve 11 kW motorlar için % -0,83'ten daha bir hata elde edildiği ifade edilmektedir [36]. P. K. Chaudhary çalışmasında, üç farklı kuruluştan 307 indüksiyon motorunun verileri kullanılarak optimizasyon tabanlı tahmin metodu olan yapay sinir ağları ile verimlilik tahminleri yapılmıştır. Sonuçların, katalog değerlerinde verilen verimlilik değerlerine çok yakın olduğu ifade edilmektedir [37].

Son olarak C. Grantham çalışmasında motoru dinamometre ile yüklemek yerine sentetik yüklenme olarak adlandırdığı ve temelde motorun rotoruna yük bağlamadan nominal frekansında değişimler yapabilecek DSP (Digital Signal Processor) kontrollü, yüksek anahtarlama frekansına sahip IGBT tipi bir inverter üzerinden besleme ile elde edilen değerlere dayanmaktadır. Sentetik yükleme ile motor gerilim değeri sabit kalarak daha düşük frekanslarda motorun statorundan nominal akımı geçene kadar deneye tabi tutulur ve bu noktada motorun çektiği güç toplam kayıp değeri olarak kaydedilir. Yöntem sonuç olarak dinamometre ile yapılan sonuçlara oldukça yakın bir sonuç verse de kayıpların detaylı analizine imkân vermemektedir [38].

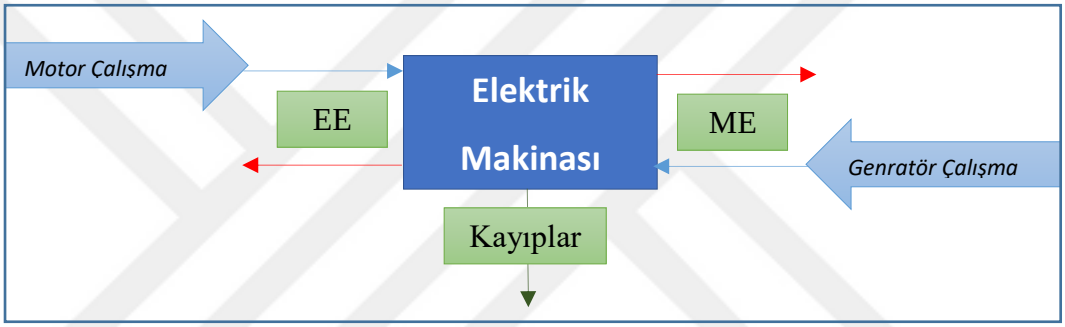
Özet olarak literatürde sincap kafesli asenkron motorun verimini bilinen standard yöntemlerin dışında daha ekonomik ve özellikle işletme koşullarında ölçme adına çeşitli yöntemler üzerinde çalışmalara rastlanmıştır [39–43] . Genel olarak çalışmalar kayma değeri tespiti, boşta çalışma, eşdeğer devre parametrelerini tespit etme, stator sargı direnci, bilinen verilerden veri havuzu yardımıyla genetik algoritma dizaynı ve sentetik yükleme benzetimleri olarak özetlenebilir. Bunların dışında benzer çalışmalarda kaynaklarda verilmiştir [44–47].

Bu çalışmada, TS EN 60034-2-1:2014 standardı ve sincap kafesli asenkron motorun eşdeğer devre denklemine dayanılarak elde edilen yeni bir verimlilik model fonksiyonu ve bu fonksiyona veri üretecek yeni bir saha deney prosedürü tanımlanmıştır.

Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yöntemi çalışmasının altında yatan motivasyon unsurlarından birisi, elektrik motorlarında enerji verimliliği ölçme laboratuvarlarının altyapı ve işletme maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bir diğer neden ise endüstriyel işletmelerde oldukça fazla kullanılan sincap kafesli asenkron motorların (yaşlanmadan ötürü verim değerlerinde düşüş yaşanması ve yeni mevzuat düzenlemeleri ile daha verimli ürünlerin pazarda yer alması) değişim ihtiyacına karar verme noktasında güvenilir ve ekonomik veri elde etme imkânın bulunmaması ifade edilebilir. Bu sebeplere ek olarak piyasa gözetimi ve denetimi yapan kamu otoritesinin daha kısa sürede sonuç üreten ve daha ekonomik deney imkânına ihtiyaç duyması ilave edilebilir. Sincap kafesli asenkron motorların işletme koşullarında laboratuvar imkânlarına, dinamometreye ve moment sensörlerine ihtiyaç duymadan, endüstriyel atölyelerde kolaylıkla bulunabilecek ölçüm cihazları ile enerji verimliliği ölçümü deneyleri yapılabilen ve bu deneylerden elde edilen sonuçları ölçüm belirsizliği değeri bilinebilir bir hesaplama yöntemi üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir.

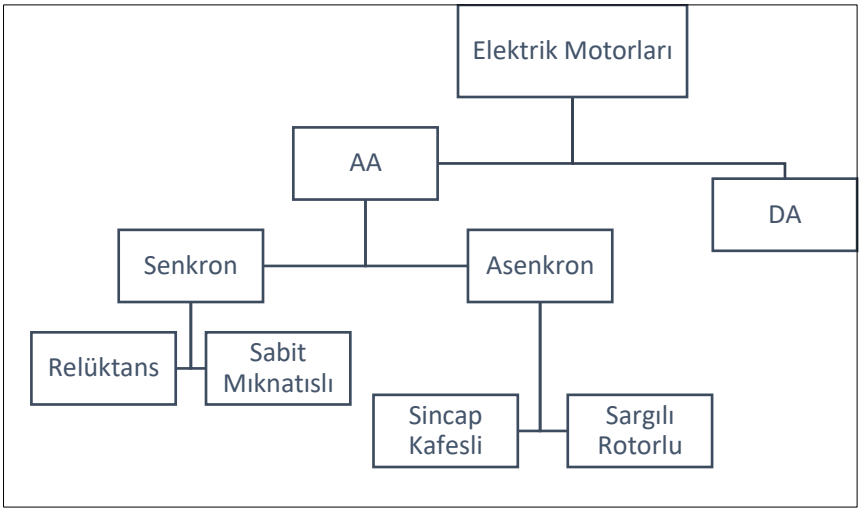
3. ASENKRON MOTORLAR

Elektrik motorları Şekil 3.1'de şematik olarak gösterildiği üzere temelde elektromekanik enerji dönüşümü prensiplerine göre, girişine uygulanan elektrik enerjisini çıkışında mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makinalarıdır. Düşük maliyetli olması, kolay erişilebilmesi ve şebekeye doğrudan bağlanabilme imkânları sebebiyle elektrik enerjisi ile çalışan cihazlarda hareketin yani mekanik enerjinin vazgeçilmez unsurlarıdır.



Şekil 3.1. Elektrik motoru çalışma prensibi şematik gösterimi [48]

Zaman içerisinde kullanım ihtiyaçları ve gelişen teknoloji sebebiyle çeşitli sınıflara ayrılmış ve bu kategorilerde özelleşmiş motor tipleri mevcuttur. Genel olarak alternatif akım ve doğru akım ile çalışan motorlar olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilirler. Şekil 3.2'de çalışma prensibi ve konstrüksiyon temelli genel bir sınıflandırma örneği verilmiştir. Tez çalışmasına esas teşkil eden motor tipi, Sincap Kafesli Asenkron Motorlardır. Sanayide en çok kullanılan motor tipi Sincap Kafesli Asenkron Motorlardır [4]. Bu motorların yapısının basit ve ucuz oluşu, şebekede elektrik enerjisinin üç fazlı alternatif akım şeklinde üretilmesi, taşınması ve dağıtımı, bu motorların elektrikle tahrikte geniş ölçüde kullanılmasının temel nedeni olmuştur [49].



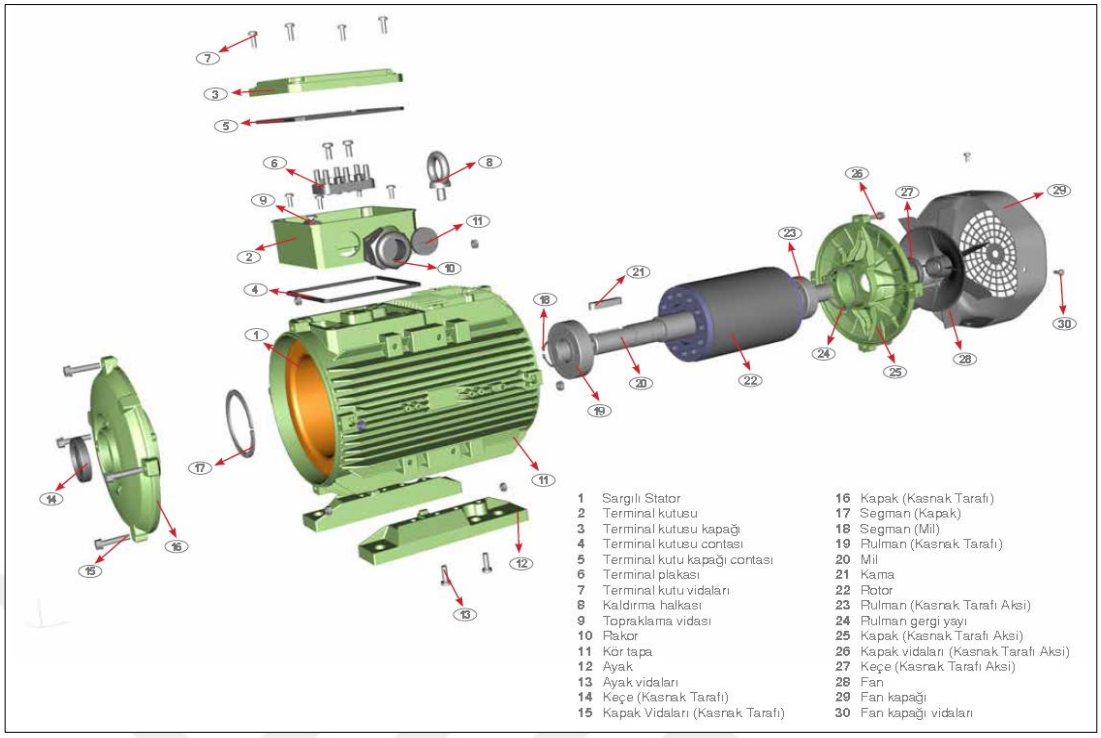
Şekil 3.2. Elektrik motorlarının türlerine göre şematik gösterimi [50]

3.1. Asenkron Motorlar

Asenkron motorlar rotor yapı şekillerine göre, kısa devre rotorlu (sincap kafesli) ve rotoru sargılı (bilezikli) asenkron motor olmak üzere iki farklı tipte üretilirler. Bu iki tip motorun stator yapısı tamamen aynı olup, statorlarına açılan oluklara yerleştirilmiş yıldız (Y) veya üçgen (Δ) olarak bağlanabilen üç fazlı sargılar bulunur. Kısa devre rotorlu asenkron motorun rotorunda sincap kafes yapılı sargı, bilezikli asenkron motorların rotorunda ise standart olarak yıldız bağlı üç fazlı bir sargı bulunur. Her iki tip asenkron motorda da üç fazlı stator sargısının çıkış uçları bir bağlantı kutusuna yerleştirilmiştir. Sincap kafesli asenkron motorun rotorunun dış devre ile bir elektriksel bağlantısı olmayıp galvanik olarak izoledir, bilezikli asenkron motorların yıldız bağlı olan rotor sargılarının üç giriş ucu, üç bilezik ve fırça takım üzerinden diğer bir bağlantı kutusuna yerleştirilmiştir [49].

3.2. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Konstrüksiyonu

Sincap kafesli asenkron motorlar yapısal olarak diğer motorlara nazaran daha basit ve kullanışlıdır. Gerek mekanik yapı gerekse elektriksel olarak sincap kafesli asenkron motorların mimarisi stator (sabit kısım) ve rotor (hareketli kısım) olmak üzere iki ana kısma ayrılır. Bunlara ek olarak Şekil 3.3'de gösterildiği üzere sargılar, gövde, bağlantı kutusu, soğutma fanı ve diğer bağlantı elemanları yapı içerisinde yer almaktadır.



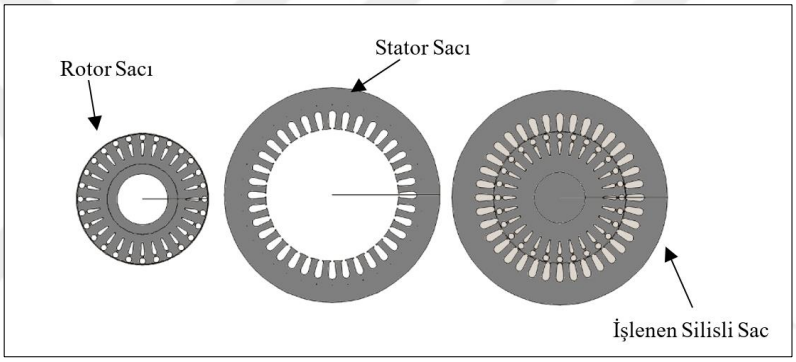
Şekil 3.3. Asenkron motorun başlıca yapısal parçalarının gösterimi [51]

Stator ya da bir başka deyişle duran kısım iki temel alt kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar; ince silisyumlu genellikle 0,4-0,5 veya 0,8 mm kalınlığında sacların preslenerek uygun form verilmesi sonrası birbirine bağlanan stator sac paketi ve bu paketi taşıyan alüminyum veya pik dökümden yapılmış stator gövdesidir [52]. Stator sac paketi, sargıları taşıyan ve magnetik akıyı ileten endüvi sargısının yerleştirildiği kısımdır. Kayıpların azaltılması adına manyetik direncin küçük olması için ferro-manyetik malzemeden imal edilir. Sargılarda akan akımların oluşturduğu alternatif manyetik alanlardan ötürü nüvede Histerizis ve Eddy (fuko) akımları kayıpları meydana gelir. Değişken manyetik alan içerisinde kalan demir nüvede edüklenen gerilimden dolayı nüve içerisinden eddy akımları dolaşır.

Bu akımlar nüvede ısı şeklinde enerji açığa çıkartarak güç kaybına neden olurlar. Bu kayıp güce eddy akımları kayıpları denir. Bir diğer kayıp olan Histerizis kayıplarına neden olan olay, zamana göre değişen manyetik akı yoğunluğundan ötürü, nüvenin manyetik domainlerindeki her bir atomun manyetik akı yoğunluğunun pozitif ve negatif yarı çevrimlerinde yön değiştirmesi sırasında ısı şeklinde harcanan güçtür [53]. İşte bu kayıpları azaltmak adına nüve sac plakalardan oluşur. Bu sac plakalar silisyum içerdiği için nüve manyetik doyuma ulaşmadan yüksek manyetik alan

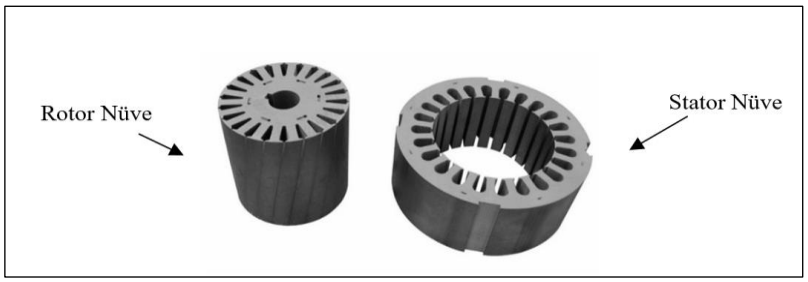
yoğunluklarının meydana gelmesine imkân verir [48]. Stator ve rotor sacları üretimi motor mimarisi açısından önemli işlemlerden biridir. Bu sebepten ötürü stator ve rotor sacları kesimi işlemi uygun kalıp ve teknoloji seçimi ile yapılmalıdır. Uygun hava aralığı ve oluk yapısı oluşturulur. Sacların genellikle bir tarafları yalıtkan ve ince bir lak tabakası ile yalıtılarak içlerinden akan eddy (fuko) akımlarının küçültülmesi ve böylece eddy (fuko) kayıplarının azaltılması sağlanır.

Böylece üretimde malzeme verimli kullanılmış olur. Önce stator sacının dış çevresi, rotor olukları, mil, kama yeri kesilerek açılır. Daha sonra stator olukları açılır. Hava aralığına göre de stator sacının iç çapı rotor sacının ise kesilerek Şekil 3.4'da gösterilen stator ve rotor sacları elde edilir [52, 54].



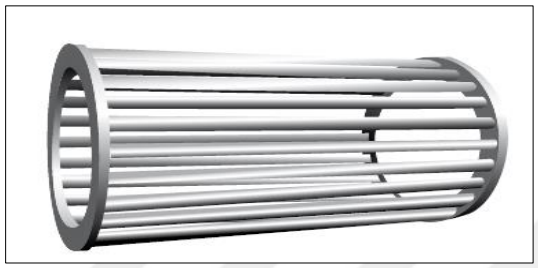
Şekil 3.4. Stator ve rotor laminasyonu örneği

Bu aşamadan sonra motorun elektriksel değerlerine göre sac levhalar ardışık olarak dizilirler. Stator laminasyon sacları sac paketi (nüve) olarak bir araya getirilir. Sac paketi sıkıştırılır ve laminasyonlar daha sonra beraberce ya kaynaklanır veya perçinlenir [55]. Şekil 3.5'da rotor ve stator sac paketlerine örnek gösterim verilmiştir.



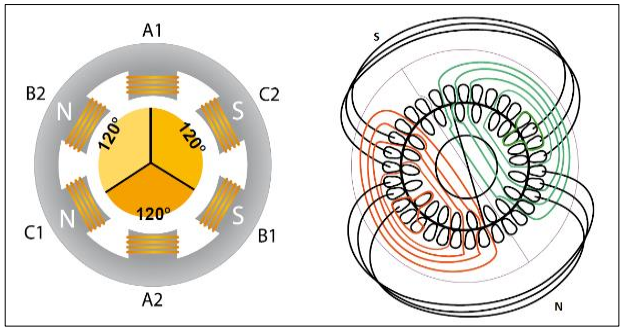
Şekil 3.5. Rotor ve stator sac paketleri fotoğrafı

Asenkron motorun dönen kısmıma rotor denir. Yaygın olarak kısa devreli rotor (sincap kafesli rotor) ve sargılı rotor (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşit rotor vardır. Rotor sacları da stator sac paketi ile aynı malzemeden üretilir. Stator gibi silisyumlu saçlar kalıpla preste kesilerek paketlendikten sonra rotor kanalları içine eritilmiş alüminyum dökülerek Şekil 3.6'de gösterilen kısa devre kafes sargıları meydana getirilir. Rotorun iki tarafında rotor çubuklarını kısa devre eden halkalar bulunur [54].



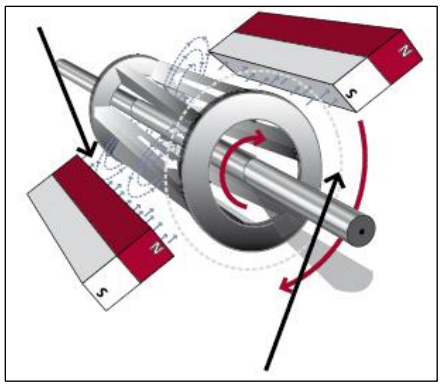
Şekil 3.6. Rotor iletkenleri kafes yapısı gösterimi [56]

Sincap kafesli asenkron motorun sargıları alternatif akım sargılarıdır. Sargılar statorda olukların içine yerleştirilirler. Yapı içerisindeki diğer iletkenlere temas etmemesi adına yalıtılırlar ve bu sayede iletkenler arası ve faz-gövde arası oluşabilecek hata akımlarının önüne geçilir. Motor çalışma ilkeleri gereği sargılarda manyetik alanın oluşturulabilmesi için bobinden elektrik akımı geçirmek ya da sabit mıknatıs kullanmak gerekmektedir. Sincap kafesli asenkron motorda bobin yapısı bulunmaktadır. Seri bağlı iki iletkenin oluşturduğu yapıya sarım denir. Bobin kapalı çevrim seri bağlı iletkenlerin (sarımların) nüve etrafında oluşturduğu yapıdır. Stator sac paketi içerisine yerleştirilen bobinler sayesinde motorun manyetik kutupları oluşturulmuş olur [48]. Şekil 3.7'de görüleceği üzere üç fazlı asenkron motorun statoruna birbirinden 120° faz farklı 3 faz sargısı yerleştirilir. En basit bir statorda her biri bir faza ait olmak üzere 3 tane bobin bulunur. Bir stator en az iki kutuplu olarak sarılabilir.



Şekil 3.7. Stator sargıları şematik gösterimi [56]

Statorda oluşan döner manyetik alanın meydana getirdiği manyetik akı motorun çevresinde senkron hızda döner. Bu hızla dönen manyetik alan vektörü, senkron hızdan daha yavaş bir hızda rotorda bulunan kafes formdaki rotor iletkenleri içinden geçer ve bu noktada Faraday yasasına göre manyetik alan içerisinde bulunan iletken uçlarında, iletkenin bulunduğu düzleme dik açı ile geçen manyetik akının zamana göre değişmesi sayesinde gerilim indüklenir. Rotor iletken çubukları yapı gereği kısa devre edilmiştir. Böylece rotor iletkenleri üzerinde döner alan kaynaklı oluşan gerilimden ötürü akım akar. Biot-Savart yasasına göre üzerinden akım akan bir iletken manyetik alana maruz kaldığında iletkene dik bir kuvvete etki eder. Bu kuvvet sayesinde Şekil 3.8'de gösterildiği formda motor hareket eder [48].



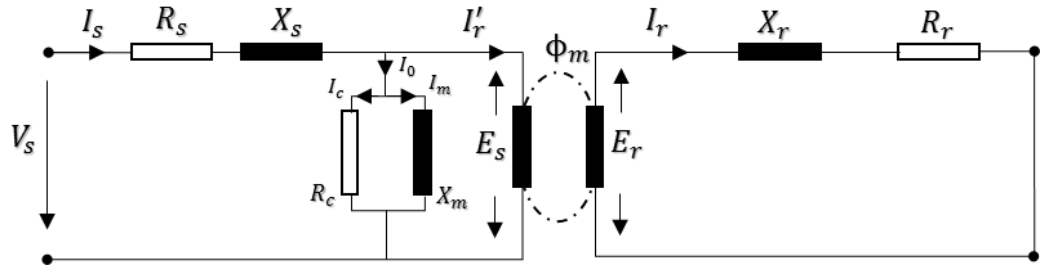
Şekil 3.8. Motor çalışma şematik gösterimi [56]

3.3. Sincap Kafesli Asenkron Motorların Bir Faz Eşdeğer Devresi

Sincap kafesli asenkron motorlarda moment, güç faktörü, kayıplar, verim ve diğer parametreleri kolaylıkla hesaplamak adına diğer fazların eş yapıya sahip olduğunu kabul ederek bir faza ait eşdeğer devre oluşturulur. Bu sayede diğer fazlar ve motorun geneli üzerine hesaplamalar rahatlıkla yapılabilir. Eş değer devrenin matematiksel

modeli ortaya konurken hava aralığının her noktada eş olduğu, sargıların özdeş olduğu, manyetik akının sinüs formunda olduğu gibi bir takım kabuller yapmak gerekmektedir [48]. Bu noktada asenkron motorun genel olarak stator ve rotordan oluştuğunu hatırlarsak. Eş değer devreyi iki ana kısımda değerlendirebiliriz. Statorda nüve üzerine sarılmış sargılardan akan akım zamana göre değişen manyetik akı oluşturur. Bu akı stator ve rotor nüveleri ile stator ve rotor arasında bulunan hava aralığından oldukça az bir kısmı ise havadan kaçak olarak devresini tamamlar. Bu sebepten ötürü statorda stator sargılarının direnci R_s yanı sıra havadan devresini tamamlayan kaçak akılardan ötürü sargı direncine seri bağlı kaçak reaktans X_s denkleme dâhil edilir [53].

Stator sargılarındaki gerilim statorda zamana göre değişen manyetik akı oluşturur bu aynı zamanda rotor üzerinde manyetik akı akmasına ve dolayısıyla rotor tarafında gerilim endüklenmesine sebep olmaktadır. Bu endüksiyon trafodaki gibidir. Zira hava aralığı küçültülüp sıfıra götürülürse yapısal olarak trafo elde edilir. Rotor ile stator galvanik olarak izole olduğundan ötürü eşdeğer devreye rotor devresi indirgenmiş olarak tanımlanır. Asenkron motorun stator ve rotor devrelerini tek bir eşdeğer devrede gösterebilmek için iki ayrı devrenin birbirine paralel bağlanabilmesi ve belirli paralel bağlanma koşullarının sağlanması gerekir: Gerilimler eşit olmalı, frekanslar eşit olmalı, polariteler eşit olmalı, gerilimler arasında faz farkı olmamalıdır. Bu birleşmenin gerçekleştirilebilmesi için rotorda sabit bir gerilim endükleniyor gibi düşünülmelidir. Bu noktada Şekil 3.9'de gösterildiği gibi rotorda endüklenen gerilimi kaymaya bağlı ifade ederek iki ayrı devreyi birleştirebiliriz [57].

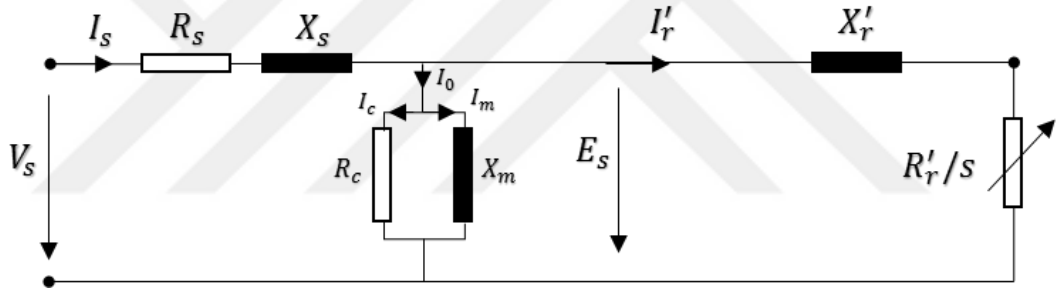


Şekil 3.9. Asenkron motor bir fazlı eşdeğer devre şematik gösterimi [53]

Eşdeğer devre için rotor kısmı incelendiğinde rotor empedansının kayma ile ilişkili olduğu görülür. Rotor eşdeğer devre parametrelerini kayma ile ilişkilendirirsek rotorda endüklenen gerilimi statora indirgemek suretiyle iki devreyi birbirine paralel bağlayabiliriz. Rotor dururken rotor sargılarında endüklenen gerilim E_{ro} kayma değeri

1 olmasından dolayı kaymanın herhangi bir değerindeki rotorda edüklenen E_r değerine eşittir. Benzer şekilde rotor dururken rotor sargılarının kaçak reaktansı X_{ro} değeri, kaymanın herhangi bir değerindeki rotor kaçak reaktansı X_r değerine eşittir [53]. Statorda şebeke frekansında döner alan ve dolayısıyla şebeke frekansında manyetik alan oluşur. Rotorda oluşacak manyetik alanın frekansı, senkron hız ile rotor hızı arasındaki farktan ötürü oluşan kayma değeri kadar küçülecektir. Kayma değerinin genel olarak %1 ila %5 arasında olduğunu kabul edersek rotorda endüklenen elektromotorkuvvetin statora nispeten oldukça küçük olduğu görülecektir [48].

Bu sebepten ötürü rotor için demir kayıpları ihmal edilebilir seviyede olduğu kabul edilir. Bu noktada rotor kısmında kayma ile ilişkilendirilmiş iletken direnci $R_r^{'}/s$ ve kayma ile ilişkilendirilmiş $X_r^{'}$ kaçak reaktansı denklemde yerini alır. Şekil 3.10'de asenkron motorun statora indirgenmiş bir faz eşdeğer devresi verilmiştir [48, 57].



Şekil 3.10. Asenkron motorun (rotor devresi) statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi şematik gösterimi [53]

4. ASENKRON MOTOR VERİMLİLİK ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Kullanımına göre elektrik motorları seçiminde verim en önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle 1998 yılında başlayan gönüllü uygulamalardan bu güne dek elektrik motorlarında verimlilik konusu önem arz etmiştir. Motorların sınıflandırılması motor verimi ölçme yönetimini de önemli hale getirmiştir. En bilinen yöntem Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de verilen direk metot olan çıkış gücünün giriş gücüne oranıdır. Bunun dışında dünyada birçok verim ölçme yöntemleri standartlaşmış ve deney laboratuvarları tarafından kullanılagelmiştir [58].

Çıkış gücü;

$$P_2=2\pi T(n/60) \tag{4.1}$$

Verim;

$$\eta=P_2/P_1\ \% \tag{4.2}$$

4.1. TS EN 60034-2-1:2014 Döner Elektrik Makineleri - Bölüm 2-1

IEC'nin (International Electrotechnical Commission) 1996 yılından buyana teknik komiteler vasıtasıyla geliştirdiği bu standard IEC 60034-2-1 adıyla ilk olarak 2007 yılında yayımlanmış ve son halini Aralık 2014 tarihindeki yenilenme sonrası almıştır. Bu standartta verimliliğin deneylerle belirlenme yöntemlerinin oluşturulması ve aynı zamanda belirli kayıpların elde edilme yöntemlerinin belirtilmesi amaçlanmıştır. Bu standard, IEC 60034-1 kapsamında belirtilen tüm boyutlardaki DA motorlarını, AA senkron motorları ve asenkron motorları kapsar [20, 59].

Standard, nominal gücü 2 MW altındaki üç fazlı asenkron motorlar için "artık kayıplar metoduna göre ek yük kayıpları dâhil kayıpların toplamı" yönetimini (Metot 2-1-1B) tanımlamaktadır. Tarif edilen yönteme göre dinamo firen sistemi yardımıyla bir dizi deney gerçekleştirilmelidir. Bu deneyler ancak tam teşekküllü bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Standard, metodun geçerli olması için ölçüm cihazlarının hassasiyetleri ve ölçüm sonuçlarının belirsizliği üzerine bir dizi tanımlama

yapmaktadır. Tablo 4.1'de standardın izlenmesini istediği sıra ve deneylere ait kısa bilgiler verilmiştir. Bu deneylerin sonunda elde edilen ham veriler üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda toplam kayıplar hesaplanmaktadır. Hesaplamaların standardtarafından kabul edilebilirliği, ek kayıplar hesabında yapılan regresyon analizinin doğruluk testi ve tanımlar kısmında verilen gerilim, frekans dalgalanması limitleridir.

Tablo 4.1. TS EN 60034-2-1:2014 Standardı deney akış tablosu

Soğuk Direnç Ölçümü
Ortam şartları ve sargı hat-hat arası sargı direnç değeri kaydedilir.
Nominal Yük Deneyi (S1 ısınma deneyi)
Dinamo firen sistemi yardımı ile motor temiz şebeke üzerinden nominal yükte beslenir. Sargı sıcaklığı ve elektriksel ve mekanik değerler kaydedilir. Sargı sıcaklığı değişimi 30 dakikada 1 K olduğu zaman deneye son verilir. Sıcak direnç değerleri ölçülür.
Değişken Yük Deneyi
Motor %125 ile %25 arasında belirli 6 yüklenme noktasında yüklenir. Elektriksel giriş ve mekanik çıkış değerleri kaydedilir. Deney öncesi ve sonrası sargı dirençleri ölçülür.
Boşta Çalışma Deneyi
Motor yükten ayrılır. Nominal besleme geriliminin %110 ile %30 arasında belirlenen 8 ayrı gerilim seviyesinde boşta çalıştırılır. Elektriksek değerler kaydedilir. Deney öncesi ve sonrası sargı dirençleri ölçülür.

Tüm hesaplamaların sonucunda Denklem (4.3) ve Denklem (4.4)'de verilen ifadeler kullanılarak motor verimi hesaplanmaktadır [20, 59];

$$P_T=P_{fe}+P_{fw}+P_{s\theta}+P_{r\theta}+P_{LL} \quad (4.3)$$

$$\eta=(P_{1,\theta}-P_T)/P_{1,\theta} \quad (4.4)$$

4.2. CSA C390-10 (R2015) Üç Fazlı Asenkron Motorlar İçin Deney Yöntemleri

CSA Grup (Kanada Standardları Birliği) tarafından yayınlanan C390-10 standardı üç fazlı asenkron motorların işaretleme gereksinimlerini ve referanslar enerji verimliliği seviyeleri ve verim ölçümü için gerekli deneyleri tanımlamaktadır. Bu standard özellikle Amerika kıtasında bulunan ülkeler tarafından kabul görmektedir. Amerika Ulusal Elektrik İmalatçıları Birliği (NEMA) ve bağımsız bir ürün güvenlik

sertifikasyon kurumu olan UL (Underwriters Laboratories Inc.) tarafından kabul edilen bu standard 0,746-372 kW (1-500 HP) güç aralığımdaki üç fazlı asenkron motorlar için geçerlidir [60, 61].

Standardın Tablo 4.2'de anlatılan deney yöntemi genel hatları ile IEC'nin yönteminden çok farklı değildir. Dolayasıyla dinamo fren sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. CSA her deney öncesi deney cihazlarının sağlıklı çalıştığından emin olmak adına ön testleri zorunlu kılar. Voltaj ve frekans regülasyonu ile toplam harmonik bozulma ve sargı sıcaklığı değerlerini kontrol etmek gerekmektedir. Deney sırasında her bir faz için gerilim, frekans ve akım değerlerini bunun dışında sargı sıcaklık değerleri kaydedilmelidir [61].

Tablo 4.2. C390-10 (R2015) Standardı deney akış tablosu

Güç Kalitesi
Teste başladıktan hemen sonra enerji kalitesi kontrol edilmeli, eğer değerler tolerans dışındaysa testi durdurulmalı. Voltaj dengesizliği +-%0,5, frekans dengesizliği +-%0,5 ve THD değeri %5 ten az olmalı.
Sıcaklık & Direnç Testi
Teste başlamadan önceki soğuk direnç ve ortam sıcaklığı ölçülür. Ortam sıcaklığı ile sargı sıcaklığı arasında en fazla 3° fark olmalı.
Isınma Testi (S1 testi)
Dinamo firen sistemi yardımı ile motor temiz şebeke üzerinden nominal yükte beslenir. Sargı sıcaklığı ve elektriksel ve mekanik değerler kaydedilir. Sargı sıcaklığı değişimi 30 dakikada 1 K olduğu zaman deneye son verilir. Ve Sıcak direnç değerleri ölçülür.
Yük Testi
Motor %150 ile %25 arasında belirlenmiş %100'ü içeren 6 yüklenme noktasında yüklenir. Elektriksel giriş ve mekanik çıkış değerleri kaydedilir. Deney sırasında sargı sıcaklıkları da kaydedilmelidir.
Giriş Gücü Stabilizasyon ve Boşta Test
Boşta test öncesi nominal gerilimde beslenen motor giriş gücünde %3 ten fazla değişim yoksa boşta teste geçilir. IEC den farklı olarak 6 noktada değer alınması yeterli. Nominal gerilimin 60% ile %125 i arası en az üç değer alınmalı. Nominal gerilim değeri alınmalı. Nominal gerilimin 50% ile %20 si arası minimum üç değer alınmalı. Deney sırasında sargı sıcaklıkları da kaydedilmelidir.

4.3. IEE112 3 Fazlı Asenkron Motorlar ve Generatörler için IEEE Standart Deney Prosedürü

IEEE112 verim hesaplama adına kullanım yerlerini de ifade ederek 11 farklı metot tanımlamaktadır. Bu metotlardan "Metot B Giriş-Çıkış ile birlikte ek kayıpların endirekt ölçülmesi ve Kayıpların ayrıştırılması" yöntemi 1-300 kW güç aralığındaki motorlar için uygun görülmektedir. IEEE112-B deney metodu da diğer metotlar gibi dinamo fren sistemine ihtiyaç duymaktadır. Gene deney prosedürü olarak bilinen diğer yöntemlere oldukça yakındır [62, 63].

Tablo 4.3. IEEE112-B Standardı deney akış tablosu [64]

Soğuk Direnç Ölçümü
Ortam şartları ve sargı hat-hat arası sargı direnç değeri kaydedilir. Ortam sıcaklığı ile sargı sıcaklığı arasında en fazla 5° fark olmalı.
Nominal Yük Deneyi (S1 ısınma deneyi)
Dinamo firen sistemi yardımı ile motor temiz şebeke üzerinden nominal yükte beslenir. Sargı sıcaklığı ve elektriksel ve mekanik değerler kaydedilir. Sargı sıcaklığı değişimi 30 dakikada 1 K olduğu zaman deneye son verilir. Ve Sıcak direnç değerleri ölçülür.
Yük Deneyi
Motor %150 ile %25 arasında belirlenmiş %100'ü içeren 4'ü %100 ve altında 6 yüklenme noktasında yüklenir. Elektriksel giriş ve mekanik çıkış değerleri kaydedilir.
Boşta Çalışma Deneyi
Motor yükten ayrılır. Nominal besleme geriliminin %125 ve %100 gerilim seviyesinde boşta çalıştırılır. Elektriksek değerler ve sargı sıcaklığı kaydedilir.

Standard, Tablo 4.3'de verilen deneyler sonunda elde edilen ham verilen üzerinden kayıpların hesaplanacağını tarif etmektedir.

4.4. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Tespit Edilmesi

Asenkron motorlarda verimi direk metot üzerinden değerlendirsek, motorun eş değer devresi yardımıyla verim değeri hesaplanabilir. Sincap kafesli asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerini Tablo 4.4'de tarif edilen deneyler gerçekleştirerek hesaplayabiliriz. Boşta çalışma deneyinde rotor hızı senkron hıza çok yakın olduğundan ötürü motorun kayma değeri sıfıra çok yakındır. Kaymanın sıfıra yakın olması, eşdeğer devrede kayma ile ilişkili olan rotor direncini rotor bakır kayıplarından

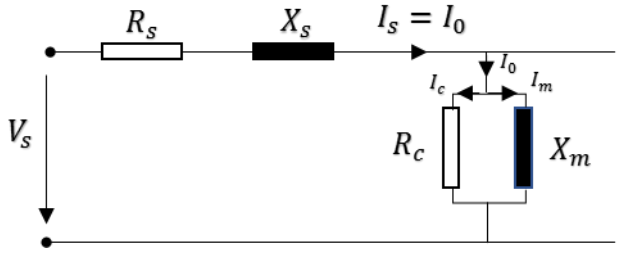
çok büyük hale getirir bu nedenle rotor bakır kayıpları ihmal edilebilir. Şebekeden çekilen toplam güç ise stator bakır kayıpları, demir kayıpları ve sürtünme ventilasyon kayıplarıdır.

Tablo 4.4. Eşdeğer devre parametreleri tespiti deneyleri akış tablosu

DA Direnç Deneyi
DA kaynağı ile motorun sargılarının bağlantı durumu dikkate alınarak sargı uçlarından herhangi ikisine sargılardan nominal akım değeri akıncaya dek gerilim uygulanır ve değerler kaydedilir. Bulunan DA direnç değeri 1.1 katsayısı ile çarpılır ve AA direnç değeri bulunur.
Boşta Çalışma Deneyi
Motor nominal gerilim ve frekans değerinde çalıştırılır. Akım, gerilim ve güç değerleri iki watmetre metodu ile ölçülür.
Kilitli Rotor Deneyi
Motorun rotoru özel bir mekanizma ile sabitleştirilerek dönmesi engellenir. Daha sonra gerilim yavaş yavaş arttırılır. Akım değeri anma değere ulaşınca motordan akan akım ve gerilim değerleri kaydedilir ve deney sonlandırılır.

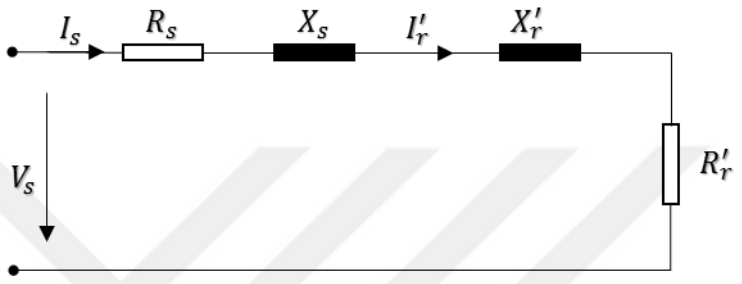
Boşta çalışma giriş gücünden stator bakır kayıpları çıkartılırsa sabit kayıplar yani demir ve sürtünme ventilasyon kayıpları tespit edilir. Asenkron motorun nüve kayıpları direnci R_c sabit kayıplar V_s ve I_c değerlerinin hesaplanması ile tespit edilir [53]. Uyartım devresi reaktansı X_m hesabı için faz başına düşen görünür güçten güç faktörü ve güç faktörü aracılığı ile I_m akımının hesaplanması gerekir.

Boşta çalışmada çekilen akımın çok düşük olması nedeniyle stator empedansı üzerine düşen gerilim ihmal edilir ve uygulanan gerilim direkt manyetik devreye uygulanan gerilim olarak alınır daha sonra V_s değerinin I_m değerine bölünmesi ile hesaplanır. Nihayetinde boşta çalışma durumunda eşdeğer devre Şekil 4.1'deki duruma gelir [53].



Şekil 4.1. Sincap kafesli asenkron motorun boşta çalışma bir faz eşdeğer devresi [48]

Kilitli rotor deneyi sırasında rotor cebri olarak hareket ettirilmediği için kayma değeri s=1 olur. Buna bağlı olarak mekanik hareket neticesinde oluşan kayıplar sıfır olur. Eşdeğer devredeki yükten kaynaklanan direnç değeri de sıfır olur. Asenkron motorun uyartım devre empedansı kısa devre durumunda rotor devre empedansına nispeten oldukça büyük olacağı için uyartım devresinin üzerinden akan akımda düşük olacaktır. Bu durumda uyartım devresinin kısa devre durumunda eşdeğer devreden çıkartılması kabul edilebilir ve kısa devre durumu eşdeğer devre Şekil 4.2'deki duruma gelir.



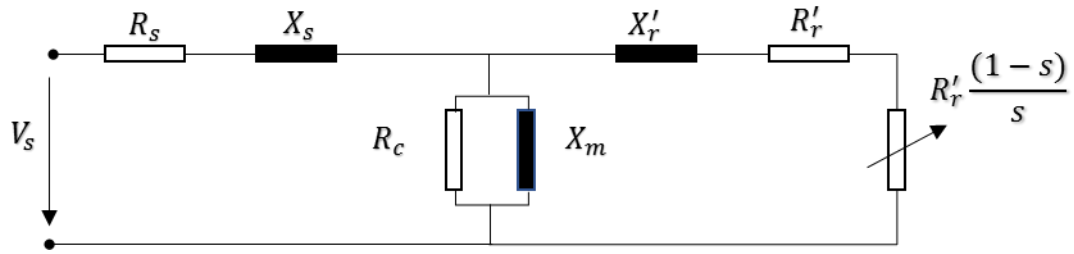
Şekil 4.2. Sincap kafesli asenkron motorun kısa devre çalışma durumu bir faz eşdeğer devresi [53]

Kilitli rotor deneyinde I_s ve akımı $I_r^{'}$ akımına eşittir. Şebekeden çekilen aktif güç ise uyartım devresi az bir hata ile ihmal edildiği için stator ve rotor bakır kayıplarının toplamına eşittir. Dönme hareketi olmadığından sürtünme ventilasyon kayıpları sıfırdır. Şebekeden çekilen aktif güç ve I_s akımı sayesinde rotor ve stator direnci toplamı hesaplanır DA deneyinden de stator direnci elde edildiği için Şekil 4.2'de verilen devre denklemi kullanılarak Şekil 4.3'de gösterilen R_s,$R_r^{'}$ değerleri hesaplanır. Kısa devre deneyi sonucunda elde dilen kısa devre akımı ve gerilim ile kısa devre empedansı hesaplanır. Hesaplanan empedans değerinden stator ve rotor dirençleri vektörel olarak çıkartılır. Böylece toplam stator ve rotor reaktansları bulunmuş olur. Sincap kafesli asenkron motorlarda ayrı ayrı stator ve rotor reaktansları Tablo 4.5'de verilen katsayılar ile stator ve rotor reaktansları toplamının çarpımı ile bulunur.

Tablo 4.5. Asenkton motor kaçak rekatansını stator ve rotor arasındaki dağılımı [53]

Motor Sınıfı	**Tanımlama**	$\mathbf{X_s}$	$\mathbf{X_r^{'}}$
A	Normal başlatma moment ve akımı	0,5	0,5
B	Normal başlatma moment ve düşük başlatma akımı	0,4	0,6
C	Yüksek başlatma moment ve düşük başlatma akımı	0,3	0,7
D	Yüksek başlatma moment ve yüksek başlatma akımı	0,5	0,5
Rotoru Sargılı		0,5	0,5

Yapılan deneyler neticesinde eşdeğer devre parametreleri tespit edilmiştir. Şekil 4.3'de verilmiş eşdeğer devre çözümü ile elde kayıpların tespiti ve verim hesabı yapılabilir.



Şekil 4.3. Sincap kafesli asenkron motorun eşdeğer devresi

5. TEZ ÇALIŞMASINDA ÖNERİLEN SAHA DENEY YÖNTEMİ

5.1. Saha Deney Yöntemi Adımları

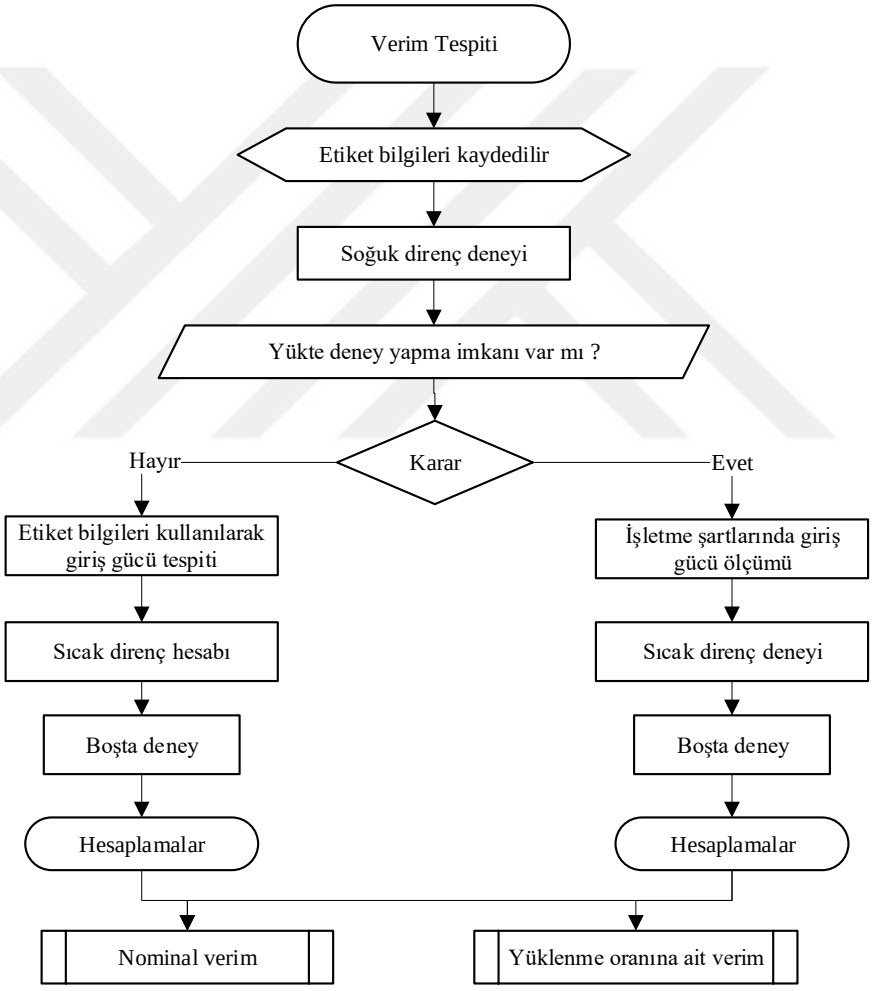
Tezde önerilen saha deney yönteminin temel dayanağını standard deney yöntemleri oluşturmaktadır. Ancak Bölüm 4'de detaylı şekilde verildiği üzere standard deney yöntemleri uygulamada ancak kontrollü laboratuvar şartları altında dinamo fren sistemi ile gerçekleşebilmektedir. Endüstriyel şartlar altında böylesinde bir deney imkânı ortam ve şebeke şartlarının değişkenliği, yük motorunun bulunmayışı ve moment sensörlerinin olmaması gibi sebeplerden ötürü pratik ve ekonomik değildir. Bu nedenle bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminde endüstriyel şartlara uygun olması adına standard deney yöntemlerine göre sadeleştirmeler yapılmış ve Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Tezde önerilen saha deney yöntemi ile standard deney yöntemleri arasında karşılaştırma tablosu

Deney Adı	**IEC 60034-2-1**	**IEEE 112B**	**CSA**	**Tezde Önerilen Saha Deney Yöntemi**
Soğuk Direnç Ölçümü	Miliohmetre (4 Uçlu)	Miliohmetre (4 Uçlu)	Miliohmetre (4 Uçlu)	Miliohmetre (4 Uçlu)
Nominal Yük Deneyi (S1 ısınma deneyi)	Sargı sıcaklığı değişimi 30 dakikada 1 K olana değin nominal yükte çalışmalıdır.	Sargı sıcaklığı değişimi 30 dakikada 1 K olana değin nominal yükte çalışmalıdır.	Sargı sıcaklığı değişimi 30 dakikada 1 K olana değin nominal yükte çalışmalıdır.	Etiket verileri yeterlidir.
Değişken Yük Deneyi	Motor %125 ile %25 arasında belirli 6 yüklenme noktasında yüklenir.	%150 ile %25 arasında belirlenmiş %100'ü içeren 4'ü %100 ve altında 6 yüklenme noktasında yüklenir.	Motor %150 ile %25 arasında belirlenmiş %100'ü içeren 6 yüklenme noktasında yüklenir.	Nominal verim hesabı için gerek şart değildir. Yüklenme oranına ait verim değeri için kullanılabilir.
Boşta Çalışma Deneyi	Nominal besleme geriliminin %110 ile %30 arasında belirlenen 8 ayrı gerilim seviyesinde boşta çalıştırılır.	Nominal besleme geriliminin %125 ve %100 gerilim seviyesinde boşta çalıştırılır.	Nominal gerilimin 60% ile %125 i arası en az üç değer alınmalı. Nominal gerilim değeri alınmalı. Nominal gerilimin 50% ile %20 si arası en az üç değer alınmalı.	Nominal gerilim ve frekansta boşta çalışma başlatılmalıdır.

Tablo 5.1'de görüleceği üzere tezde önerilen saha deney yönetiminin en temel avantajı sadece etiket bilgileri ve boşta deney verilerinin nominal verim hesabı için yeterli olması olarak ifade edilebilir.

Ayrıca standard deney yöntemlerinde olduğu gibi ısınma deneyi, 6 farklı yüklenme oranına ait değişken yük deneyi ve 8 farklı gerilim kademesinde gerçekleştirilen boşta deney süreçleri bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminde gerekli şartlar değildir. Standard deney yöntemleri yerine Şekil 5.1'de tarif edilen indirgenmiş saha deney akışı kullanılarak verim değeri hesaplanabilmektedir.

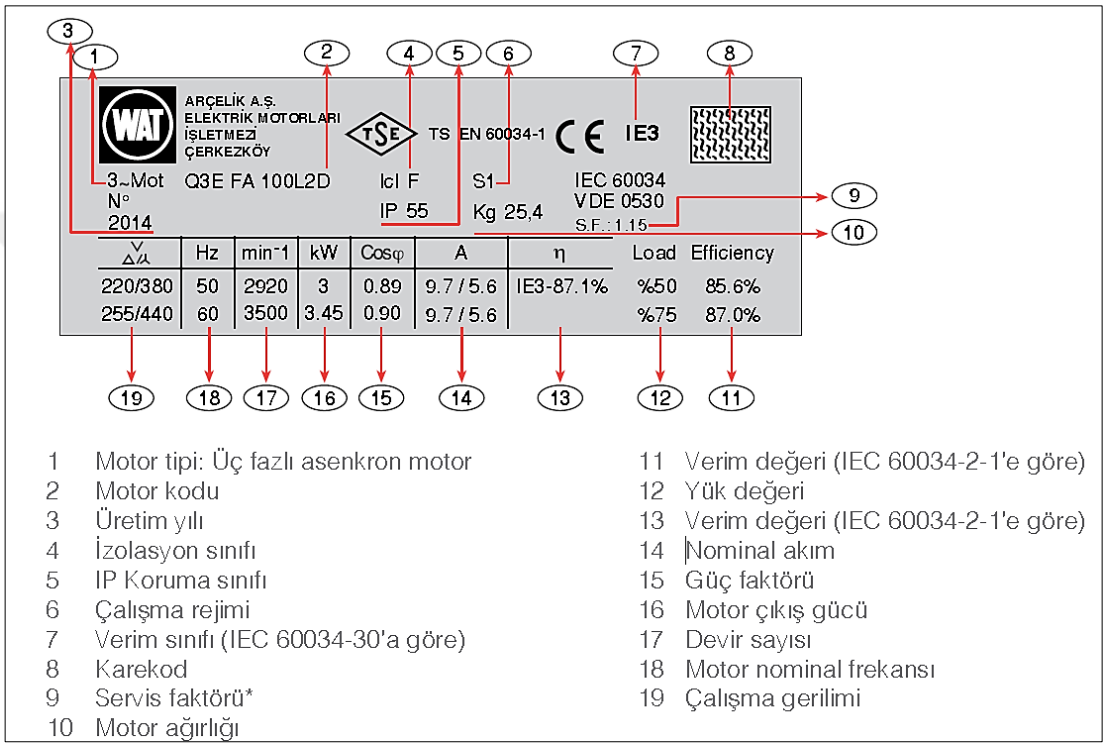


Şekil 5.1. Tezde önerilen saha deney yöntemine ait akış şeması

Şekil 5.1'de tarif edilen deney yöntemine esas adımların detaylı açıklamaları aşağıda verilmektedir.

Etiket bilgileri kaydedilir:

- Elektrik motorlarında etiket gereklilikleri TS EN 60034-1:2012 standardı madde 10'da belirtildiği gibi olmalıdır [65]. Tezde önerilen saha deney yöntemi için gerekli olan etiket verileri Şekil 5.2'de verilen etiket örneğinde işaretlenmiş olan 14,15,16,17,18 ve 19 numaralı sırasıyla; nominal akım, güç faktörü, çıkış gücü, devir sayısı, nominal frekans ve nominal gerilim değerleridir.



Şekil 5.2. TS EN 60034-1:2012 standardı gereklerine uygun motor etiketi görseli [51]

Soğuk direnç deneyi:

- Motor ile ortam sıcaklığı arasında en fazla 5° fark olduğu koşullarda deneylere başlanır.
- Verimi tespit edilecek sincap kafesli asenkron motor, mümkünse oda sıcaklığında şartlandırıldıktan ve elektriksel bağlantıları devre dışı bırakıldıktan sonra, her bir sargı için faz-faz arası direnç dört uçlu direnç yöntemi ile ölçülmelidir.
- Ortam sıcaklığı not edilmelidir.

İşletme şartlarında giriş gücü ölçümü:

- Motorun işletme şartlarında 3 saat kesintisiz çalışma imkânı varsa aşağıdaki adımlar ile ilerlenir.

- Verimi tespit edilecek sincap kafesli asenkron motorun en az bir fazına elektriksel ölçümler için uygun akım, gerilim, frekans ve güç faktörü ölçebilecek ölçü aletleri bağlanmalıdır.
- Verimi tespit edilecek sincap kafesli asenkron motor bu aşamada, işletme şartlarında yükte mümkünse kesintisiz olarak en az 3 saat çalışmaya bırakılmalıdır.
- 3 saatlik sürenin sonunda sincap kafesli asenkron motorun sargı sıcaklığının dengeye oturduğu varsayılmalı ve en az bir faz için elektriksel değerler (akım, gerilim, güç faktörü, frekans) kaydedilmelidir. Bu sayede istenildiği takdirde yüklenme oranı ve o yüklenme noktasına ait verim değeri hesaplanabilir.

Etiket bilgileri kullanılarak giriş gücü tespiti:
- Motorun işletme şartlarında 3 saat kesintisiz çalışma imkânına bakılmaksızın aşağıdaki adım ile ilerlenir.
- Verimi tespit edilecek sincap kafesli asenkron motorun etiket değerlerinden (akım, gerilim, güç faktörü, frekans) nominal giriş gücü tespit edilir.

Sıcak direnç değerinin belirlenmesi:
- Motorun işletme şartlarında 3 saat kesintisiz çalışma imkânı varsa aşağıdaki adımlar ile ilerlenir.
- Sincap kafesli asenkron motor işletmeden çıkartılmakta, fiziksel olarak durmasını müteakip enerji kesilerek her bir sargı için faz-faz arası direnç dört uçlu direnç yöntemi ile ölçülmektedir.
- Yukarıda tanımlı adım yerine sargı sıcaklığının kaydedildiği durumlarda Denklem (5.16) kullanılarak sıcak direnç hesaplanabilir.
- Ortam sıcaklığı da not edilmelidir.
- Motorun İşletme Şartlarında 3 saat kesintisiz çalışma imkânı yoksa sadece aşağıdaki adım ile ilerlenir.
- Sıcak direnç değeri hesabı için Denklem (5.15) ve Denklem (5.16) kullanılır. Sargı sıcaklığı 80°C olarak kabul edilir ve Kt değeri 1 alınır.

Boşta çalışma deneyi:
- Sincap kafesli asenkron motor fiziksel olarak yükten ayrılmalıdır.

- Sincap kafesli asenkron motorun en az bir, mümkünse her bir fazına elektriksel ölçümler için uygun akım, gerilim, frekans ve güç faktörü ölçebilecek ölçü aletleri bağlanmalıdır.
- Nominal gerilim ve frekansta boşta çalışma başlatılmalıdır.
- Sincap kafesli asenkron motorun her bir faz için elektriksel değerler (akım, gerilim, güç faktörü, frekans) kaydedilmelidir.
- Sincap kafesli asenkron motorun her bir sargısı için faz-faz arası direnç, dört uçlu direnç yöntemi ile ölçülmelidir.

Verilerin derlenmesi:

- Deney aşamalarında kaydedilen akım, gerilim, güç faktörü, direnç, sıcaklık değerleri kullanılarak ayrı ayrı bakır kayıpları, sabit kayıplar ve ek kayıpların yanı sıra giriş gücü ve tahmini çıkış gücü Bölüm 5.2'de verilen denklemler aracılığı hesaplanır.

Verimin hesaplanması:

- Tüm kayıplar bulunduktan sonra Bölüm 5.2'de verilen denklemler aracılığı ile verim değeri tespit edilir. Isınma deneyi yapıldığı taktirde ısınma deneyinin gerçekleşmiş olduğu yüklenme noktasına ait giriş gücü değerleri sayesinde istenildiği takdirde o noktaya ait verim değeri nominal %100 yüklenme noktasının yanı sıra belirlenebilir.

5.2. Tezde Önerilen Saha Deney Yöntemine Ait Denklemlerin Tespit Edilmesi

Uluslararası kabul görmüş, yayınlanmış ve akredite deney laboratuvarları tarafından hâlihazırda kullanımda olan standard deney yöntemleri kullanılarak bir sincap kafesli asenkron motorun kayıpları; stator bakır kayıpları, rotor kayıpları, sürtünme-ventilasyon kayıpları, demir kayıpları ve ek kayıplar olarak ayrı ayrı hesaplanabilir.

Genelde, stator bakır kayıpları akım, gerilim ve sargı direncinin ölçülmesiyle, sabit kayıplar olarak adlandırılan demir kayıpları ve sürtünme- ventilasyon kayıplarının toplamı ise boşta deney sırasında akım, gerilim, güç faktörü sargı direncinin ölçülmesiyle hesaplanabilir. Son olarak, toplam kayıpları bulmak için rotor kayıpları ve ek yük kayıpları tahmin edilmelidir. Bu temel prensip 4. Bölümde tarif edilen onaylanmış standard yöntemlerle aynıdır.

Bölüm 4'de anılan standard verimlilik hesaplama yöntemleri, doğası gereği tahmine dayalı verileri içermektedir. Rotor galvanik olarak izole olduğu için rotor kayıpları doğrudan ölçülememekte ancak statora indirgeme ile hesaplanabilmektedir. Bu açıdan, kayıp parametreleri temel olarak iki ana gruba ayrılabilir; bakır ve sabit kayıplar olan ölçülen kayıplar ve rotor ve ek kayıplardan oluşan tahmini kayıplar. Bu noktada verim tespit yönteminin doğruluğu, yüksek oranda ölçülen kayıplara bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan çeşitli yüklenme oranlarına ait 437 verim değeri üzerinden yapılan analizde, ölçülen kayıpların toplam kayıplara oranının ortalama % 73 olduğu ve tahmini kayıpların toplam kayıplara oranın ise ortalama % 27 olduğu görülmüştür.

Bu bilgiler ışığında yapılan çalışmada, endüstriyel çalışma şartlarında sincap kafesli asenkron motorların nominal ve yük altındaki verim değerini, moment sensörleri gerektirmeksizin ölçümler aracılığı ile tespit etmek adına enerji verimliliği model fonksiyonunu belirlemek için TS EN 60034-2-1:2014 standardının "kayıpların analizi yöntemine" ait fonksiyonları kullanılmış ve kayıp parametrelerine göre sincap kafesli bir asenkron motor için yeni bir verimlilik model fonksiyonu tespit edilmiştir.

İşletme şartlarında yük altında giriş gücü;

$$P_1^{Yükte}=V^{Yükte}I^{Yükte}\cos\varphi^{Yükte}\sqrt{3} \tag{5.1}$$

Nominal verim hesabında kullanılan giriş gücü;

$$P_1^{Etiket}=V^{Etiket}I^{Etiket}\cos\varphi^{Etiket}\sqrt{3} \tag{5.2}$$

İşletme şartlarında yük altında giriş gücüne oranla çıkış gücü;

$$P_2^{Yükte}=(P_1^{Yükte}/P_1^{Etiket})P_2^{Etiket} \tag{5.3}$$

İşletme şartlarında yüklenme oranı;

$$YO=P_2^{Yükte}/P_2^{Etiket} \tag{5.4}$$

Boşta çalışma deneyi giriş gücü;

$$P_0=V_0I_0\cos\varphi_0\sqrt{3} \tag{5.5}$$

Boşta çalışma deneyi stator kayıpları;

$$P_{s_0}=1.5\ I_0^2\ R_0 \tag{5.6}$$

Demir ve sürtünme ventilasyon kayıplarının toplamı olan sabit kayıplar;

$$P_c=P_0-P_{s_0}=P_{fe}+P_{stv} \tag{5.7}$$

Etiket verileri esas alınarak hesaplanan stator kayıpları;

$$P_s^{Etiket}=1.5\ I^{Etiket^2}R_{sıcak} \tag{5.8}$$

İşletme şartları verileri esas alınarak hesaplanan stator kayıpları;

$$P_s^{Yükte}=1.5\ I^{Yükte^2}R_{sıcak} \tag{5.9}$$

Motor etiketi nominal devir sayısı esas alınarak hesaplanan kayma;

$$s=((n_{senkron}-n_{etiket})/n_{senkron}) \tag{5.10}$$

Etiket verileri esas alınarak hesaplanan rotor kayıpları;

$$P_r^{Etiket}=\left(P_1^{Etiket}-P_s^{Etiket}-P_c\right)s \tag{5.11}$$

İşletme şartları verileri esas alınarak hesaplanan rotor kayıpları;

$$P_r^{Yükte}=\left(P_1^{Yükte}-P_s^{Yükte}-P_c\right)s \tag{5.12}$$

Etiket verileri esas alınarak hesaplanan ek kayıplar;

$$P_{ek}^{Etiket}=P_1^{Etiket}-P_2^{Etiket}-P_s^{Etiket}-P_r^{Etiket}-P_c \tag{5.13}$$

İşletme şartları verileri esas alınarak hesaplanan ek kayıplar;

$$P_{ek}^{Yükte}=P_1^{Yükte}-P_2^{Yükte}-P_s^{Yükte}-P_r^{Yükte}-P_c \tag{5.14}$$

Stator kayıpları düzeltme katsayısı;

$$K_t=(235+\theta_W+25-\theta_C)/(235+\theta_W) \tag{5.15}$$

Stator sargı sıcaklığının hesaplanması;

$$k=235 \qquad \theta_w=((R_{sıcak}/R_{soğuk})(k+\theta_1))-k \tag{5.16}$$

İşletme şartları verileri ve boşta deney verileri esas alınarak ilgili yüklenme oranına ait hesaplanan verim değeri;

$$\eta^{Yükte}=(P_1^{Yükte}-P_s^{Yükte}K_t-(k1P_c)-(k2P_r^{Yükte})-(k3P_{ek}^{Yükte}))/P_1^{Yükte} \tag{5.17}$$

Etiket bilgileri ve boşta deney verileri esas alınarak hesaplanan nominal verim değeri;

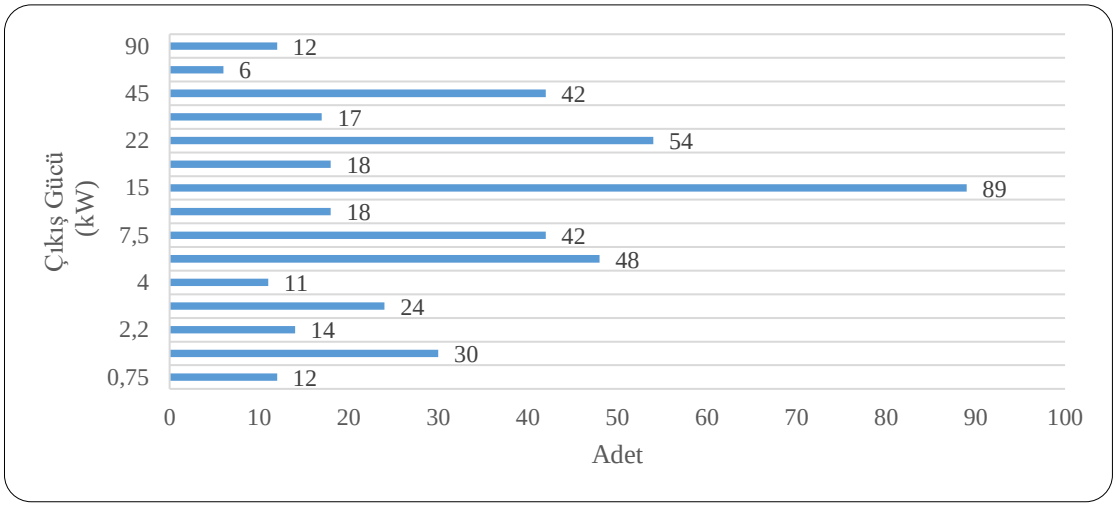
$$\eta^{Plaka}=(P_1^{Etiket}-P_s^{Etiket}K_t-(k1P_c)-(k2P_r^{Etiket})-(k3P_{ek}^{Etiket}))/P_1^{Etiket} \tag{5.18}$$

5.2.1. Verim hesaplama denkleminde bulunan katsayıların belirlenmesi

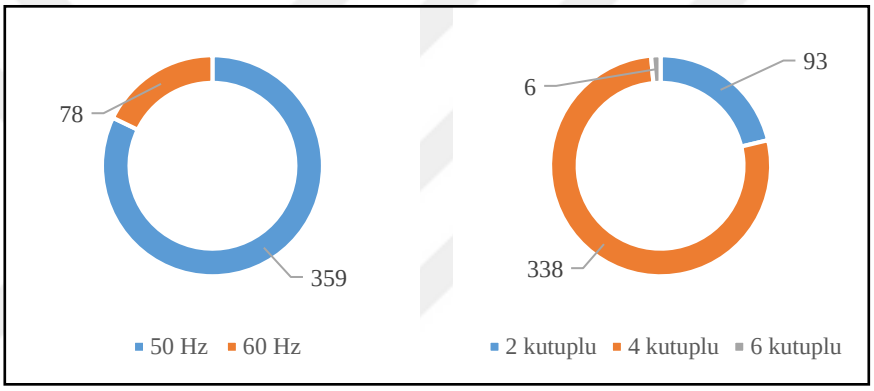
Çalışmanın dayanağı olan veri havuzu TS EN 60034-2-1:2014 standardına göre test edilen motorlara ait deney sonuçlarından oluşmaktadır. Bu verilerden yararlanarak model fonksiyonunda bulunan Denklem (5.17) ve Denklem (5.18) arasındaki ilişki tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu sayede ancak laboratuvar ortamında yapılabilecek deneyler ile bu tez çalışmasında önerilen saha deneyleri arasında, deney akışları, sayıları ve yöntemlerinin farklı olmasından ötürü oluşabilecek farklı sonuçlar en aza indirgenmeye çalışılmıştır.

Standard deney yöntemleri ile bu çalışmada önerilen saha deney yöntemi arasında özellikle sabit kayıplar, rotor kayıpları ve ek kayıpların hesaplanmasında ve bu hesaplamalar için gerekli deneylerde farklılıkların bulunmasın ötürü Denklem (5.17) ve Denklem (5.18)'de "k1,k2,k3" katsayıları sırasıyla sabit kayıplar, rotor kayıpları ve ek kayıpların katsayısı olarak bulunmaktadır.

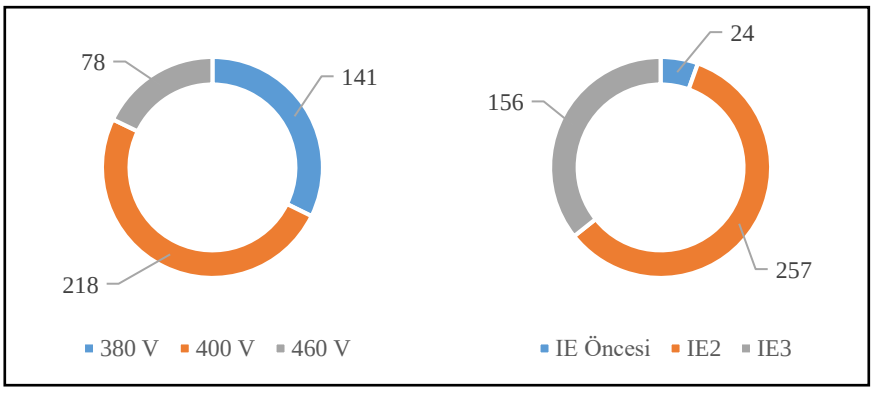
Tez önerisi için yapılan çalışmaya esas veri havuzunda, 17 farklı marka 48 farklı model toplam 86 adet motora ait çeşitli yüklenme oranlarını (0,25 / 0,50 / 0,75 / 1 / 1,10 / 1,25) temsil eden 270 IE2, 150 IE3 ve 17 diğer enerji sınıfında toplam 437 adet veri bulunmaktadır. Bu verilere dair çeşitli grafikler Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de verilmektedir.



Şekil 5.3. Veri havuzunun motor gücüne (kW) göre dağılımı grafiği



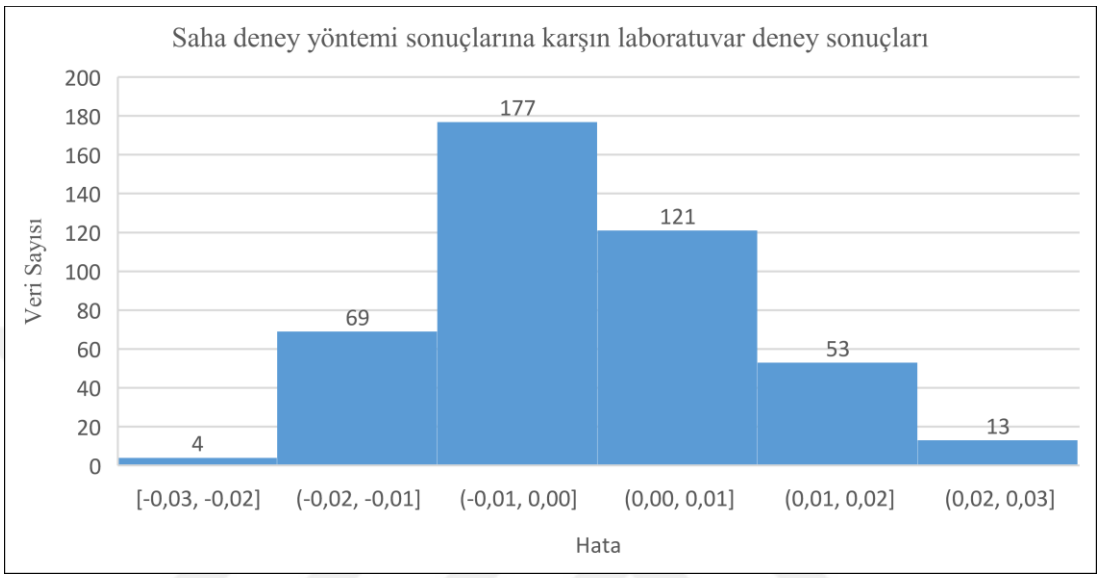
Şekil 5.4. Veri havuzunda bulunan motorların frekans ve kutup sayısı dağılımları



Şekil 5.5. Veri havuzunda bulunan motorların nominal gerilim ve enerji sınıfı dağılımları

Standard deney yöntemlerini esas alan bu laboratuvar ölçüm sonuçlarından elde edilen ham veriler ile Bölüm 5.1'de önerilen saha deney yöntemi için yeniden düzenlenmiş olan denklemler kullanılarak saha deneylerine esas verim ve kayıp değerleri tespit

edilmiştir. Önerilen saha deney yöntemi denklemlerine göre hesaplanan verim ve kayıplar ile ve laboratuvar ölçümlerinden elde edilen ve doğruluğu yüksek ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi temsil eden “k1,k2,k3” katsayıları regresyon analizi ile tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. Tezde önerilen saha deney yöntemi ile standard deney yöntemi arasındaki tüm yüklenme oranlarına ait hata dağılımı histogram grafiği

Yapılan regresyon analizi sonucunda k1, k2 ve k3 katsayıları sırasıyla (k1=0,76165; k2=1,59562; k3=0,02677) olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.6’de “önerilen saha deney yöntemi” ile tespit edilen katsayıların kullanılması ile elde edilen deney sonuçları ve standard deney yöntemi esaslı laboratuvar sonuçları arasında ortaya çıkan hata dağılım grafiği gösterilmektedir.

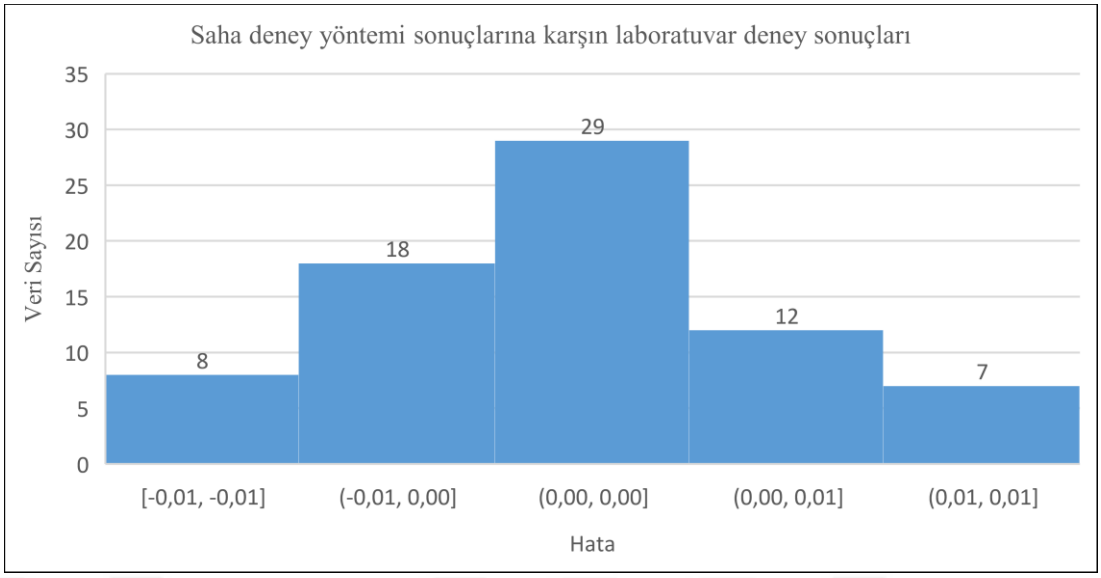
Histogram grafiğinde gösterildiği üzere elde edilen sonuçların hata dağılımının %28,14’ü ±(0,02 ile 0,01) arasında %68,42’si ±(0,01 ile 0) arasında toplamda %96,56’i ±(0,02 ile 0) arasında kalmaktadır. Ayrıca Şekil 5.7’de önerilen saha deney yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile standard deney yöntemi ile elde edilen laboratuvar sonuçları arasındaki hata dağılımının güç, enerji sınıfı, nominal gerilim, nominal frekans ve kutup sayısı gibi değişkenlerden bağımsız olarak ±0,03 bandında kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.7. Tezde önerilen saha deney yöntemi ile standard deney yöntemi arasındaki tüm yüklenme oranlarına ait hata dağılımı grafiği

Ayrıca yükte deney imkanı olmadığı durumlarda etiket verileri ve sadece boşta deney yapılarak elde edilecek sonuçların motorun nominal verimi ile olan ilişkisini tespit etmek adına Bölüm 5.1'de verilen denklemler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 5.8'de verilen histogram grafiğinde ise "önerilen saha deney yöntemi" aracılığı ile (sadece etiket verileri ve boşta çalışma deneyi verileri) elde edilen sonuçlar ile laboratuvar sonuçları arasındaki hata dağılımı gösterilmektedir.

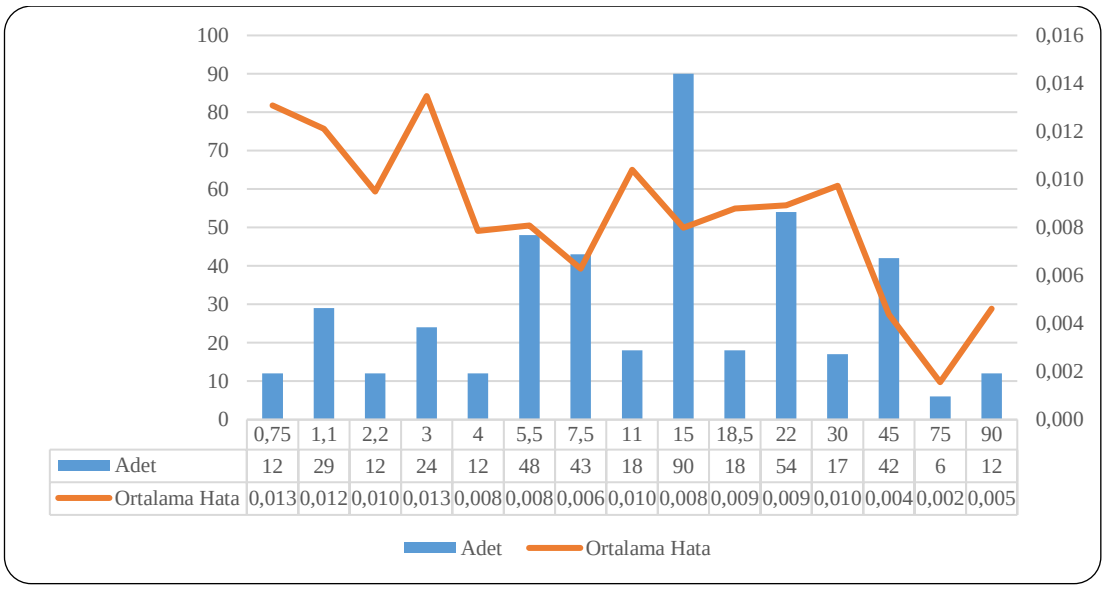
Grafikte görüleceği üzere sadece etiket bilgileri ve boşta deney sonuçları ile elde edilen nominal verim değeri ile standard deney yöntemi ile laboratuvar ortamında elde edilen nominal verim değerleri arasında ±0,01 fark bulunmaktadır. Sonuç olarak yükte ve/veya yüksüz tüm koşullarda önerilen saha deney yöntemi ile elden edilen sonuçların Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de gösterildiği üzere motorların güçleri, kutup sayıları, nominal frekans ve gerilimleri değişse dahi standard deney yöntemleri esas alınarak elde edilen laboratuvar sonuçları ile arasında oluşan hata %3 ve ±0,03 aralığında kalmaktadır.



Şekil 5.8. Sadece etiket bilgileri ve boşta deney ile elde edilen sonuçların hata dağılımı grafiği

5.2.2. Tezde önerilen saha deney yöntemi sonuçlarının motor güç ve yapısına göre hata dağılımı

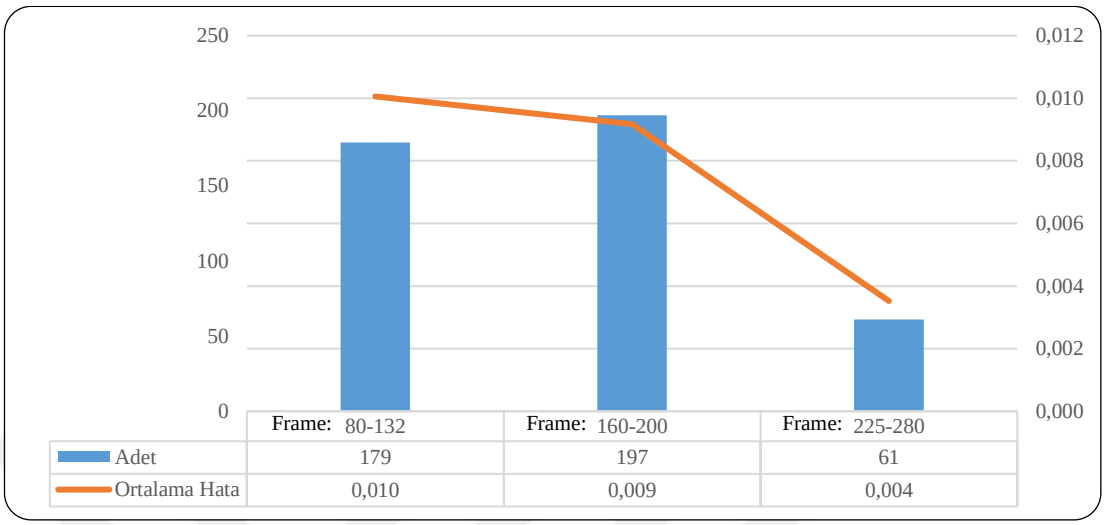
Önerilen saha deney yöntemi ile yeniden hesaplanan veri setinde bulunan güç seviyelerine göre sınıflandırılmış 437 adet çeşitli yüklenme oranlarına ait motor verim değerleri ile standard deney yöntemine göre hesaplanan verim değeri arasındaki hata dağılım histogram grafiği güç aralığı ve adet bazlı Şekil 5.9'de verilmiştir.



	0,75	1,1	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	45	75	90
Adet	12	29	12	24	12	48	43	18	90	18	54	17	42	6	12
Ortalama Hata	0,013	0,012	0,010	0,013	0,008	0,008	0,006	0,010	0,008	0,009	0,009	0,010	0,004	0,002	0,005

Şekil 5.9. Motor gücü - Ortalama hata grafiği

Motorların bir başka sınıflandırma şekli olan “Frame” dağılımına göre ortalama hata tablosu ise Şekil 5.10’de verilmiştir.



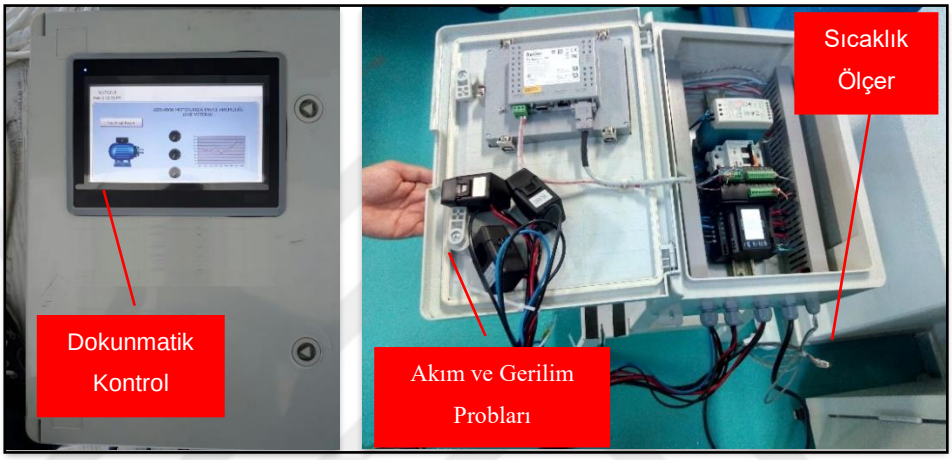
Şekil 5.10. Motor “Frame” - Ortalama hata grafiği

5.3. Mobil Deney Cihazı Tasarımı

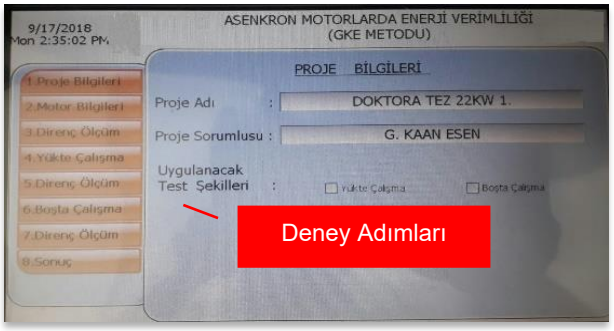
2016 yılında Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü tarafından ülkemizde motor envanteri saha çalışması sonucunda elde edilen bilgilere göre sanayide yaklaşık 4.306.622 adet 7,5 kW ve üzeri AC motorun hâlihazırda kullanılmakta olduğu tahmin edilmektedir. Bu motorların %99 güncel mevzuat gerekliliklerinin altında yani IE3 verim seviyesinden düşük sınıfına sahiptir. Bu durumda önümüzdeki süreçte motor dönüşüm ve yenileme işlemlerinin oldukça sık yaşanacağı ve daha ekonomik saha deney yöntemlerinin laboratuvar deneylerine destek olarak önem arz edeceği fikri tez çalışmasına da temel oluşturmuştur.

Enerji Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı gibi kurumlar tarafından hâlihazırda dönüşüm ve değişim adına aksiyon planları hazırlanmaktadır. Değişme tabi tutulması istenilen motorların tamamının laboratuvar imkânları ile test edilmesi ne ekonomik parametreler ne de zaman açısından mümkün değildir. Bu bağlamda teze esas “önerilen saha deney yöntemi” endüstriyel tesislerde, KOBİ’lerde, asenkron motor kullanan tüm alanlarda özellikle işletme koşullarında enerji verimliliği ölçümü/tahmini yapma adına kullanılır kılmanın tezin bir başka çıktısı olarak önem arz ettiği düşünülmüştür. Önerilen saha deney yöntemi endüstriyel ortamda hazır bulunabilecek ölçüm cihazları ile uygulanabileceği

gibi tüm ölçüm parametrelerini ölçebilen tek bir özelleşmiş deney cihazı ile de uygulanabilmesi metodun yaygınlaşması adına kolaylık sağlayacağını göstermektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin ölçüm değerlerine ihtiyaç duyduğu; akım, gerilim, güç faktörü, frekans, direnç, sıcaklık gibi değişkenleri ölçebilen bir deney cihazının prototip amaçlı üretilmesi adına kuruluşlar ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Nihayetinde Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'da fotoğrafları verilen mobil deney cihazı hazırlanmıştır.



Şekil 5.11. Mobil deney cihazı fotoğrafları



Şekil 5.12. Mobil deney cihazı kumanda paneli

Mobil deney cihazı tezde önerilen saha yönteminde tanımlı deney akışına göre kullanıcıyı yönlendirmektedir. Kullanıcı ara yüzü ergonomik olması adına dokunmatik panelden oluşmaktadır. Deney esnasında akım, gerilim, güç faktörü, frekans, ortam sıcaklığı, sargı sıcaklığı ve direnç değerlerini kaydetmektedir. Deney süresini takip etmek adına zaman sayacı mevcuttur. Ayrıca deney sonucunda elde edilen ham veriler ve hesaplamalar verim değeri dâhil olmak üzere kullanıcıya bir tablo halinde gösterilmektedir.

5.4. Tez Çalışmasında Önerilen Saha Deney Yöntemi Üzerine Deneysel Doğrulama Çalışmaları

Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin doğrulanmasına dair deneysel çalışma amacıyla etiket bilgileri Tablo 5.2'de verilen 2 kutuplu 7,5 kW IE3 bir sincap kafesli asenkron motor numune olarak seçilmiştir. Deneyde kullanılan numune motora ait laboratuvar ölçüm sonuçları, model fonksiyonunun belirlendiği veri havuzu ile ilişkili değildir. Bölüm 5.1'de tarif edilen deney yöntemine göre deneyler gerçekleştirilmiştir.

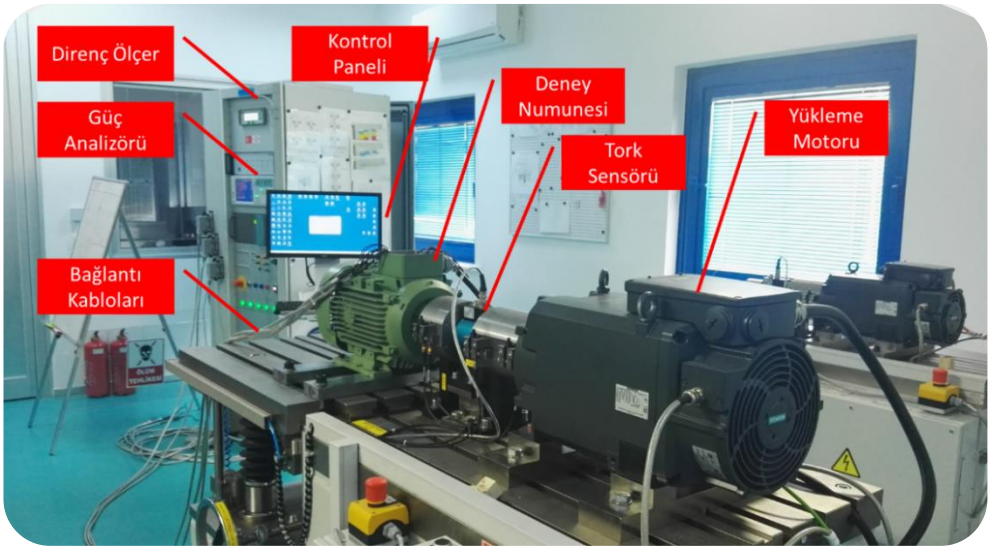
Tablo 5.2. Deneysel çalışma numune etiket verileri tablosu

Anma Çıkış Gücü	7,5 kW	Nominal Devir	2930 rpm
Nominal Gerilim	380 V	Nominal Moment	24,5 Nm
Nominal Frekans	50 Hz	Nominal Akım	13,7 A
Çalışma Sınıfı	S1 (Sürekli)	İzolasyon Sınıfı	IP-55, F
Güç Faktörü	0,92	IE Sınıfı	90,1 - IE3
Verim %50	87,9	Verim %75	89,7

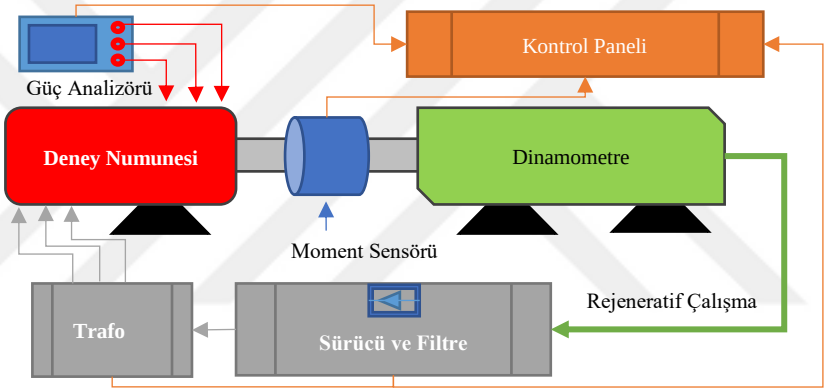
5.4.1. Doğrulama deneylerinin yapıldığı elektrik motoru deney laboratuvarı

TSE Elektrik Motorları Deney Laboratuvarı Mayıs 2015 tarihinde, TSE Marmara Bölge Koordinatörlüğü Elektroteknik Laboratuvarı Gebze Müdürlüğü uhdesinde tesis edilmiştir. TÜRKAK tarafından akredite edilmiş olan Laboratuvar hâlihazırda 0,18-90 kW güç aralığındaki sincap kafesli asenkron motorların TS EN 60034-2-1 kapsamında enerji verimliliği ve TS EN 60034-1 kapsamında performans deneylerinin yapılabildiği Türkiye'deki ilk tarafsız ve tek akredite laboratuvardır. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de laboratuvara ait fotoğraf ve çalışma ilkesine ait şema bulunmaktadır.

Önerilen saha deney yöntemine ait verimlilik denkleminde mevcut olan katsayıların bulunması amacıyla yapılan regresyon analizinde kullanılan veri tabanı, söz konusu TSE laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar üzerine inşa edilmiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar, laboratuvarlar arası karşılaştırma çevrimi ve diğer doğrulama deneyleri de, aynı laboratuvar uhdesinde gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarın beyan etmiş olduğu genişletilmiş ölçüm belirsizliği değeri ise %0,3 olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.13. TSE elektrik motoru deney laboratuvarı fotoğrafı



Şekil 5.14. Rejeneratif dinamofren sistemi temel çalışma prensibi şematik gösterimi

5.4.2. Önerilen saha deney yöntemine göre elde edilen deneysel sonuçlar

Önerilen saha deney yöntemine göre Tablo 5.2'de etiket bilgileri verilen sincap kafesli asenkron motor üzerinde Bölüm 5.1'de tarif edilen deney akışına göre Bölüm 5.2.1'de verilen eşitlikler kullanılarak yapılan deneye ait sonuçlar verilmektedir.

Soğuk direnç deneyi:

- Ortam sıcaklığı $\theta_1 = 22{,}9°C$
- Faz-Faz arası direnç değeri $R_{soğuk} = 0{,}712\ \Omega$

İşletme şartlarında giriş gücü ölçümü:

- Numune 5 farklı işletme durumunu temsil edecek şekilde dinamo fren sistemi vasıtasıyla yüklenmiştir.

- Tüm yüklenme noktalarının ayrı ayrı ölçüm değerleri Tablo 5.3'de verilmiştir. Buna göre %61 ile %100 oranında yük noktaları mevcuttur.

Tablo 5.3. İşletme şartlarında yükte çalışma deney verileri tablosu

Değişken	Etiket	Değişken	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
V^{Etiket} V	380,00	$V^{Yükte}$ V	380,15	379,60	379,80	379,80	379,60
f^{Etiket} Hz	50,00	$f^{Yükte}$ Hz	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
I^{Etiket} A	13,70	$I^{Yükte}$ A	13,80	9,02	10,16	11,39	12,61
$\cos\varphi^{Plaka}$	0,92	$\cos\varphi^{Yükte}$	0,91	0,851	0,874	0,891	0,902
P_1^{Etiket} W	8296	$P_1^{Yükte}$ W	8269	5047	5841	6676	7478
Nominal Giriş Gücüne Göre Yükleme Oranı			100%	61%	70%	80%	90%
P_2^{Etiket} W	7500	$P_2^{Yükte}$ W	7476	4563	5281	6036	6783

Etiket değerleri kullanılarak giriş gücü tespiti:

- Tablo 5.2'de verilen etiket değerleri ve Denklem (5.2) kullanılarak giriş gücü tespit edilmiştir. P_1^{Etiket}= 8.296 W olarak hesaplanmıştır.

Sıcak direnç değerinin belirlenmesi:

- Ölçülen sargı sıcaklığına göre deneysel olarak hesaplanan sıcak direnç değeri θ_w= 83,5 °C, $R_{sıcak}$ = 0,855 Ω
- Sargı sıcaklığının θ_w= 80 °C olduğu kabul edilerek hesaplanarak tespit edilen sıcak direnç değeri. θ_w= 80 °C, $R_{sıcak}$ = 0,869 Ω

Boşta çalışma deneyi:

- Boşta çalışma ölçülen faz-faz arası gerilimi U_0= 380,15 V
- Boşta çalışma hat akımı I_0 = 3,84 A
- Boşta çalışma güç faktörü $\cos\varphi_0$ =0,129
- Boşta çalışma ölçülen giriş gücü P_0 =326 W
- Boşta çalışma sonrası ölçülen faz-faz arası direnç R_0 = 0,808 Ω

Verilerin derlenmesi ve verim hesabı:

- Bölüm 5.1'de tarif edilen deney akışına göre elde edilen ölçüm verileri Bölüm 5.2.1'de verilen denklemlerde kullanılarak kayıplar hesaplanmış ve Tablo 5.4'de özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Önerilen saha deney yöntemşne göre gerçekleştirilen deneye ait hesaplama tablosu

Değişken	Etiket	Değişken	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
V^{Etiket}	380,00	$V^{Yükte}$	380,15	379,60	379,80	379,80	379,60
f^{Etiket}	50,00	$f^{Yükte}$	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
I^{Etiket}	13,70	$I^{Yükte}$	13,80	9,02	10,16	11,39	12,61
$\cos\varphi^{Etiket}$	0,92	$\cos\varphi^{Yükte}$	0,91	0,851	0,874	0,891	0,902
P_1^{Etiket}	8296	$P_1^{Yükte}$	8269	5047	5841	6676	7478
Nominal Giriş Gücüne Göre Yükleme Oranı			100%	61%	70%	80%	90%
P_2^{Etiket}	7500	$P_2^{Yükte}$	7476	4563	5281	6036	6783
P_c	326	P_c	326	326	326	326	326
K_t	1,000	K_t	0,983	0,983	0,983	0,983	0,983
P_s^{Etiket}	241	$P_s^{Yükte}$	240	103	130	164	201
P_r^{Etiket}	180	$P_r^{Yükte}$	180	108	126	144	162
P_{ek}^{Etiket}	48	$P_{ek}^{Yükte}$	47	-53	-22	6	6
η^{Etiket}	90,62%	$\eta^{Yükte}$	90,61%	89,66%	90,09%	90,37%	90,53%

Önerilen saha deney yöntemi ile birbirine benzeyen 2 toplam 3 farklı verim tespiti hesaplaması yapılabilmektedir. Bu farklı koşullara şu şekilde sıralanabilir;

Durum-1 (Nominal & Yüklenme Noktası):

- Elde edilen veriler içerisinde işletme şartları altında herhangi bir yüklenme oranında, önerilen saha deney yöntemine göre yalnızca bir ölçüm sonucu varsa, nominal verim değeri ve ilgili yükleme noktasına ait verim değerini belirlemek için etiket değerleri, yükleme noktası değerleri ve boşta test sonuçları kullanılmalıdır. Bu durumda motora dair nominal verim değeri, işletme şartlarında verilerin toplanmış olduğu andaki yüklenme oranına ait verim değeri hesaplanabilecektir.

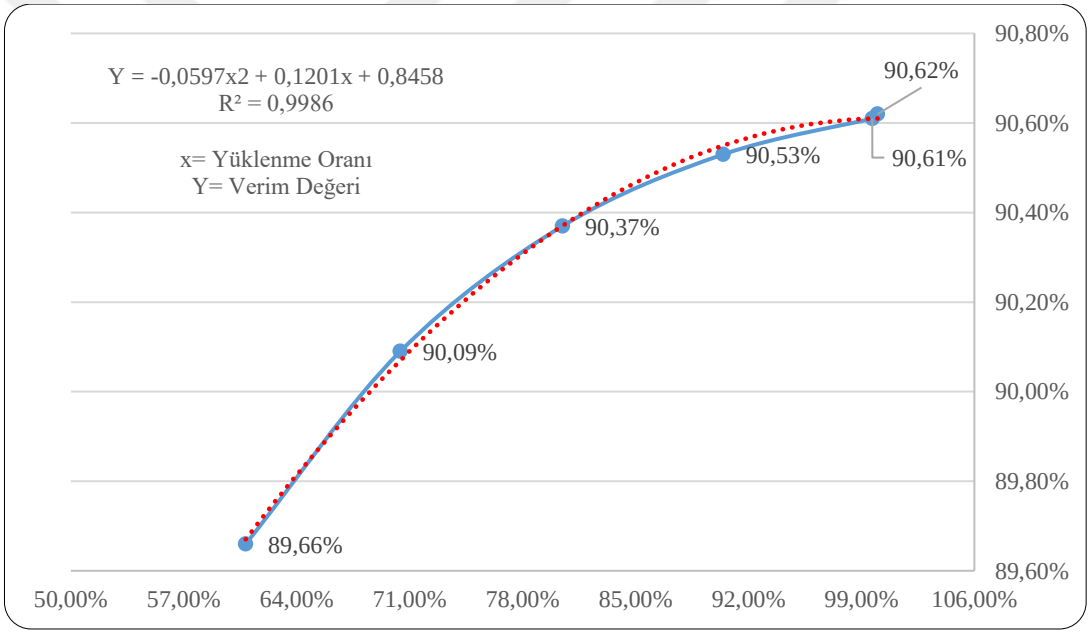
Durum-2 (Nominal):

- Elde edilen verile içerisinde işletme şartlarında yük altında deney imkânı mevcut değilse, nominal verimi belirlemek için sadece boşta test sonuçları ve etiket değerleri kullanılabilir. Bu durumda herhangi bir sıcak direnç ölçümü yapılmayacaktır dolayısıyla, sıcak direnç değerini tahmin etmek için sargı sıcaklığı 80°C ve stator kayıpları düzeltme katsayısı Kt=1 alınmalıdır.

Durum-3 (Nominal & Yüklenme Noktası):

- Elde edilen verile içerisinde işletme şartlarında önerilen saha deney yöntemine göre birden fazla yükleme oranına ait ölçüm sonucu mevcutsa, nominal verim ve yükleme noktası verimliliğini belirlemek için etiket değerleri, yükleme noktası değerleri ve boşta test sonuçları kullanılmalıdır.

Durum-1'den farklı olarak, bu seçenekte her bir yüklenme oranına ait hesaplanan verim değerleri ile etiket değeri ile elde edilen verim değerini içeren Şekil 5.15'de örneği verilen bir eğri uydurulmalıdır. Yükleme oranına karşı verim eğrisinin hazırlanmasından sonra, tekrar nominal verimlilik değeri veya herhangi bir diğer yükleme noktası verimlilik değeri elde edilen eğriden kolayca tahmin edilebilir.



Şekil 5.15. Yüklemme oranına karşın verim fonksiyonu grafiği

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi:

- Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin üç farklı durumu için yapılan analizde Tablo 5.5'de verilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ancak sıcak direnç değerinin tespit edilmesinde tahmin yerine ölçüm yapılmasının sonucun belirsizliğini azaltıcı yönde etkisi olacağı da elde edilen hesaplamalardan çıkarılabilecek sonuç olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 5.5. Tezde önerilen saha deney yöntemine göre 3 farklı durumun karşılaştırma tablosu

	Durum-1	Durum-2	Durum-3
η %	90,6	90,5	90,6

Uluslararası kabul görmüş standard deney yöntemleri ve tezde önerilen saha deney yöntemi arası karşılaştırma:

- Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin iki farklı durumu ile uluslararası kullanımda olan IEC, CSA ve IEEE standard deney metotlarına göre gerçekleştirilen laboratuvar deney sonuçlarının karşılaştırıldığı Tablo 5.6'den görüleceği üzere önerilen saha deney yöntemi verim değerleri ile akredite laboratuvarın standard deney yöntemi sonuçları arasındaki fark, regresyon analizi sonucu elde edilen ve tezde önerilen saha deney yönteminin ± 0,03 toleransını doğrulayıcı nitelikte olduğu ifade edilebilir [66, 67].

Tablo 5.6. Önerilen saha deney yöntemi ile standard yöntemler arası karşılaştırma tablosu

IEC %	CSA %	IEEE %	Önerilen Saha Deney Yöntemi (Yüklenme Testi İle %100) Durum-1 %	Önerilen Saha Deney Yöntemi (Etiket Değerleri İle) Durum-2 %
90,6	90,4	90,5	90,6	90,5

5.4.3. Üretici laboratuvarlarda yapılan deneysel ölçümler ve sonuçları

Tezde önerilen saha deney yöntemi ve hesaplama adımlarının "doğrulanması" adına bir diğer çalışma da üretici laboratuvarında yapılacak karşılaştırma deneyleri olarak planlanmamış ve gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Türkiye'de üretim yapan 4 farklı üretici laboratuvarından 13 farklı motora ait TS EN 60034-2-1:2014 standard deney yöntemi ve "önerilen saha deney yöntemine" göre deney sonuçları ve ham verileri elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Üretici laboratuvarlarında teste tabi tutulan 13 farklı sincap kafesli asenkron motora ait veriler ve tezde önerilen saha deney yöntemine göre yapılan hesaplamalara dair bilgiler Tablo 5.7'de, IEC ve önerilen saha deney yöntemine göre gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının özeti şeklinde gösterilmektedir. Deney sonuçları önerilen saha deney yöntemine dair daha önceden verilen ±0,03 sınır koşullarını doğrular

niteliktedir. Bu doğrulama adımı sonucunda önerilen saha deney yönteminin değişen güç, kutup, gerilim, frekans koşullarına bağlı kalmaksızın öngörülen hata limitleri içerisinde sonuç üretmiş olduğunu ifade edebiliriz.

Tablo 5.7. Üretici laboratuvarları deney sonuçları tablosu

Laboratuvarlar	Laboratuvar 1			Laboratuvar 2			Laboratuvar 3				Laboratuvar 4		
Deney Sayıları	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
Etiket Gücü (kW)	90	45	7,5	11	7,5	18,5	22	11	30	7,5	45	55	30
Etiket Frekans (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	50	50
Etiket Gerilim (V)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	460	400	400
Etiket Nominal Akım (A)	158	80	15,3	21,6	13,7	35,5	42,2	22,9	54,6	13,6	71	100,5	53,1
Etiket Güç Faktörü (Cos(ϕ))	0,86	0,87	0,78	0,8	0,89	0,82	0,81	0,77	0,85	0,87	0,84	0,84	0,88
Etiket Devir (rpm)	1485	1470	1465	1465	2925	970	1478	975	1482	2920	1780	1488	2959
Deney Ortam Sıcaklığı (°C)	27	22	31	22,7	31	12,4	19,4	23	25,1	22,3	26,2	23,5	22,9
Yüklenme Oranı (YO) %	75	79	75	75	74	75	50	49	49	50	75	50	116
Laboratuvar tarafından ölçülen nominal verim%	95,2	93,0	90,5	91,4	88,1	90,4	92,8	91,2	94,8	91,1	94,8	94,4	92,4
Yük oranına ait laboratuvar tarafından ölçülen verim%	95,2	93,3	90,2	91,8	89,5	91,6	93,2	91,2	94,8	91,9	94,8	94,0	92,2
Saha deney yöntemi ile hesaplanan yüklenme oranına ait verim % değeri	95,0	92,8	89,1	91,3	90,0	90,8	92,5	88,5	94,2	90,1	95,8	94,4	92,9
Saha deney yöntemi ile hesaplanan nominal verim % değeri	95,0	93,0	89,6	91,7	90,3	90,7	92,9	89,4	94,3	90,2	96,1	95,4	92,9
Laboratuvar sonuçları ile saha deney yöntemi sonuçları arasında yük oranına ait verim farkı	0,002	0,005	0,011	0,005	0,005	0,008	0,007	0,026	0,006	0,018	0,010	0,004	0,007
Laboratuvar sonuçları ile saha deney yöntemi sonuçları arasında nominal verim farkı	0,002	0,001	0,009	0,003	0,022	0,003	0,001	0,018	0,005	0,009	0,013	0,010	0,005

5.4.4. Önerilen saha deney yöntemi "durum-2" doğrulaması

Tezde önerilen saha deney yönteminin bir diğer önermesi olan ve depo koşulları gibi yükte deney imkânı bulunmayan durumlarda verim tespit etme amacıyla kullanılabilecek sadece motor etiket verileri ve boşta çalışma deney sonuçları esas alınarak elde edilen verim değeri ile TS EN 60034-2-1:2014 standard deney metodu ile elde edilen 13 farklı motora ait verim değerleri karşılaştırılmış ve tezde önerilen saha deney yönteminin 2. durumuna dair analiz yapılmıştır.

Deney yapılan 13 farklı sincap kafesli asenkron motora ait veriler ve hesaplamalara dair bilgiler Tablo 5.8'de IEC ve önerilen saha deney yöntemi "Durum-2"'e göre gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının özeti şeklinde gösterilmektedir. Bu çalışmada da deney sonuçları önerilen saha deney yöntemine dair daha önceden verilen ±0,03 sınır koşullarını doğrular niteliktedir.

Tablo 5.8. Boşta deney ve etiket değerli ile elde edilen verim değerleri tablosu

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Etiket Gücü (kW)	1,5	37	55	0,75	1,1	0,75	3	90	15	22,0	3	1,5	0,75
Etiket Frekans (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	60	60	50	60	60	60
Etiket Gerilim (V)	400	400	400	400	400	400	400	380	380	400	460	460	460
Etiket Nominal Akım (A)	3,62	64	93,3	1,75	2,4	1,6	6,7	148,5	31,6	42	5,8	2,99	1,46
Etiket Güç Faktörü (Cos(ϕ))	0,75	0,92	0,87	0,76	0,78	0,82	0,76	0,94	0,77	0,81	0,73	0,73	0,76
Etiket Devir (rpm)	940	2965	2981	2900	2890	2860	1435	3580	1774	1475	1763	1750	1752
TS EN 60034-2-1:2014 standard deney yöntemi ile ölçülen nominal verim % değeri	79,4	92,1	95,4	82,2	82,8	73,1	84,3	94,5	93,0	93,6	88,9	86,8	85,4
Saha deney yöntemi ile elde edilen verim % değeri	78,8	94,1	96,2	81,4	82,2	74,1	83,5	96,4	93,2	94,2	89,3	86,0	84,5
IEC 60034-2-1:2014 standard deney yöntemi ile saha deney yöntemi sonuçları arasında nominal verim farkı	0,006	0,020	0,008	0,009	0,006	0,010	0,008	0,019	0,001	0,006	0,005	0,008	0,008

5.4.5. Mobil deney cihazı ile elde edilen sonuçlar

Bölüm 5.3'de detayları verilen mobil deney cihazı ile tezde önerilen saha deney yönteminin doğrulanması adına Tablo 5.9'de etiket bilgileri verilen asenkron motor üzerinde IEC 60034-2-1:2014 standardı ve önerilen saha deney yöntemi "Durum-2" sadece etiket bilgileri ve boşta deney sonuçları esas alınarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları Tablo 5.10'da verilmiştir. Bu sayede laboratuvar şartları dışında ve endüstriyel ortamda rahatlıkla erişilebilir cihazlar ile elde edilen sonuçların hesaplanan belirsizlik içerisinde kalma durumu tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 5.9. Deney numunesi etiket bilgileri tablosu

Anma Çıkış Gücü	22 kW	Nominal Devir	1475 rpm
Nominal Gerilim	380 V	Nominal Moment	143 Nm
Nominal Frekans	50 Hz	Nominal Akım	42 A
Çalışma Sınıfı	S1 (Sürekli)	İzolasyon Sınıfı	IP-55, F
Güç Faktörü	0,86	IE Sınıfı	% 93 - IE3
IEC 60034-2-1:2014 Standardına göre yapılan deney sonucu nominal verim değeri %91,9			

Tablo 5.10. Mobil deney cihazı ile elde edilen sonuç tablosu

Değerler	Deney 1	Deney 2	Deney 3
P_1^{etiket} (W)	23.773,44	23.773,44	23.773,44
P_2^{etiket} (W)	22.000	22.000	22.000
f (Hz)	50	50	50
V_0 (V)	383,113	382,876	383,598
I_0 (A)	12,38	12,44	12,41
$\cos \varphi_0$	0,092	0,091	0,092
P_0 (W)	755,78	750,72	758,57
P_{s0} (W)	48,42	48,93	48,73
P_c (W)	707,36	701,79	709,85
P_s^{etiket} (W)	644,27	644,27	644,27
P_r^{etiket} (W)	373,70	373,79	373,66
P_{ek}^{etiket} (W)	48,11	53,59	45,67
$R_{soğuk}$ (Ω)	0,201747	0,201747	0,201747
θ_W (°C)	80	80	80
θ_1 (°C)	26	26	26
K_t	1	1	1
$R_{sıcak}$ (Ω)	0,243487	0,243487	0,243487
$R_{boşta}$ (Ω)	0,210623	0,210803	0,210923
IEC 60034-2-1:2014 standard deney metodu ile elde edilen nominal verim % değeri	91,91	91,91	91,91
Saha deney yöntemine göre mobil deney cihazı ile elde edilen nominal verim % değeri	92,56	92,58	92,55
Saha deney yöntemine göre mobil deney cihazı ile elde edilen nominal verim ile IEC 60034-2-1:2014 standard deney metodu ile elde edilen nominal verim değeri farkı	0,0065	0,0066	0,0064

5.4.6. Doğrulama sonuçlarının değerlendirilmesi

Önerilen saha deney yöntemine dair yapılan çalışmalarda birden fazla yönden doğrulama süreci öngörülmüştür. Geçerli kılma adına yapılan doğrulma işlemlerinin temel referans değeri 86 adet çeşitli güç, frekans, gerilim ve kutup sayısında motora ait laboratuvar ortamında elde edilen (437 yüklenme oranına ait) verim değeri üzerinde tezde önerilen saha deney yönteminin düzeltme katsayılarını tespit etmek amacıyla yapılan regresyon analizi sonucu elde edilen hata değeriydi. Çalışmada elde edilen sonuç ölçülen verim değeri ile tahmin edilen verim değeri arasında ±0,03 ve/veya daha az hatanın metodun geçerli kılınması adına elzem olduğunu ortaya koymaktaydı.

Yapılan ilk doğrulama çalışmasında 2 kutuplu 7,5 kW gücünde bir asenkron motorun CSA, IEEE ve IEC yöntemleri ile elde edilmiş verim sonuçları ile "önerilen saha deney yöntemi" ile elde edilen verim sonuçları arasında ortaya çıkan hata sonuçları tespit edilmiş ve yayınlanmıştır [5]. İkinci olarak Türkiye'de bulunan 4 farklı üretici laboratuvarında 13 farklı motora IEC standard yöntem ve önerilen saha deney yöntemine göre deneyler yapılmış sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üçüncü aşamada ise metodun bir diğer önermesi olan "sadece boşta deney verilerini kullanarak nominal

verim tahmini" bölümünü doğrulamak adına 13 farklı motora "önerilen saha deney yöntemi" uygulanarak IEC deneyi sonrası elde edilen verim değeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Son olarak prototip olarak üretilen mobil deney cihazı ile 4 kutuplu 22 kW gücünde bir asenkron motor üzerinde 3 adet deney gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir.

Yukarıda anlatılan tüm doğrulama süreçleri sonunda, laboratuvar deneyleri ile "önerilen saha deney yöntemi" ile elde edilen verim değerleri arasındaki hatalar %3 ve ±0,03 bandı içerisinde kalmaktadır. Geçerli kılma çalışmaları ve ölçüm belirsizliği hesaplamaları sonrası "önerilen saha deney yöntemi" ile yapılacak deneylerde, sonuçların yorumlanmasında ±0,03 sınır koşullarını ve % 0,31 olarak hesaplanan ölçüm belirsizliği değerini dikkate alarak verim değeri tespit edilmeye çalışılan asenkron motorun verimi hakkında bir tespitte bulunulabilir.

5.5. Ölçüm Belirsizliği Gerekliliği, Temel Bileşenleri ve Hesabı

"Ölçüm Belirsizliği " elde edilen bilgiye dayanılarak ölçülene atfedilen büyüklük değerlerinin dağılımını niteleyen, negatif olmayan sayısal parametre olarak tanımlanmaktadır [68]. Uluslararası kabul görmüş ölçüm yöntemleri dâhil sincap kafesli asenkron motorlarda yapılan enerji verimliliği ölçümleri de belirsizlik barındırır [69]. Ölçüm belirsizliği, düzeltmeler ve ölçüm standardına atanmış büyüklük değerleri gibi sistematik etkilerden kaynaklanan bileşenler ile tanımsal belirsizlik bileşenini içerir. Bazen öngörülen sistematik etkilerin düzeltilmesi yerine ilgili ölçüm belirsizliği bileşenleri dâhil edilir. Parametre, örneğin, standart ölçüm belirsizliği olarak adlandırılan standart sapma (ya da onun belirli katları) veya belirli kapsam olasılığına sahip olan aralığın yarı genişliği olabilir.

Ölçüm belirsizliği genel olarak birçok bileşeni içerir. Bu bileşenlerin bazıları, ölçüm serilerinden elde edilen büyüklük değerlerinin istatistiksel dağılımını kullanan A tipi ölçüm belirsizliği hesabı yöntemiyle belirlenir ve standart sapma ile nitelendirilir. Ayrıca tekrarlanabilirlik ve yenidenüretilebilirlik değerleri de A tipi hesaplamada değerlendirilir [70]. B tipi ölçüm belirsizliği hesabı yöntemiyle belirlenen diğer bileşenler de, tecrübe ve diğer bilgilere dayalı olasılık yoğunluk fonksiyonlarından elde edilen standart sapma ile nitelendirilebilir.

Genel olarak, eldeki bilgiler ışığında, ölçüm belirsizliğinin, ölçülene atfedilen belirli bir büyüklük değeri ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu büyüklük değerindeki bir değişiklik, belirsizlik değerinde de değişikliğe neden olur [71, 72].

Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin düşük belirsizlikte kararlı sonuç üretebilmesi için ölçüm yöntemi kadar ölçüm cihazlarının da doğruluk sınıfı önemlidir. Doğruluk sınıfı belirli çalışma koşulları altında ölçüm hatalarını veya cihazın belirsizliklerini belirli sınırlar içerisinde tutan metrolojik şartları sağlayan ölçüm cihazlarının veya ölçüm sistemlerinin sınıfı olarak tanımlanırsa önerilen saha deney yöntemde kullanılacak ölçme aletleri, 0,2'lik bir doğruluk sınıfına eşdeğer olması önerilmektedir. Bu sayede sonuçların bu çalışmada belirtilen ölçüm belirsizliği içerisinde kalmasını sağlayabilecektir [59, 68].

5.5.1. Varyans ve standart sapma

Olasılık kuramı ve istatistik bilim dallarında Varyans bir rassal değişken, bir olasılık dağılımı veya örneklem için istatistiksel yayılımın, mümkün bütün değerlerin beklenen değer veya ortalamadan uzaklıklarının karelerinin ortalaması şeklinde bulunan bir ölçüdür. Ortalama bir dağılımın merkezsel konum noktasını bulmaya çalışırken, Varyans değerlerin ne ölçekte veya ne derecede yaygın olduklarını tanımlamayı hedef alır. Varyans için ölçülme birimi orijinal değişkenin biriminin karesidir [73]. Denklem (5.19) veya Denklem (5.20)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir. Standard sapma ise varyansın pozitif karekökü ile elde edilir ve Denklem (5.21) 'de gösterildiği gibi hesaplanabilir,

$$\sigma^2=\left(\sum_{i=0}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right)/(n-1) \tag{5.19}$$

$$\sigma^2=\int_{-\infty}^{+\infty}(x-\bar{x})^2\,p(x)dx \tag{5.20}$$

$$S=\sqrt{\sigma^2}=\sqrt{\left(\sum_{i=0}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right)/(n-1)} \tag{5.21}$$

5.5.2. Belirsizlik bütçesi

Belirsizlik bütçesi ölçüm belirsizliğini, bileşenlerini, bunların hesaplanmasını ve kombinasyonlarını içeren beyan olarak tanımlanır. Bir belirsizlik bütçesi, ölçüm

modelini, bu modeldeki büyüklükler ile ilgili ölçüm belirsizliklerini ve tahmini değerlerini, kovaryansları, uygulanan olasılık yoğunluk fonksiyonlarının tipini, serbestlik derecelerini, ölçüm belirsizliği hesabının tipini ve kapsam faktörlerini içermelidir [74].

5.5.3. Genişletilmiş belirsizlik

Genişletilmiş belirsizlik, ölçülen bir niceliğin beklentiye göre ölçüm sonucu değerlerinin büyük bir kısmını içeren aralık olarak tanımlanmaktadır. Bileşik standart ölçüm belirsizliğinin birden büyük bir faktör ile çarpımıdır [75]. Standart sapma olarak ifade edilen ölçüm belirsizliği [73].

5.5.4. A Tipi değerlendirme metodu

Ölçüm belirsizliği hesabı yapılması istenen sisteme dair bir dizi gözleme dayanan istatistiksel analiz ile yapılan ölçüm belirsizliği değerlendirme metodudur. Tahmini giriş büyüklüklerine bağlı olarak, tekrarlanabilir ve gözleme dayalı istatistiki yöntemlerle Denklem (5.22), Denklem (5,23) ve Denklem (5.24) ile elde edilir. A tipi değerlendirme metodu genellikle kapalı ve karmaşık sistemlerde veya birleşik belirsizlik hesabında kullanılır [76].

Ölçüm belirsizliği;

$$u_i = s/\sqrt{n} \tag{5.22}$$

Aritmetik ortalama;

$$\bar{x}_i = (1/n) \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{5.23}$$

Deneysel standard sapma;

$$s = \sqrt{\left(\sum_{i=0}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \right)/(n-1)} \tag{5.24}$$

5.5.5. B Tipi değerlendirme metodu

Bir dizi gözleme dayanan istatistiksel analiz haricindeki imkânlar ile yapılan ölçüm belirsizliği değerlendirme metodu. Teknik ve bilimsel verilerden elde edilen belirsizlik

türüdür. Başlıca hesaplama girdileri; kalibrasyon sertifikalarındaki bilgiler, kullanım kılavuzları, literatürler ve üreticinin beyanlarıdır.

Belirsizlik hesabı yapılması istenilen sistem Denklem (5.25)'de belirtilen bir fonksiyon ile tanımlanırsa, sisteme ait ölçüm belirsizliği Denklem (5.26)'ya göre hesaplanır,

$$y=f(x_1,x_2,\ldots,x_{(n-1)},x_n) \tag{5.25}$$

$$U_c(y)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\partial x_i/\partial y)^2}\, u(x_i)^2 \tag{5.26}$$

5.5.6. Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin ölçüm belirsizliğinin hesaplaması

Önerilen saha deney yöntemi için genel bir ölçüm belirsizliği hesabı yapabilmek adına öncelikle Bölüm 5.5.2'de tarif edilen belirsizlik bütçesi ve kullanılan cihazlara dair belirsizlik katkıları bilinmelidir. Ancak, yöntemi kullanacak kullanıcıların hangi sınıfta cihaz kullanacakları dolayısıyla cihazlardan gelecek belirsizlik katkıları şimdiden bilinemez. Ayrıca deney yöntemimin uygulamasında görevli personel, ortam şartları ve diğer etkenlerde şimdiden kestirilemeyecektir. Bu durumda sadece önerilen saha deney yöntemini kullanacaklar için belirli şartlar altında genel bir ölçüm belirsizliği hesabı yapılarak sonuç verilebilir. Referans bir belirsizlik hesabı tezde önerilen saha deney yönteminin kullanılması durumunda yapılacak olası belirsizlik hesabına yardımcı olacaktır.

Yapılan çalışmaya esas veri tabanının oluşturulduğu laboratuvarın (TSE) vermiş olduğu "genişletilmiş ölçüm belirsizliği" ile hesaplama adımlarından kaynaklanan "A tipi ölçüm belirsizliği" verileri kullanılarak "toplam ölçüm belirsizliği" hesabı yapılabilir.

Belirsizlik bütçesi ve tanımları:

- Genişletme faktörü: 2
- Değer: % (0,3 / 2)
- u(l)=Laboratuvar kaynaklı belirsizlik
- Frekans varyasyonu ±0,1 %
- Gerilim varyasyonu ±0,5 %

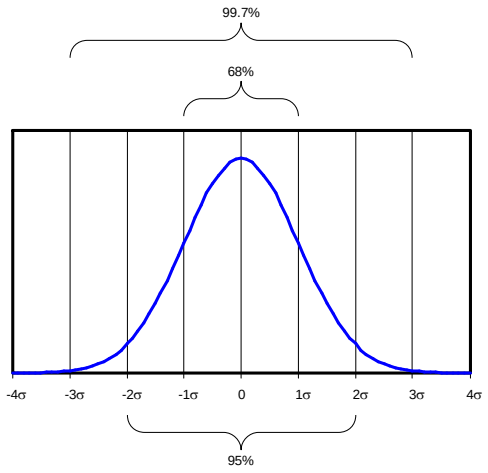
- TDH ±5 %
- u(h)= Hesaplama adımları kaynaklı belirsizlik
- U(t)= Toplam belirsizlik

Veri setinden elde edilen “A” tipi ölçüm belirsizliği:

- Toplam değer sayısı: 437
- Aritmetik ortalama : % 0,98
- Deneysel standard sapma : % 0,80
- Standard ölçüm belirsizliği : % 0,038

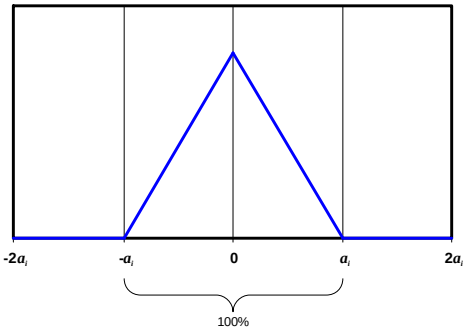
Veri setinden elde edilen “B” tipi ölçüm belirsizliği:

- Veri setinde bulunan tüm ölçümler mevcut olduğu için akredite deney sonuçları ile önerilen saha deney yöntemi arasındaki hatanın dağılım fonksiyonu da tespit edilebilir. Şekil 5.6’da görüldüğü üzere, veri setinde bulunan tüm sonuçların grafiği incelendiğince “normal dağılım” veya değerlerin büyük bir kısmının merkez etrafında olmasından ötürü “üçgen dağılım” tiplerinin belirsizlik hesabında olasılık dağılım fonksiyonu karakteristiği olarak kullanılabilir. Denklem (5.27) ile normal dağılım belirsizliği hesaplanabilir.



Şekil 5.16. Normal dağılım fonksiyonu grafiği (k=2 %95 güvenilirlik)

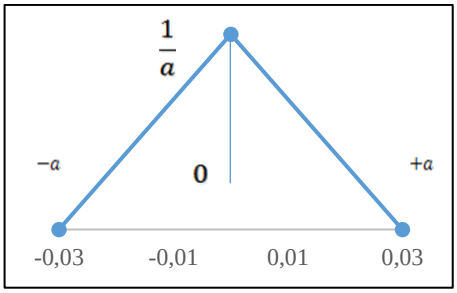
$$u(h)_B = U_i/k \qquad (5.27)$$



Şekil 5.17. Üçgen dağılım fonksiyonu grafiği

$$u(h)_B = a_i/\sqrt{6} \tag{5.28}$$

- Belirsizlik hesabında güvenli alanda kalmak adına Şekil 5.17 dikkate alınarak hesaplamalarda "üçgen dağılım" olasılık dağılım fonksiyonu karakteristiği kullanılmıştır. Denklem (5.28) ile üçgen dağılım belirsizliği hesaplanabilir. Veri setinde bulunan tüm sonuçlar ±0,03 sınır değerlerin içinde kalmaktadır. Bu durumda Şekil 5.18'de verilen "üçgen dağılım" olasılık dağılım fonksiyonu sınır değerleri ±0,03 ve ortalama değer "0" olmak üzere p(x), Denklem (5.29) gibi tanımlanırsa olasılık dağılım fonksiyonun belirli integrali "1"'e eşittir.



Şekil 5.18. Olasılık dağılım fonksiyonu grafiği

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)\,dx=1 \quad \text{rastgele bir "x" için} \quad p(x)=\begin{cases}((a+x)/a)(1/a), & -a\le x\le 0\\ ((a+x)/a)(1/a), & 0\le x\le a\\ 0, & \text{diğer durumlar}\end{cases} \tag{5.29}$$

$$\sigma^2=\int_{-\infty}^{+\infty}(x-0)^2\,p(x)dx=\int_{-\infty}^{+\infty}(x-0)^2 p(x)\,dx\sigma^2=\int_{-a}^{0}\frac{(a+x)}{a}\frac{1}{a}(x)^2dx+\int_{0}^{+a}\frac{(a-x)}{a}\frac{1}{a}(x)^2dx$$

$$\sigma^2 = \int_{-a}^{0} \frac{1}{a}\frac{(a+x)}{a} x\, dx + \int_{0}^{+a} \frac{1}{a}\frac{(a-x)}{a} x dx$$

$\sigma^2=(a^2/12)+(a^2/12)=(a^2/6)$ $\sigma=(a/\sqrt{6})$

Bu durumda standard belirsizlik standard sapma olarak belirlenir.

- Standard Ölçüm Belirsizliği; $\sigma=(a/\sqrt{6})==(0,03/\sqrt{6})=0,0122$

"A" tipi belirsizlik kabul edilirse toplam ölçüm belirsizliği:

- $U(t)\%=\sqrt{u(l)^2+u(h)_A^2}$ $U(t)\%=\sqrt{0,15^2+0,038^2}$ $U(t)\%=\%\ 0,155$

- k=2 (%95) Genişletme faktörü ile toplam belirsizlik % 0,31 olarak belirlenmiş olur.

"B" tipi belirsizlik kabul edilirse toplam ölçüm belirsizliği:

- Laboratuvar tarafından verilen %0,15 ölçüm belirsizliği veri setinde hata değeri olarak en fazla 0,0014'dur.

- $U(t)=\sqrt{u(l)^2+u(h)_B^2}$ $U(t)=\sqrt{0,0014^2+0,0122^2}$ $U(t)=0,001548$

- $U(t)=0,001548\cong\%\ 0,155$

- k=2 (%95) Genişletme faktörü ile toplam belirsizlik % 0,31 olarak belirlenmiş olur.

Sonuç olarak veri tabanı esas alınarak yapılan istatistiksel analize dayalı "A" tipi ölçüm belirsizliği hesabı ile tezde önerilen saha deney yönteminin sonuçlarından elde edilen olasılık dağılım fonksiyonunu temel alan "B" tipi ölçüm belirsizliği hesabı birbirine yaklaşık eş sonuçlar vermiştir. Bu nedenle "tezde önerilen saha deney yöntemi" ile yapılacak verim tespiti hesaplamalarında ±0,03 ve %0,31 ölçüm belirsizliği değeri dikkate alınmalıdır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dünya nüfusunun ve birincil enerji kaynak talebinin artışı ile bu kaynak kullanımından doğan sera gazı salımı dikkate alındığında, enerji verimliliği ve verimli cihazların kullanımının önemi ortaya çıkmaktadır. Elektrik enerjisi ise, yaygın kullanımı ve bağlı sistemlerin tasarruf potansiyeli açısından ilk sırada gelmektedir. 2016 yılı TÜİK verilerine göre Türkiye'de toplam 231.204 GWh elektrik enerjisi tüketilmiştir. Bu tüketimin %46,9'u sanayi sektöründe gerçekleşmiştir.

Sanayide enerji verimliliği çalışmaları uzun yıllardır devam etmektedir. Bu alanda ısı, buhar, hava, elektrik vb. gibi bir çok alt proses üzerinde verimlilik arttırıcı projelere rastlanabilir. Elektrik motorlarında verimlilik üzerine yapılan çalışmalar da bu alanda akla gelen konuların başındadır. Elektrik motorlarının verimliliği konulu hazırlanan Uluslararası Enerji Ajansı'nın raporu, elektrik motorlarının küresel ölçekte arz edilen tüm elektrik enerjisinin yaklaşık %46'sını, sanayi sektöründe ise yaklaşık %69'unu tükettiğini ifade etmektedir. Dünya ölçeğinde oldukça önemli olan bu sonucu Türkiye ölçeğinde doğrulayacak bir başka çalışma ise, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü tarafından başlatılmış ve 62 il 23 sanayi sektöründe toplam 887 firmaya ait 7,5 kW ve üzeri 93.139 adet AA, 1.755 adet DA motor verisi kullanılarak sonlandırılmıştır. Hazırlanan "Elektrik Motorları Envanteri Analiz Raporu" oldukça önemli ve hâlihazırda literatürdeki en kapsamlı çalışmadır. Söz konusu raporun sunduğu en önemli sonuçlardan birisi de, sanayide yaklaşık 4.306.622 adet 7,5 kW ve üzeri AA motorun kullanıldığı ve bu motorların %99'unun güncel mevzuatta zorunlu en düşük verimlilik sınıflarının altında olduğuna dair değerlendirmesidir.

Bu veriler ışığında bakıldığında, elektrik motorlarında verimlilik konusunun, üretimden piyasaya arz edilmesine kadar tüm süreçlerde, standardlar ve mevzuat açısından üzerinde fazlasıyla çalışılması gerektiği görülmektedir. 1998 yılında elektrik motorlarında verimlilik üzerine kurulan ilk gönüllü oluşum olan CEMEP, bu açıdan ilk çalışmayı başlatmış ve 2007 yılında ise IEC tarafından ilk verim sınıfları standardı yayınlanmıştır. Asgari verimlilik sınıflarını zorunlu hale getirmeyi amaçlayan ilk yasal

düzenleme ise Avrupa Birliği'nin Elektrik Motorları ile İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklerine Dair EC/640/2009 sayılı tüzüğüdür. Türkiye'de ise bu konudaki en önemli adım SGM-2012/2 "Elektrik Motorları İle İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklerine Dair Tebliğ"'nin yayımlanarak ulusal mevzuata kazandırılmış olmasıdır.

Elektrik Motoru Küresel piyasasının büyüklüğü ve zorunlu uygulamalar sonucu verimlilik ölçümünün gerekliliği dikkate alındığında süreç içerisinde literatüre çeşitli uygunluk ve ön uygunluk yöntemlerinin girdiğini görmekteyiz. Ancak, uygunluk değerlendirme deneyleri ve hesaplamaları doğası gereği güvenilir, doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar üretmelidir. Eğer bu sonuçlar kanun koyucu tarafından yaptırımlara esas kullanımı ortaya çıkaracak ise güvenilirlik ve tekrarlanabilir bir kat daha önem arz etmektedir. CSA-C390-10, IEE-112B, IEC-60034-2-1 gibi standard deney yöntemleri, küresel anlamda akredite laboratuvarlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Standard deney yöntemleri uygulamak ve akreditasyon koşullarının sağlanması adına altyapı ihtiyaçlarının elzem olduğu görülmektedir. Ancak akredite deney laboratuvarlarının yatırım ve işletme maliyetleri oldukça yüksektir. Güncel akredite laboratuvar deney ücretleri ve deney için sarf edilen zaman süresince kaybedilen işletme kabiliyeti kaybı dikkate alındığında, standard deney yöntemleri dışında elektrik motorlarının verimini tespit etmenin önemli bir fayda sağlayacağı düşünülmüştür. Özellikle işletmedeki motorlarının verimlilik seviyesini; hızlı, ekonomik ve güvenilir şekilde öğrenmek ve akabinde fayda maliyet analizi yapabilmek, verimlilik arttırıcı projelerin temel girdisi olabilecektir.

Bu tez çalışmasının temel motivasyon unsurlarından birisi, endüstriyel işletmelerde oldukça fazla kullanılan sincap kafesli asenkron motorların (yaşlanmadan ötürü verim değerlerinde düşüş yaşanması ve yeni mevzuat düzenlemeleri ile daha verimli ürünlerin pazarda yer alması) değişim ihtiyacına karar verme noktasında güvenilir ve ekonomik veri elde etme imkânı ihtiyacıdır.

Tez çalışması ile asenkron motorların işletme koşullarında laboratuvar imkânlarına, dinamometreye ve moment sensörüne ihtiyaç duymadan, endüstriyel atölyelerde kolaylıkla bulunabilecek ölçüm cihazları ile enerji verimliliği ölçümü deneyleri yapılabilen ve bu deneylerden elde edilen sonuçları ölçüm belirsizliği değeri bilinebilir bir hesaplama yöntemi sunulmuştur. Deney yöntemi ve hesaplama adımları birden

fazla yöntem ile doğrulanmaya çalışılmış ve nihayetinde tespit edilen verim değerinin ±0,03 hata sınır koşulları ve % 0,31 ölçüm belirsizliği ile tespit edilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca söz konusu yöntem ve hesaplama adımlarını esas alan bir prototip mobil deney cihazı imal edilmiş ve doğrulama süreçlerinde aktif olarak kullanılmıştır.

Nihayetinde tezde önerilen saha deney yöntemi ve hesaplama adımları sayesinde, endüstriyel işletme şartlarında, asenkron motorların etiket verileri yanı sıra boşta ve/veya yükte deney sonuçları kullanılarak bilinen hata ve belirsizlik ile birtakım avantajlara ulaşılacaktır.

Tezde önerilen saha deney yöntemi ile sadece etiket verileri ve boşta çalışma deneyinin yeterli olduğu nominal verim tespiti yapılabilmektedir. Bu sayede verimsiz motorların verimlileri ile değiştirilmesi süreçlerinde fayda maliyet analizi yapılabilecektir. Etiket verileri, boşta deney sonuçları ve en az bir adet yük altında deney sonuçları sayesinde, ilgili yüklenme oranına ait verim değeri de tespit edilebilecektir. Yüklenme oranının da belirlendiği bu durumda, sistem verimliliği açısından değerlendirme yaparak doğru yüke karşın doğru motor veya yük yönetimi yapılabilecektir.

Etiket verileri, boşta deney sonuçları ve mümkünse birden fazla yük altında deney sonuçları ile asenkron motorun yüklenme oranına karşılık verim fonksiyonu tespit edilebilmektedir. Bu sayede deney yapmaksızın diğer yüklenme oranlarına ait verim değerini hesaplayabilmek mümkün olacaktır. Özellikle yük dağıtımın dinamik olduğu su ve kanalizasyon sistemlerinde verim fonksiyonu üzerinden optimizasyon yapma imkânı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca tezde önerilen saha deney yönteminde kayıpların analizi prensibini esas alındığı için motora dair; tahmini stator kayıpları, tahmini rotor kayıpları, tahmini sabit kayıpları (demir kayıpları ve sürtünme ventilasyon) ve tahmini ek kayıpları hesaplanabilmektedir. Bu veriler aynı zamanda özellikle hata ve/veya arıza tespiti adına oldukça anlamlı muayene sonuçları olarak yorumlanabilecektir.

Örneğin belirli aralıklarla yapılacak ölçümler sayesinde motor yataklarında oluşan aşınma sabit kayıpların değişiminden, gerilim dengesizliği veya harmonik bozunumlar veya ortam sıcaklığı farklılıkları stator kayıplarında oluşan değişimden tespit edilebilir. Ek olarak özellikle ülkemizde yeniden sarım işleminin sıkça uygulandığı düşünüldüğü zaman sarım sonrası verim durumu tezde önerilen saha deney yöntemi

ile kolayca tespit edilebilecektir. Bu sayede sarım işleminin hangi güç seviyesinde efektif olduğuna dair kanaat oluşması sağlanabilecektir.

Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yöntemi ve hesaplama adımları; yapay zekâ uygulamaları ile model fonksiyonunun katsayılarının gelişimi açısından, çıkış gücü ve kayma tahmininde düşük belirsizlikte bir yöntemin kullanılması ile model fonksiyonunda kullanılan denklemlerin gelişimi açısından ve özellikle doğrulama süreçlerinin iyileştirilmesi adına farklı endüstri tesislerinde yapılacak kontrollü deneylerin sonuçlarının katkısı ile geliştirilmeye açık durumdadır. Ayrıca önerilen saha deney yöntem ile son dönem kullanımı oldukça artmakta olan sabit mıknatıslı motorların verim tespiti üzerine çalışmalar yürütülebilir.

Uygunluk değerlendirme faaliyetleri açısından kullanım kolaylığı sayesinde endüstriyel bir mobil deney cihazı aracılığı ile numune sayısının fazla ve zamanın az olduğu piyasa kontrolü, ithalatta gümrük kontrolü vb. süreçler daha ekonomik ve etkin hale getirilebilir. Ek olarak özellikle nesnelerin interneti ve yapay zekâ uygulamalarının hızla endüstriyel hale geldiği günümüzde önerilen saha deney yöntemi hesaplama denklemleri değişken hız sürücülü sistemlerde ya da doğrudan değişken hız sürücülerinde optimum etkin çalışma şartlarını kolaylıkla sağlayabilir.

Sonuç olarak, tüm uygunluk değerlendirme esaslı deney çalışmalarında amaç; tekrarlanabilir, yeniden üretilebilir, doğruluğu ve belirsizliği bilinen bütün bu özelliklerin sonucu olarak güvenilir olmaktır. Bu çalışma ile endüstriyel işletme koşulları altında sincap kafesli asenkron motorların enerji verimliliği tespitinde ekonomik, kolay uygulanabilir ve güvenilir bir deney yöntemi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında önerilen saha deney yönteminin deney cihazları, ölçü aletleri ve otomasyon sistemlerinde kullanım kolaylığı ve yüksek doğruluğu ile etkin fayda üreteceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Naceur, K.B, Cozzi L., Energy and Air Pollution Report, *International Energy Agency*, 19527066, 1-31, 2016.

[2] General Secretariat of the Council, EU 2030 Climate & Energy Framework Conclusion Report, *European Council*, EUCO 169/14, 1-16, 2014.

[3] Waide P., Brunner C. U., Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor Driven Systems Report, *International Energy Agency*, 1-132, 2011.

[4] Almeida A., Falkner H., Fong J., Fernando J. T. E., Ecodesign of Electric Motors and Drives Report, *University of Coimbra*, 1-91, 2008.

[5] İmalat Sanayisinde Kullanılan Elektrik Motorları Envanteri Analiz Raporu, *Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü*, ISBN: 978-605-4889-20-4, 1-86, 2016.

[6] Net Elektrik Tüketiminin Sektörlere Göre Dağılımı, Türkiye İstatistik Kurumu, www.tuik.gov.tr, (Ziyaret tarihi: 10 Ağustos 2018).

[7] Esen G. K., TSE Elektrik Motoru Deney Laboratuvarı Projesi Milli Katkısı ve Hedefleri, *Anahtar Dergisi*, 2017, Ankara, **29**(337), 15-18.

[8] Esen G. K., Türkiye ve Dünyada Elektrik Motorları Enerji Tüketimi ve İlgili Teknik Mevzuat, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu,* Sakarya, Türkiye, 4-6 Haziran 2015.

[9] Electric Motors and Variable Speed Drives Standards And Legal Requirements For The Energy Efficiency of Low-Voltage Three-Phase Motors, *European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics*, 1-16, 2011.

[10] Almeida A., Ferreira F. J. T. E., Fong J. A. C., Brunner C. U., Electric Motor Standards, Ecodesign and Global Market Transformation, *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, Clearwater Beach, FL, ABD, 4-8 Mayıs 2008.

[11] TS EN 60034-30, Döner elektrik makinaları - Bölüm 30: Tek hız kademeli, üç fazlı kafesli endüksiyon motorlarının verimlilik sınıfları (IE kodu), *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

[12] Boglietti A., Cavagnino A., Vaschetto S., Induction motor EU standards for efficiency evaluation: The scenario after IEC 60034-2-1, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, Melbourne, VIC, Avustralya, 7-10 Kasım 2011.

[13] IEC 60034-30-1, Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code) Machines, *International Electrotechnical Commission*, Bürüksel, 2014.

[14] IEC 60034-30-2, Rotating electrical machines - Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code), *International Electrotechnical Commission*, Bürüksel, 2014.

[15] Mevzuat Bilgi Sistemi, T.C. Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, www.mevzuat.gov.tr, (Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2018).

[16] SGM-2012-2, Elektrik Motorları İle İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklerine Dair Tebliğ. *Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı*, Ankara, 2012.

[17] Brunner C. U., Harmonized Standards for Motors and Systems Global Progress Report and Outlook, 1-13, 2011.

[18] Ferreira F. J. T. E., Baoming G., Almeida A. T., Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, **52**(6), 4628 - 4637.

[19] Falkner H., Holt S., Walking The Torque Proposed Work Plan for Energy-Efficiency Policy Opportunities, *International Energy Agency*,1-44, 2011.

[20] IEC 60034-2-1, Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), *International Electrotechnical Commission*, Bürüksel, 2008.

[21] Silva W. L., Marcus A., Lima N., A Method for Measuring Torque of Squirrel-Cage Induction Motors Without Any Mechanical Sensor, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, **64**(5), 1223-1231.

[22] Hsu J. S., Kueck J. D., Olszewski M., Casada A., Otaduy P. J., Tolbert L. M., Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods, *IEEE Transactıons on Industry Applıcatıons*, 1998, **34**(1), 117-125.

[23] Sebastian D., Manjusha V. A., Anto R., Energy Management Of İnduction Motors Using Non-İntrusive Methods, *International Conference on Power, Energy and Control*, Dindigul, Hindistan, 6-8 Şubat 2013.

[24] Karnavas Y. L., Vacharides C. K., Karlis A. D., On The Development of an On-Site Induction Motor Efficiency Estimator Framework, *9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion MEDPOWER*, Atina, Yunanistan, 2-5 Kasım 2014.

[25] 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 Transactıons on Energy Conversıon.*, 2015, **30**(1), 331-339.

[26] Tolbert L. M., Kueck J.D., Oldzewski M., Casada D. A., Hsu J., Otuduy P. J., Assessment of Methods for Estimating Motor Efficiency and Load Under Field Conditions, *Oak Ridge National Laboratory*, ORNL/TM-13165,10-64,1996.

[27] Al-Badri M., Pillay P., Angers P., A Novel Full-Load Efficiency Estimation Technique for İnduction Motors Operating With Unbalanced Voltages, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Coeur d'Alene, ID, ABD, 10-13 Mayıs 2015.

[28] Salomon C. P., Ana W. C. S., Borges L. E., Lambert-torres G. B., Oliveira L. E. L., Silva B. J. G., Induction Motor Efficiency Evaluation Using a New Concept of Stator Resistance, *IEEE Transactıons on Instrumentatıon and Measurement.*, 2015, **64**(11), 2908-2917.

[29] Dlamini V., Naidoo R., Manyage M., A Non-Intrusive Compensated Slip Method for Motor Efficiency Estimation Using Vibration Signature Analysis, içinde *IEEE Africon'11*, Livingstone, Zambia, 13-15 Eylül 2011.

[30] Phumiphak P., Chat-uthai C., Non-Intrusive Method for Induction Motor Field Efficiency Estimation Using On-Site Measurement and Modified Equivalent Circuit, *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sapporo, Japonya, 21-24 Ekim 2012.

[31] Al-badri M., Pillay P., Angers P., A Novel Algorithm for Estimating Refurbished Three-Phase Induction Motors Efficiency Using Only No-Load Tests, *IEEE Transactions on Energy Conversion.*, 2015, **30**(2), 615 - 625.

[32] Ghasemi-Bijan M., Al-Badri M., Pillay P., Angers P., Induction Machine Parameter Range Constraints in Genetic Algorithm Based Efficiency Estimation Techniques, *IEEE Transactions on Industry Applications,* 2018, **54**(5), 4186 - 4197.

[33] Al-badri M., Pillay P., Angers P., Simple and Accurate Algorithm for Three-Phase IM Efficiency Estimation from Only No-Load Tests, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, ABD, 21-24 Mayıs 2017.

[34] Al-Badri M., Pillay P., Angers P., A Novel In Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-Phase Induction Motors Operating With Distorted Unbalanced Voltages, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, **53**(6), 5338 - 5347.

35] Stopa M. M., Saldanha M. A., Luiz A.-S. A., Baccarini L. M. R., Lacerda G. A. M., A Simple Torque Estimator for In-Service Efficiency Determination of Induction Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, **54**(5), 4967 - 4976.

[36] Aminu M., Barendse P., Khan A., Efficiency Estimation of Induction Machines using Nonintrusive No-load Low Voltage Test, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, OH, ABD, 1-5 Ekim 2017.

[37] Chaudhary P. K., Dubey D. S. P., Efficiency Optimization of Induction Motor Drive in Steady- State using Artificial Neural Network, *International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC),* Chennai, Hindistan, 20-21 Nisan 2016.

[38] Grantham C., Mckinnon D. J., A Rapid Method for Load Testing and Efficiency Measurement of Three-Phase Induction Motors, *International Conference on Electrical Machines and Systems,* Wuhan, Çin, 17-20 Ekim 2008.

[39] El-Ibiary Y., An Accurate Low-Cost Method for Determining Electric Motors' Efficiency for the Purpose of Plant Energy Management, *IEEE Transactions on Industry Applications,* 2003, **49**(4), 1205 - 1210.

[40] Al-Badri M., Pillay P., Angers P., A Novel In Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-Phase IM Using GA, IEEE Method F1 Calculations, and Pretested Motor Data, *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 2015, **30**(3), 1092 - 1102.

[41] V. Sousa, M. Ieee, P. R. Viego, J. R. Gómez, E. C. Quispe, ve S. Member, Estimating Induction Motor Efficiency under No-controlled Conditions in the Presences of Unbalanced and Harmonics Voltages, *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON),* Santiago, Şili, 28-30 Ekim 2015.

[42] Siraki A. G., Pillay P., An In Situ Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Working With Unbalanced Supplies, *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 2012, **27**(1), 85 - 95.

[43] Al-Badri M., Pillay P., Angers P., A Novel Algorithm for Estimating Refurbished Three-Phase Induction Motors Efficiency Using Only No-Load Tests, *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 2015, **30**(2), 615 - 625.

[44] V Groza V., Merabet A., Pitis C. D., Giurgiu V. D., Novel Method of Pre-Determining Induction Machine Parameters and Energetic Efficiency, *IEEE Electrical Power & Energy Conference,* Halifax, NS, Kanada, 21-23 Ağustos 2013.

[45] Lu B., Habetler T. G., Harley R. G., A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications,* 2006, **42**(4), 924 – 933.

[46] Banan K., Sharifian M. B. B., Mohammadi J., Induction Motor Efficiency Estimation using Genetic Algorithm, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering,* 2007, **1**(3), 594-598.

[47] Çolak İ., Bal G., Elmas Ç., Review of the Testing Methods for Full-Load Temperature Rise Testing of Induction Machines, *European Power Electronics Journal,* 1996, **6**(1), 37-43.

[48] Mergen F., *Elektrik Makineleri 2 Asenkron Makineler*, 2rd. ed., Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.

[49] Sarul M. H., *Elektrik Makinalarının Kontrolu*. 1rd. ed., Yıldız Tenik Üniversitesi, İstanbul, 2016.

[50] Lu S. M., A Review of High-Efficiency Motors: Specification, Policy, and Technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2016, **59**(1), 1-2.

[51] Arçelik A.Ş., Elektrik Motorları Ürün Kataloğu, http://www.wat.com.tr/UPLOAD/DOCUMENTS/IM_tr_16_0.pdf (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2018).

[52] Sarıoğlu K., *Elektrik Makinalarının Temelleri Cilt 3 Asenkron Makinalar*, 1rd ed., Çağlayan Kitapevi İstanbul, 1983.

[53] Çolak İ., *Elektrik Makinaları 2*., 3rd ed., Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2014.

[54] Saçkan A. H., *Asenkron Motorlar*, 2rd ed., Birsen Yayınevi, İstanbul, 1994.

[55] Gürdal O., *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları, Bursa, 2015.

[56] Grundfos M., *Electrical Motor Basics*, 1rd ed., Grundfos Management, Danimarka, 2004.

[57] Turan M., *Elektrik Makineleri II Asenkron Makineler*, 2rd. ed., Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2009.

[58] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, ve M. Pastorelli, International Standards for The Induction Motor Efficiency Evaluation: A Critical Analysis of The Stray-Load Loss Determination, *IEEE Transactions on Industry Applications,* 2004, **40**(5), 1294 – 1301.

[59] IEC 60034-2-1, - Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), *International Electrotechnical Commission*, Bürüksel, 2014.

[60] American National Standard Motors and Generators, American *National Standards Institute,* ANSI/NEMA MG 1-2011, 2-18, 2011

[61] CSA C390-10, Test Methods, Marking Requirements, and Energy Efficiency Levels for Three-Phase Induction Motors, *Canadian Standards Association,* Ontario, Kanada, 2010.

[62] IEEE-112, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, *IEEE Power Engineering Society*, Piscataway, New Jersey, ABD, 2004.

[63] Cao W., Comparison of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, **24**(3), 802 – 808.

[64] Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M., Pastorelli M., Induction Motor Efficiency Measurements in Accordance to IEEE 112-B, IEC 34-2 and JEC 37 International Standards, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03*, Madison, WI, ABD, 1-4 Haziran 2003.

[65] TS EN 60034-1, Döner Elektrik Makineleri - Bölüm 1: Beyan Karakteristikleri ve Çalışma Karakteristikleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

[66] Esen G. K., Özdemir E., A Case Study of Determining Energy Efficiency in Squirrel Cage Induction Motor According to IEC 60034-2-1:2014 Standard, *Renew. Energy Power Quailty. Journal*, 2016, **14**(1), 506–511.

[67] 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.

[68] Ulusal Metroloji Enstitüsü, *Uluslararası Metroloji Sözlüğü*, 3rd. ed, TÜBİTAK Yayınları, Ankara, 2008.

[69] Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E., Ometto A., Uncertainty Issues in Direct and Indirect Efficiency Determination for Three-Phase Induction Motors: Remarks About the IEC 60034-2-1 Standard", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, **65**(12), 2701 – 2716.

[70] Agamloh E. B., The repeatability of IEEE standard 112B Induction Motor Efficiency Tests, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, ABD, 3-6 Mayıs 2009.

[71] Bell S., *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*, 2rd.ed., National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, United Kingdom, 2001.

[72] European Accreditation Laboratory Committee, *Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration*, 2rd. ed., European Accreditation Laboratory, Paris, Fransa, 2013.

[73] JCGM-100, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, *International Bureau of Weights and Measures*, Paris, Fransa, 2008.

[74] ISO-GUIDE-98-4, Uncertainty of measurement — Part 4: Role of Measurement Uncertainty in Conformity Assessment, *International Organization for Standardization*, Cenevre, İsviçre, 2012.

[75] EA-4/16, EA Guidelines on The Expression of Uncertainty in Quantitative Testing, *European Accreditation*, Paris, Fransa, 2003.

[76] NASA-HDBK-8739.19-3, Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods, *National Aeronautics and Space Administration*, Washington DC, 2010.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] **Esen G. K.**, Türkiye ve Dünyada Elektrik Motorları Enerji Tüketimi ve İlgili Teknik Mevzuat, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu,* Sakarya, Türkiye, 4-6 Haziran 2015.

[2] **Esen G. K**., Pala B. D., Televizyonların Enerji Etiketi Ölçümü ve Üretici Beyanlarının İsabet Oranı Analizi, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu,* Sakarya, Türkiye, 4-6 Haziran 2015.

[3] **Esen G. K**., Özdemir E., A Case Study of Determining Energy Efficiency in Squirrel Cage Induction Motor According to IEC 60034-2-1:2014 Standard, *Renew. Energy Power Quailty. Journal*, 2016, **14**(1), 506–511.

[4] **Esen G. K**., TS EN ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi Standardı ve Enerji Verimliliği Üzerindeki Sistematik Etkisi, *Yönetim Bilimleri Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 8-9 Aralık 2016.

[5] **Esen G. K**., TSE Elektrik Motoru Deney Laboratuvarı Projesi Milli Katkısı ve Hedefleri, *Anahtar Dergisi*, 2017, Ankara, **29**(337), 15-18.

[6] **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.

[7] Pala B.D., **Esen G. K**., Türkiye'de Ev Tipi Elektrikli Cihazlarda Enerji Etiketi ve Enerji Verimliliği Farkındalığı Analizi, *Verimlilik Dergisi*, 2018, Ankara, **2018**(2), 81-97.

ÖZGEÇMİŞ

Güvenir Kaan ESEN 1984 yılında Adapazarı'nda doğdu. İlköğrenimi Adana ve Adapazarı'nda, orta öğrenimini Adapazarı Anadolu İmam Hatip Lisesinde ve lise öğrenimini Kocaeli Körfez Fen Lisesinde tamamladı. 2002 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden bir yıl İngilizce hazırlık öğrenimi sonrasında 2008 yılı Şubat ayında mezun oldu. 2007 Aralık ayında kabul aldığı İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji (EBT) Yüksek Lisans programını 2014 Şubat ayında tamamladı. Aynı tarihte Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora programına kabul edildi ve 2014-2018 yılları arasında doktora eğitimi aldı. Lisans eğitiminin tamamlanmasını müteakip 2008 - 2009 yılları arasında Adapazarı Goodyear Lastikleri T.A.Ş kuruluşunda enerji merkezi sorumlusu ve proje mühendisi olarak çalıştı. 2009-2010 yılları arasında Maliye Bakanlığı Milli Emlak Genel Müdürlüğü'nde Bursa bölgesinde proje mühendisi olarak görev yaptı. 2010 yılı Ağustos ayından itibaren Türk Standardları Enstitüsünde sırasıyla inceleme uzmanı, deney personeli, laboratuvar yönetim temsilcisi kademelerinde görev yaptı. 22 Ağustos 2017 tarihinden buyana Marmara Bölge Koordinatörlüğü Elektroteknik Laboratuvarı Gebze Müdürlüğü görevinde bulunmaktadır. Türk Standardları Enstitüsünde deney personeli olarak görev yaptığı dönemde Türkiye'nin ilk akredite elektrik motorları deney laboratuvarı projesinin Ar-Ge süreçlerinde yer aldı ve proje yöneticiliği yaptı. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı koordinasyonunda uluslararası yürütülen Türkiye'de Küçük ve Orta Ölçekli İşletmelerde Enerji Verimli Motorların Teşvik Edilmesi Projesi kapsamında Türk Standardları Enstitüsü'nü temsil etmekte ve TSE adına proje yöneticisi olarak görev yapmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından oluşturulan Sanayide Verimsiz Elektrik Motorlarının Dönüşümü Yol Haritasının Hazırlanması geçici ihtisas komisyonu üyesidir. Ayrıca TSE adına TS EN ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi, TS EN ISO/IEC 17025 Deney ve kalibrasyon laboratuvarlarının yeterliliği için genel şartlar standardı, ölçüm belirsizliği metotları üzerine eğitimler vermekte ve MTC108 ISO/PJ 242-Enerji Yönetimi ve MTC122 Döner Makinalar (IEC/TC 2-CLC/TC 2) teknik ayna komiteleri üyesidir.