

T.C
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ANABİLİM DALI

3 FAZ ASENKRON MOTOR VERİMLİLİK
VE YENİLEME KARLILIK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEHMET YASİN KARTAL

OCAK 2018

MUĞLA

MUGLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEZ ONAYI

MEHMET YASİN KARTAL tarafından hazırlanan **3 FAZ ASENKRON MOTOR VERİMLİLİK VE YENİLEME KARLILIK ANALİZİ** başlıklı tezinin, 11/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Enerji Anabilim Dalı'nda yüksek lisans derecesi için gerekli şartları sağladığı oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

TEZ SINAV JURİSİ

Doç. Dr. Mahmut TENRUH (Jüri Başkanı)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

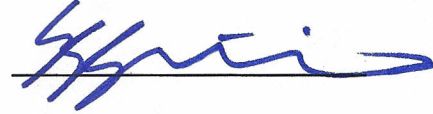
İmza:



Prof. Dr. Sırrı Sunay GÜRLEYÜK (Danışman)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Yrd.Doç. Dr. Atilla DÖNÜK (Üye)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı,
Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın

İmza:

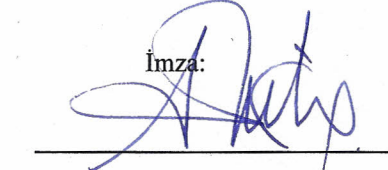


ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞI ONAYI

Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ

Enerji Ana Bilim Dalı Başkanı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

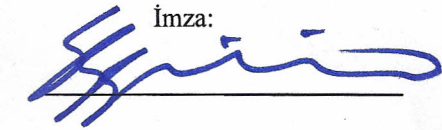
İmza:



Prof. Dr. Sırrı Sunay GÜRLEYÜK

Danışman, Enerji Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



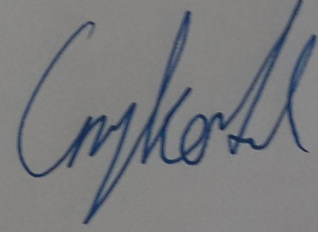
Savunma Tarihi: 11/01/2018

Tez çalışmalarım sırasında elde ettiğim ve sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgelerin tarafımdan bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde edildiğini; akademik ve bilimsel etik kurallarına uygun olduğunu beyan ederim. Ayrıca, akademik ve bilimsel etik kuralları gereği bu tez çalışması sırasında elde edilmemiş başkalarına ait tüm orijinal bilgi ve sonuçlara atıf yapıldığını da beyan ederim.

Mehmet Yasin Kartal

11/01/2018

(İmza)



ÖZET

3 FAZ ASENKRON MOTOR VERİMLİLİK VE YENİLEME KARLILIK ANALİZİ

Mehmet Yasin KARTAL

Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sırrı Sunay GÜRLEYÜK

Ocak 2018, 92 sayfa

Asenkron motorlar; daha ucuz olmaları, bakıma daha az ihtiyaç duymaları, birkaç wattan 3500kW'a kadar üretilibilmeleri, yüksek moment değerlerini sağlayabilmeleri, çeşitli fazlarda çalışacak şekilde üretilmeleri, devir sayılarının çok geniş aralıklarda değiştirilebilmeleri ve çalışmaları sırasında elektrik arkı oluşturmamalarından dolayı sanayide en fazla kullanılan motor türüdür(Anonim). Öyle ki Türkiye'de elektrik motorlarında kullanılan enerjinin % 90'ı asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Ayrıca Türkiye'de; toplam net elektriğin yaklaşık %36'sı, sanayi elektriğinin yaklaşık %70'i üç fazlı asenkron motor sistemleri tarafından tüketilmektedir(Anonim).

2023 ekonomi hedefini destekleyecek enerji kaynaklarına bakıldığında enerji dışa bağımlılığımızın çok yüksek oranlarda olduğu bilinmektedir. Toplam enerji tüketimindeki ithal kaynakların oranı 2012 yılına göre artış göstererek 2013 yılında %73,5 oranına yükselmiştir. Önümüzde ki yıllarda ise dışa bağımlılık oranının gittikçe artacağını söyleyebiliriz. Çünkü 1990'dan 2013'e toplam enerji ithalatı % 211,62 artarken; yerli üretimdeki artış % 24,78 ile sınırlı kalmıştır(Türkyılmaz, 2015).

Bundan dolayı asenkron motorlarda enerji verimliliği konusuna çok fazla önem verilmekte ve enerji verimliliğinin artırılması için kamu, üniversite ve sanayide önemli Ar-Ge faaliyetleri yürütülmektedir.

Asenkron motorlarda enerji verimliliğini arttırmak için genel olarak aşağıda ki konuların incelenmesi gereklidir:

- a. Değişken hızlı motorlar ile % 10-50,
- b. Verimli motor sınıfı kullanımı ile % 2-8,
- c. Uygun motor seçimi ile % 1-3,
- d. Kaliteli enerji besleme ile % 0.2-3,
- e. Sistemlerde değişiklik ile % 2-10 civarlarında enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir.

Belirtilen oranlar prosesin durumu ve motorun çalışma koşullarına göre oldukça değişkenlik gösterebilir(Dinçer). Standart bir asenkron motorun çalışma süresi boyunca oluşturduğu toplam masrafların %97'sini enerji giderleri oluşturmaktadır. Geri kalan %3' lük pay ise satın alma, montaj ve bakım masraflarıdır(Anonim).

Bundan dolayı ucuz olduğu için tercih edilen verimsiz bir elektrik motoru, uzun vadede kullanıcıya çok daha fazla pahalıya mal olabilmektedir. Tez kapsamında Muğla'da yaygın olarak faaliyet gösteren mermer fabrikalarında kullanılan elektrik motorlarının enerji verimlilikleri tespit edilerek, daha verimli asenkron motorlar kullanmaları halinde tasarruftan elde edilecek kazanç değeri kullanılarak motor değişim giderlerinin geri dönüş süreleri hesaplanmaktadır. Bu sayede verimsiz asenkron motor kullanan firmalar tespit edilerek daha verimli motor kullanmaları için firmalara gerekli bilgilendirme ve yönlendirmeler yapılabilecektir. Nihai olarak ise, mermer fabrikalarının en önemli girdi maliyet kalemleri arasında yer alan enerji giderlerinde azalma sağlanarak mermer firmalarının rekabetçilik seviyeleri arttırılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motorlar, Enerji Verimliliği, Asenkron Motor Verimlilik Tahmin Metodu, Motor Yenileme Fizibilitesi, Fizibilite

ABSTRACT

ANALYSIS OF 3 PHASE ASENKRON MOTOR PRODUCTIVITY AND RENOVATION PROFITABILITY

Mehmet Yasin KARTAL

Master of Science (M.Sc.)

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy

Supervisor: Prof. Dr. Sırrı Sunay GÜRLEYÜK

January 2018, 92 pages

Asynchronous motors; are the most commonly used engine types in the industry because they are cheaper, they need less maintenance, they can be produced up to 3500kW, they can produce high torque values, they are manufactured to work in various phases, they can be operated over a wide range of speeds and they do not generate electric arc. So that 90% of the energy used by electric motors in Turkey is consumed by asynchronous motors. Also; about 36% of total net electricity, and about 70% of industrial electricity is consumed by three-phase asynchronous motor systems (Anonymous).

When we look at the energy sources that support the 2023 economic target, it is known that our energy dependency is at a very high rate. The share of imported energy sources in total energy consumption has increased by 73.5% from 2012 to 2013. In the coming years, we can say that the rate of external dependency will increase. Because the total energy imports increased by 211.62% from 1990 to 2013; but the increase in domestic production was limited to 24,78% (Türkyılmaz, 2015).

Therefore, asynchronous motors place much emphasis on energy efficiency, and significant R & D activities are being carried out by public, universities and industry to increase energy efficiency.

To increase energy efficiency in asynchronous motors, it is generally necessary to examine the following criteria :

- a. Variable speed motors with 10-50%,
- b. 8% with efficient engine class use,
- c. 1-3% with proper motor selection,
- d. 0.2-3% with quality energy supply
- e. And about 2-10% by changing the systems, energy savings can be achieved.

The stated ratios may vary considerably depending on the state of the process and the operating conditions of the motor (Dinçer). Energy costs constitute 97% of the total costs incurred by a standard asynchronous motor during the run-time. The remaining 3% is the cost of procurement, installation and maintenance (Anonymous).

Because of this, an inefficient electric motor, which is preferred because it is cheap, can cost a lot more to the user in the long run. In the scope of the thesis, energy efficiencies of electric motors used in marble factories operating in Muğla are determined, and if they use more efficient asynchronous motors, the return values of motor change expenses will be calculated by using gain value obtained from savings. Companies that use inefficient asynchronous motors will be identified and necessary informations and recommendations will be provided for companies to use more efficient engines. In this respect, the competitiveness levels of marble companies will be increased by reducing the energy costs which is the most important input cost of the marble factories.

Keywords: Asynchronous Motors, Energy Efficiency, Asynchronous Motor Efficiency Estimation Method, Engine Renewal Feasibility, Feasibility

ÖNSÖZ

Bu zorlu tez sürecinde benden desteğini bir an için bile esirgemeyen sevgili eşim Gizem Uzun Kartal'a; tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili anne ve babama, tezimin her aşamasında bilgisini, tecrübesini ve değerli zamanını esirgemeyerek yardımcı olan değerli tez danışmanım Prof.Dr. Sırrı Sunay Gürleyük'e(MSKÜ) sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, BAP-15-234 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ASENKRON MOTORLARIN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ	3
2.1. Asenkron Motorların Fiziksel Yapısı	3
2.2. Asenkron Motorların Çalışma Prensibi	6
2.3. Asenkron Motorun Bazı Temel Büyüklükleri	12
2.4. Stator Sargılarında İndüklenen Gerilim.....	13
2.5. Rotor Sargılarında İndüklenen Gerilim Ve Rotor Frekansı	14
2.6. Asenkron Motorda Rotor Hızı ve Kayma.....	15
2.7. Asenkron Motorun Boşta Çalışması.....	16
2.8. Asenkron Motorun Yüklü Çalışması.....	18
2.9. Asenkron Motor Denklemleri.....	19
2.10. Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi	19
3. ASENKRON MOTOR ENERJİ VERİMLİLİĞİ	21
3.1. Enerji Verimliliği Neden Önemlidir?	21
3.2. Asenkron Motorlarda Enerji Verimliliği	22
3.3. Motorda Meydana Gelen Enerji Kaybı ve Verimlilik Tanımı	25
3.4. Asenkron Motor Verimlilik Tahmin Yöntemleri	32
3.4.1. Plaka metodu	33
3.4.2. Kayma metodu.....	33
3.4.3. Akım metodu	34
3.4.4. Eşdeğer devre metodu	35
3.4.5. Belirlenmiş kayıp metodu.....	35
3.4.6. Moment metodu.....	36
3.4.7. Moment- kayma metodu.....	38

4.	ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK ÜLKEMİZDE YAPILAN İYİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ.....	41
4.1.	Sanayide Elektrik Motorlarının Dönüşüm Programı.....	42
4.2.	SÜTAŞ Firmasında Kullanılan Elektrik Motorlarının Verimliliğinin Artırılması Projesi	46
4.3.	TOFAŞ Fabrikası Yüksek Verimli Motor Uygulama Fizibilitesi	46
4.4.	TSE Elektrik Motoru Deney Laboratuvarı Denetimleri.....	48
5.	SAHA DENEYLERİ VE PROSEDÜRLERİ.....	49
5.1.	Deney Süreçlerinde Kullanılan Test Ekipmanları.....	49
5.1.1.	Optik takometre.....	50
5.1.2.	0,75 kW 3 fazlı asenkron motor	51
5.1.3.	0,75 kW DC makine (generatör)	52
5.1.4.	Infared lazer termometre	53
5.1.5.	Ses seviyesi ölçer.....	54
5.1.6.	Multimetre	55
5.1.7.	Pens ampermetre	55
5.1.8.	Enerji analizörü	56
5.2.	Motor Yenileme Karlılık Analizi Hesaplama Yöntemi.....	57
5.2.1.	Geri ödeme süresi yöntemi	58
5.2.2.	Amortismanların hesaplanması	58
5.3.	Karlılık Analizi Kapsamında Yapılan Deney ve Hesaplamalar	59
5.3.1.	Laboratuvar ortamında yapılan ölçümler	60
5.3.2.	Mermer fabrikası ölçüm sonuçları.....	74
5.3.3.	Moment-kayma yöntemiyle sahada ölçülen asenkron motorların verimlerinin tahmin edilmesi.....	83
6.	SONUÇLAR.....	85
6.1.	Bulgular ve Analizler.....	85
6.2.	Fizibilite Hesaplama Örneği.....	87
	KAYNAKLAR.....	89
	ÖZGEÇMİŞ.....	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Gerilim dengesizliğinin motor verimine etkileri	29
Çizelge 3.2. Gerilim değişiminin motor verimine etkileri(Anonim)	30
Çizelge 3.3. PLL varsayım değerleri.....	35
Çizelge 3.5. Motor verimlilik tahmin metotlarının karşılaştırılması(Habetler vd., 2006).....	37
Çizelge 3.6. Doğrudan yük ölçüm sonuçları(Saravan vd., 2013).	39
Çizelge 3.7. Moment-kayma metodu sonuçları(Saravan vd., 2013).....	39
Çizelge 3.8. İki ölçüm metodunun karşılaştırılması(Saravan vd., 2013).	40
Çizelge 4.1. Sektörlere göre 7,5 kW ve üzeri AC motor sayısı oranı	44
Çizelge 4.2. Değişken hız sürücüsü kullanımı ve motor dönüşüm senaryolarından elde edilen elektrik tasarrufu ve geri dönüş süreleri	45
Çizelge 4.3. Motor yenileme fizibilite sonuçları(1,1-160 kW).....	47
Çizelge 4.4. Motor yenileme fizibilite sonuçları(55-160kW).....	47
Çizelge 5.1. Deney ölçüm cihazları	50
Çizelge 5.2. Laboratuvarda ölçümü yapılan asenkron motorun plaka değerleri.....	52
Çizelge 5.3. Ortalama amortisman oranını hesaplama yöntemi	58
Çizelge 5.4. Yıllık amortisman değerini hesaplama yöntemi	59
Çizelge 5.5. DC generatörün ölçülen verim değerleri.....	63
Çizelge 5.6. Laboratuvar ortamında yapılan deney ölçüm sonuçları.....	66
Çizelge 5.7. Ülkemizin doğal taş ihracatı (2010-2016)	75
Çizelge 5.8. Sahada ölçümü alınan asenkron motorların plaka değerleri.....	76
Çizelge 5.9. Asenkron motorların saha ölçüm sonuçları	79
Çizelge 5.10. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları_ A mermer fabrikası.....	81
Çizelge 5.11. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları__ B mermer fabrikası.....	82
Çizelge 5.12. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları__ C mermer fabrikası.....	82
Çizelge 5.13. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları__ D mermer fabrikası.....	83
Çizelge 5.14. Mermer fabrikalarında ölçülen asenkron motorların verimleri	84

Çizelge 6.1.Değiştirilecek motorlarla ilgili birim değerler	85
Çizelge 6.2. Mermer fabrikalarında kullanılan asenkron motorların yenileme fizibilitesi.....	86



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kısa devre rotorlu(sincap kafes) asenkron motorun fiziksel aksamaları.....	3
Şekil 2.2. Sincap kafesli rotor sargısı(Anonim).....	5
Şekil 2.3. Saç paketi oluklarına bobinlerin yerleştirilmesi(Anonim).....	7
Şekil 2.4. 3 Fazlı asenkron motor bobin diyagramı(Fathizadeh).....	8
Şekil 2.5.Üç Fazlı Manyetik Akı Dalgası(Baş, 2010).....	9
Şekil 2.6. Üç fazlı alternatif akımın değişim eğrisi.....	9
Şekil 2.7. Çeşitli anlarda stator sargılarından geçen üç fazlı alternatif akımların meydana getirdiği kutuplar.....	11
Şekil 2.8.Kaymanın (s) rotor dönme hızına göre değişimi	16
Şekil 2.9.Rotor direnç ve reaktansı ihmal edilmiş asenkron motorun eşdeğer devresi	17
Şekil 2.10.Asenkron Motorun Yüklü Durumdaki Eşdeğer Devresi	18
Şekil 2.11. Stator ve rotor eşdeğer devrelerinin ayrı ayrı gösterilmesi.....	20
Şekil 3.1. Dünya enerji tüketimi(Milyon TEP).....	21
Şekil 3.2. Türkiye elektrik enerjisi brüt talep değişimi(GWh)	22
Şekil 3.3. Elektrik motoru çeşitleri	23
Şekil 3.4. Türkiye'deki enerji talebi kullanım oranları	24
Şekil 3.5. IE sınıflarının sağlaması gereken verimlilik alt sınırları.....	26
Şekil 3.6. Sincap kafesli asenkron motorun yüklenme karakteristiği	27
Şekil 3.7.Farklı güç değerlerine sahip motorlar için yük/verimlilik grafiği	28
Şekil 3.8. Şebeke geriliminin motor verimine etkisi((Zhang vd., 2011).....	29
Şekil 3.9. Asenkron motor enerji kayıpları(Fathizadeh).....	32
Şekil 3.10.Asenkron motorun moment-kayma eğrisi	38
Şekil 3.11. Asenkron motorun moment-hız grafiğinin $K_v=1\%$ derecesindeki değişimi	40
Şekil 4.1. IEC verim sınıflarına göre Türkiye'de kullanılan motor sayısı	43
Şekil 5.1. Laboratuvar deney düzeneği şeması	60
Şekil 5.2. DC generatör moment-devir hızı grafiği.....	64
Şekil 5.3. DC generatör devir hızı-verim grafiği	64
Şekil 5.4. DC generatör moment-verim grafiği	65

Şekil 5.5. DC generatör akım-verim grafiği.....	65
Şekil 5.6. AC motor giriş akımı - devir hızı grafiği.....	67
Şekil 5.7. AC motor görünür güç- devir hızı grafiği.....	68
Şekil 5.8. AC motor aktif güç- devir hızı grafiği.....	68
Şekil 5.9. AC motor gürültüsü- devir hızı grafiği.....	69
Şekil 5.10. AC motor sıcaklığı- devir hızı grafiği.....	69
Şekil 5.11. AC motor giriş akımı - verim grafiği.....	70
Şekil 5.12. AC motor görünür güç-verim grafiği.....	70
Şekil 5.13. AC motor aktif güç-verim grafiği.....	71
Şekil 5.14. AC motor gürültüsü-verim grafiği.....	72
Şekil 5.15. AC motor devir hızı-verim grafiği.....	73
Şekil 5.16. AC motor hız/güç/akım-verim grafiği.....	73
Şekil 5.17. Anma akım yüzdesi-güç faktörü grafiği (Anonim).....	78
Şekil 5.18. GM2E 315 M4 a tip motorun moment- kayma grafiği.....	84

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DHS	: Değişken hız sürücüsü
EMK	: Elektromotor kuvveti (Volt)
f	: Frekans (Hz)
f_s	: Stator frekansı (Hz)
f_r	: Rotor frekansı (Hz)
n_s	: Senkron devir sayısı (d/d)
η_{AC}	: Asenkron motorun verimi (%)
η_{DC}	: DC generatörün Verimi (%)
Φ	: Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m^2)
P	: Çift kutup sayısı
2P	: Tek kutup sayısı
$P_{ACgiriş}$: Asenkron motorun şebekeden çektiği güç (W)
$P_{DCgiriş}$: DC generatörün miline aktarılan güç (W)
$P_{ACçıkış}$: Asenkron motorun milindeki çıkış gücü (W)
$P_{DCçıkış}$: DC generatörün milindeki çıkış gücü (W)
P_s	: Stator bakır kaybı
P_{core}	: Stator demir kaybı
P_{LL}	: Kaçak yük kaybı
P_r	: Rotor bakır kaybı
P_{fw}	: Sürtünme ve vantilasyon kaybı
T	: Motor milinden ölçülen moment (Nm)
TEP	: Ton eşdeğer petrol
w	: Açısal hız (rad/saniye)

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar; ucuz olmaları, bakıma daha az ihtiyaç duymaları, birkaç wattan 3500kW'a kadar üretilibilmeleri, yüksek moment değerlerini sağlayabilmeleri, çeşitli fazlarda çalışacak şekilde üretilmeleri, devir sayılarının çok geniş aralıklarda değiştirilebilmeleri ve çalışmaları sırasında elektrik arkı oluşturmamalarından dolayı sanayide en fazla kullanılan motor türüdür. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren asenkron motorların sanayide kullanımı; pompalar, fanlar, kompresörler, değirmenler, taşıma sistemleri, mermer kesme makinaları gibi çeşitli makine ve teçhizatı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansının tahminlerine göre dünya çapındaki elektrik tüketiminin yaklaşık %40'ı elektrik motorlardan kaynaklıdır. Sanayi sektörünün toplam elektrik tüketiminin ise yaklaşık %65'i elektrik motorlardan kaynaklıdır. Türkiye'de ise, elektrik motorlarında kullanılan elektrik enerjisinin %90'ı asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Ulusal toplam elektrik tüketiminin ise yaklaşık %36'sı tek başına asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Sanayi elektriğinin ise yaklaşık %70'i asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Asenkron motorların enerji verimliliğinin artırılması ile birlikte elde edilecek maddi ve çevresel kazançların fırsatının farkına varan gelişmiş ülkeler tarafından sanayi sektörüne yönelik motor dönüşüm programları yürütülmekte ve sonuçlar izlenmektedir. Ülkemiz de benzer çalışmalar yürütmekte olup, bu kapsamda Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından "Sanayide Elektrik Motorlarının Dönüşüm Programı" yürütülmüştür. Söz konusu program kapsamında 7,5 kW üzeri 95.000 adet elektrik motorun enerji verimliliği analiz edilmiştir. Verimsiz motorların tamamının dönüşümünün sağlanması durumunda yıllık 34 milyar kWh elektrik tasarruf edileceği ve bu sayede 8.5 milyar TL'lik bir ekonomik kazancın ekonomimize kazandırılacağı tespit edilmiştir. Motor dönüşüm programının yatırım tutarı ise yaklaşık 14,6 milyar TL olup, verimsiz motorların değiştirilmesiyle yatırımın geri ödeme süresinin 18 aya kadar düşebileceği hesaplanmıştır.

Tezin amacı, Muğla'da faaliyette olan mermer işleme fabrikalarının enerji verimliliklerinin analiz edilmesidir.

Yıllar içerisinde çeşitli kullanım amaçları için birçok motor verimlilik tahmin yöntemi önerilmiştir. Söz konusu yöntemlerin zorluk derecesi, ekipman gideri, doğruluk derecesi gibi parametrelere göre analizi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Tez kapsamında ise, 15 en iyi verimlilik yöntemi incelenerek, sanayiye yönelik verimlilik analizi çalışması için en uygun olduğuna karar verilen moment-kayma metodu kullanılmıştır.

Tezin uygulama faaliyetleri arasında yer alan deney ve ölçümler iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada 0,75 kW asenkron motorun akım, gerilim, aktif güç gibi değerleri laboratuvar ortamında ölçülmektedir. Bu veriler kullanılarak asenkron motorun dönme hızı, aktif güç, görünür güç, akım, motor sıcaklığı ve gürültü seviyesi gibi parametrelere göre verimindeki değişim hesaplanmaktadır.

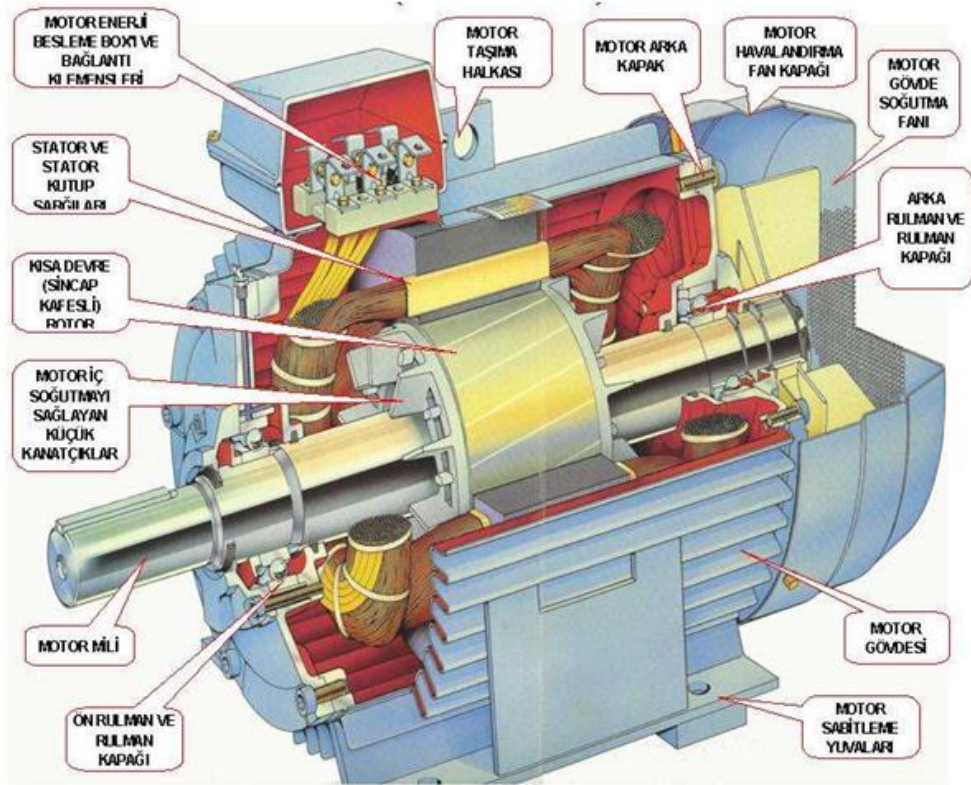
İkinci aşamada ise Yatağan ve Bayır bölgelerinde faaliyet gösteren 4 mermer fabrikasında 9 asenkron motorun enerji verimliliği ölçümleri yapılmaktadır. Söz konusu çalışma kapsamında, Mermer fabrikasında çalışan, motor anma gücü 132 veya 110 kW olan çeşitli yaş aralarındaki asenkron motorların; akım, gerilim ve motor mili hızı ölçülmektedir.

Sonuç olarak, mermer fabrikalarında yapılan ölçüm sonuçları ile firma yetkililerine yöneltilen anket sonuçları kullanılarak asenkron motor yenileme fizibilite analizi yapılmaktadır. Bu kapsamda; mevcut motor ile aynı özelliklere sahip daha verimli yeni nesil motorlar karşılaştırılarak; satın alma maliyetleri, yıllık toplam çalışma süreleri, o yıla ait hurda alım değeri ve enerji maliyeti parametrelerine göre yatırımın geri dönüş süresi hesaplanmıştır. Yapılan fizibilite çalışması ile üniversite-sanayi işbirliği özelinde örnek bir uygulama hayata geçirilmiş olacaktır.

2. ASENKRON MOTORLARIN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

2.1. Asenkron Motorların Fiziksel Yapısı

Asenkron motorlar; sabit stator ve stator sargıları ile dönme hareketi yapan rotor ve rotor sargıları olmak üzere başlıca iki bileşenden oluşmaktadır (Sarioğlu vd., 2003). Bunların dışında yapı parçaları olan (gövde, yataklar, motor mili, pervane taşı, segmanlar, mil ucu kaması, conta, kablo giriş rekoru, disk, yay, vb.) malzemeler kullanılmaktadır (Altıntaş).

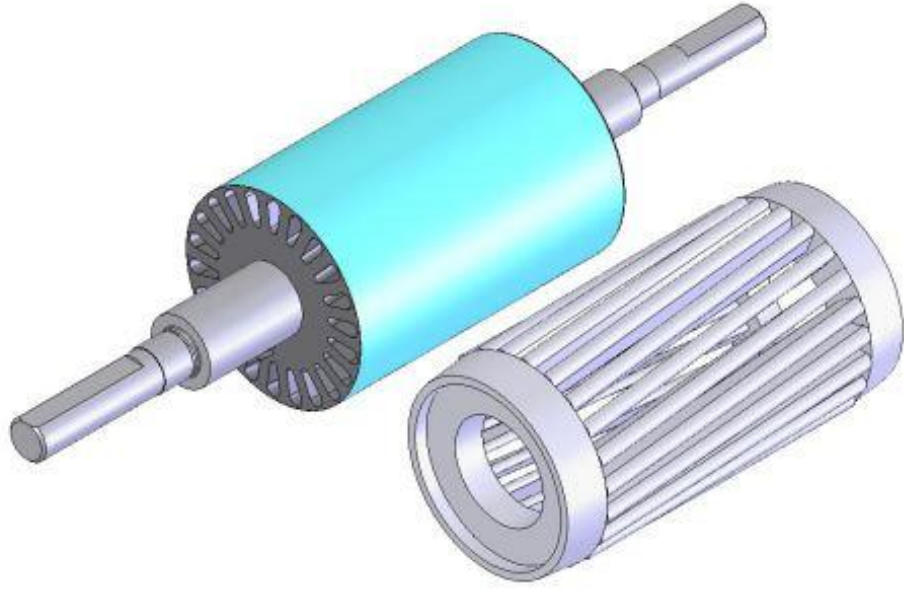


Şekil 2.1. Kısa devre rotorlu(sincap kafes) asenkron motorun fiziksel aksamaları

Stator: Asenkron motorun duran kısmına stator adı verilmektedir. Özel kalıplar kullanılarak preste basılan 0,4-0,5 veya 0,8 mm kalınlığındaki silisyumlu demir saçlar üst üste gelecek şekilde paketlenerek, üç fazlı stator sargılarının yerleştirileceği stator nüvesi elde edilmektedir. Daha sonra ise stator nüvesindeki oluklara (ankoşlara) üç fazlı stator sargıları yerleştirilmekte ve sonrasında 3 faz sargısının 6 ucu klemens tablosuna bağlanmaktadır.

Rotor: Asenkron motorun dönen kısmına rotor adı verilmektedir. Boşta çalışma akımının çok düşük seviyelerde tutmak için rotor ile stator arasındaki boşluk (hava aralığı) diğer elektrik motorlarına nazaran çok küçük bırakılmaktadır. Rotor türleri, sincap kafesli (kısa devreli) ve bilezikli (sargılı) olmak üzere iki çeşittir:

a Sincap Kafesli Rotor (Kısa Devreli Rotor): Sincap kafesli rotorlar yapılırken; preste kesilen silisyumlu demir saçlar paketlenmekte ve sonrasında rotor kanalları içerisine kısa devre kafes sargıları oluşturacak şekilde erimiş alüminyum pres dökümüyle yerleştirilmektedir. Bazı büyük motorlarda, rotor oluklarına alüminyum yerine bakır çubuklar yerleştirilmektedir. Ancak alüminyum pres dökümüyle yapılan sincap kafes sargıları eksiz olduğu için daha fazla tercih edilmektedir. Rotorlar tasarlanırken, farklı tiplerde oluklar kullanılmaktadır (Saçkan, 1994).



Şekil 2.2. Sincap kafesli rotor sargısı(Anonim)

Dikkat edilmesi gereken nokta ise, rotor oluk sayısı, stator oluk sayısına eşit olduğunda motor kalkınamadığından dolayı, rotor ve stator oluk sayıları hiçbir zaman eşit olmamalıdır. Asenkron motorların düzgün çalışabilmesi için rotor oluk sayısının stator oluk sayısına oranı %70-85 veya %115-120 kadar olması gerekmektedir. Sincap kafesli bir rotor sargısı şekil 2.2.'de gösterilmektedir. Şekilde de görüleceği üzere rotor çubukları rotor eksenine paralel yerleştirilmemiştir. Rotor çubuklarının rotor eksenine göre belirli bir eğimle yapılmasının sebebi ise hava aralığındaki manyetik akıda oluşan harmoniklerin etkisini azaltarak, manyetik sesleri azaltmak ve iyi kalkınma momenti elde etmektir.

b Bilezikli Rotor (Sargılı Rotor): Saçlar paketlenerek, rotor silindir şekline getirildikten sonra rotor oluklarına 3 fazlı AC sargı yerleştirilmektedir. Aralarında 120° faz farkı olan 3 fazlı AC sargılar yıldız veya üçgen bağlandıktan sonra çıkarılan 3 sargı ucu, motor miline yalıtılarak yerleştirilen 3 bileziğe bağlanmaktadır (Saçkan, 1994).

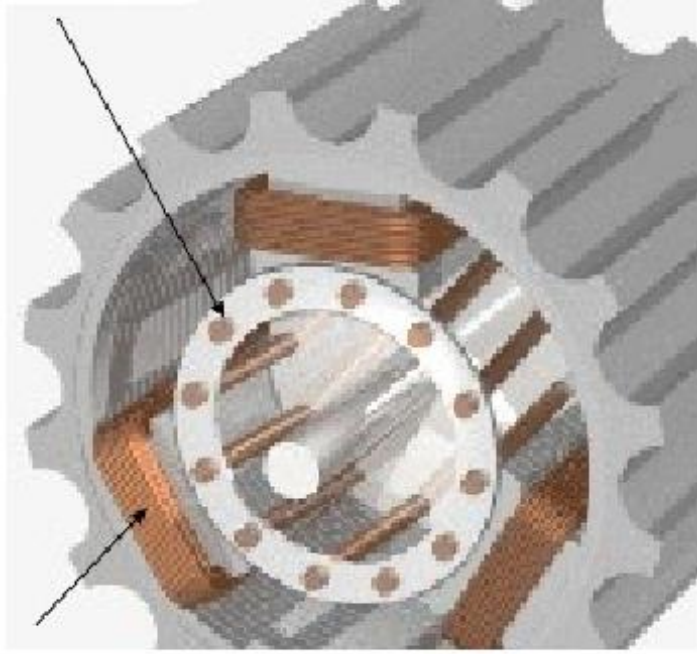
2.2. Asenkron Motorların Çalışma Prensibi

Alternatif akım motorlarının stator ve rotoru arasında herhangi bir elektriksel bağlantı yoktur. Statorda oluşan enerji, rotora manyetik alan üzerinden aktarılmaktadır (Baş, 2010). Alternatif motorların (akım motorlarının) çalışma prensibini N-S daimi mıknatıs kutuplarının ortasına yerleştirilen kısa devreli rotor düzeneğiyle anlatmak mümkündür. N-S kutuplarının bulunduğu gövde saat yönünde döndürülünce kısa devreli rotorun da aynı yönde dönmeye başladığı görülür. Eğer gövde döndürülmemiş olsaydı, N kutbundan S kutbuna geçen manyetik kuvvet çizgi sayısında bir değişim olmayacak ve dolayısıyla rotor çubuklarında EMK indüklenmeyecekti. Kutupları saat ibresi yönünde devriyle döndürmüş olsaydık, N kutbundan S kutbuna giden manyetik kuvvet çizgileri sabit rotorun kısa devre çubuklarını keserek çubuklarda EMK indükleyecekti.

Rotor ve dönen N-S kutuplarının devir sayısı eşitlendiğinde ise rotor çubukları manyetik kuvvet çizgileri tarafından kesilemeyeceği için rotor çubuklarında EMK indüklenmeyecek ve çubuklardan endüksiyon akımı geçmeyecektir. Kısa devre çubuklarından akım geçmeyince, hava aralığındaki manyetik alan tarafından rotor çubukları itilmeyecektir. Rotorun dönmelerini sağlayan moment oluşmayınca ise N-S kutupları ile aynı devirde dönen rotorun devri azalmakta ve dolayısıyla rotor geri kalmaktadır. Bu esnada ise rotor çubukları tekrar manyetik kuvvet çizgileri tarafından kesilmeye başlayarak rotor çubuklarında EMK indüklenmektedir. Söz konusu çalışma prensiplerinden dolayı rotor ve N-S kutuplarının devir sayıları hiçbir zaman birbirine eşit olamamaktadır (Saçkan, 1994).

Alternatif akım motorlarında ise, N-S kutuplarının işlevini; herhangi bir iletkenin bobin şekline getirilip, bobin düzleminin ekseni dik kate alınarak ve bu eksen etrafında dönebilecek şekilde düzenlenmesi ile oluşturulan sistem yerine getirmektedir (Baş, 2010).

SİNCAP KAFESLİ ROTOR



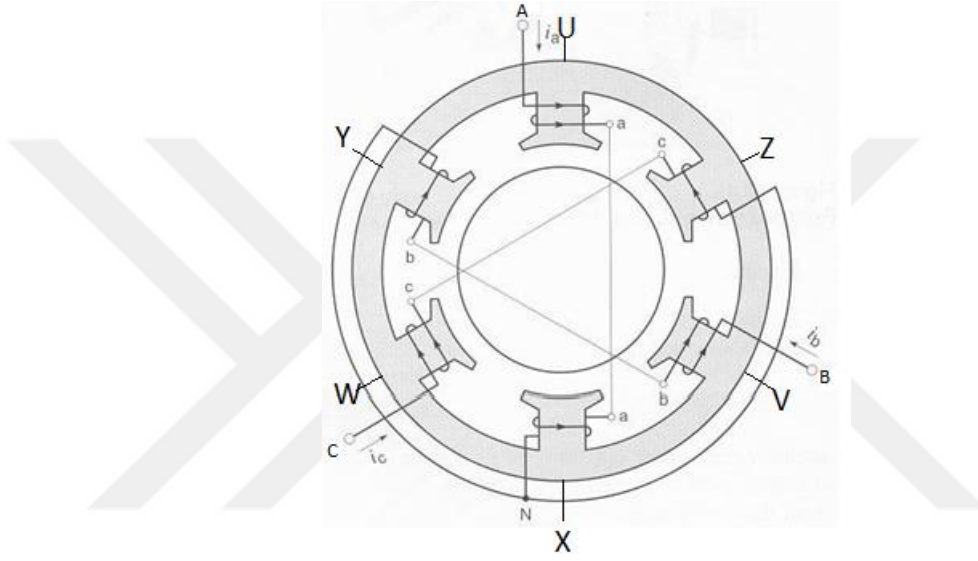
STATOR SARGILARI

Şekil 2.3. Saç paketi oluklarına bobinlerin yerleştirilmesi(Anonim)

Üç fazlı asenkron motorların statorunda yer alan üç adet bir fazlı sargı birbirlerinden 120 derecelik faz farkına sahip olacak şekilde yerleştirilmektedir. Bu üç sargı yıldız veya üçgen bağlanarak, faz sargılarını oluşturan bobinler stator oluklarına şekil 2.3.'te görüleceği üzere yerleştirilmektedir. Birbirlerine seri olarak bağlanan bobinler faz sargısını oluşturmaktadır (Sarioğlu vd., 2003).

Döner Alan

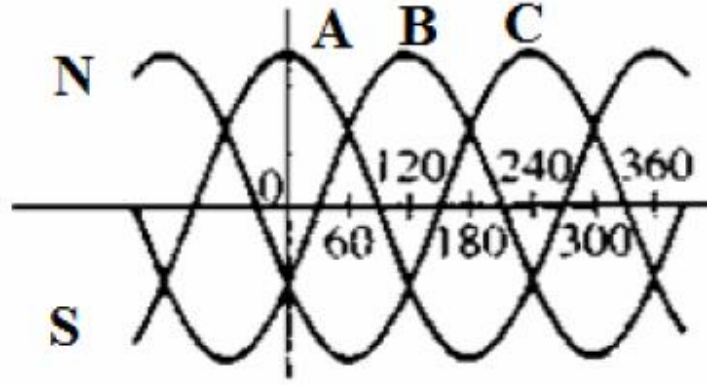
En basit stator dahi her biri bir faza ait olacak şekilde en az 3 bobinli ve 2 kutuplu olmak zorundadır. Stator iki kutuplu olduğundan dolayı bobinlerden her birinin bir kenarı N kutbuna, diğer kenarı ise S kutbunun altına gelecek şekilde yerleştirilmektedir. Bu yüzden bobinlerin iki kenarı arasında 180 derecelik faz farkı vardır. Şekil 2.4.'te görüldüğü üzere birinci fazdaki (A) bobinin başlangıç ucu U, son ucu X; ikinci fazdaki (B) bobinin başlangıç ucu V, son ucu Y ve üçüncü fazdaki (C) bobinin başlangıç ucu W ve son ucu Z ile gösterilmektedir (Saçkan, 1994).



Şekil 2.4. 3 Fazlı asenkron motor bobin diyagramı(Fathizadeh)

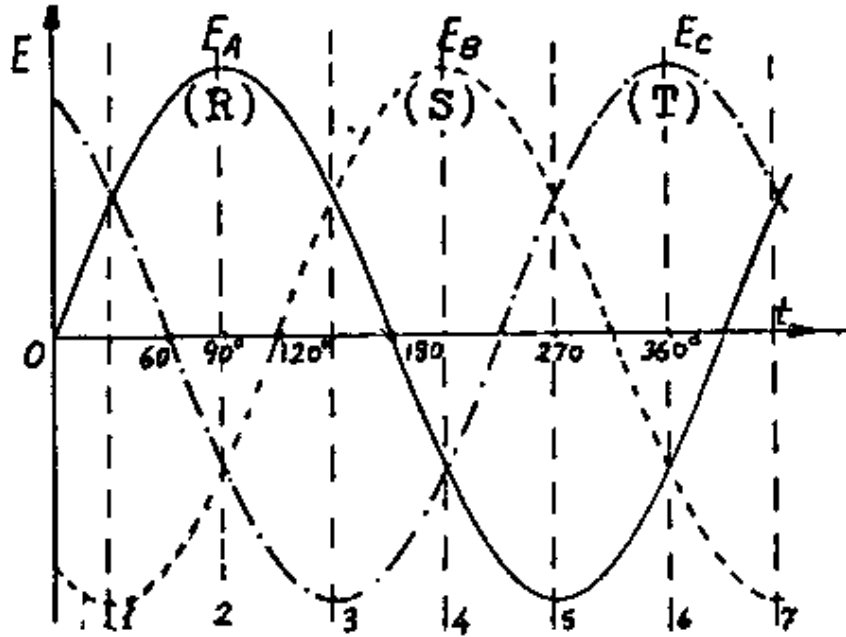
Faz bobinlerinin başlangıç uçları (U,V,W) ile son uçları (X,Y,Z) arasında 120'şer derecelik faz farkı vardır. Özetle; stator sargılarına 3 fazlı sistemden enerji verildiğinde, 3 fazlı sargılardan geçen akımlar değişik zamanlarda maksimum değerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla sargılardan 120 derecelik faz farkıyla geçen akımın oluşturduğu akılar da 120 derece faz farkına sahip olmaktadır (Saçkan, 1994).

Statorun faz bobinlerinden geçen 3 fazlı alternatif akım (ABC), rotorda manyetik akı oluşturmaktadır. Şekil 2.5.'te, rotorda oluşan akının zamana bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Üç Fazlı Manyetik Akı Dalgası (Baş, 2010)

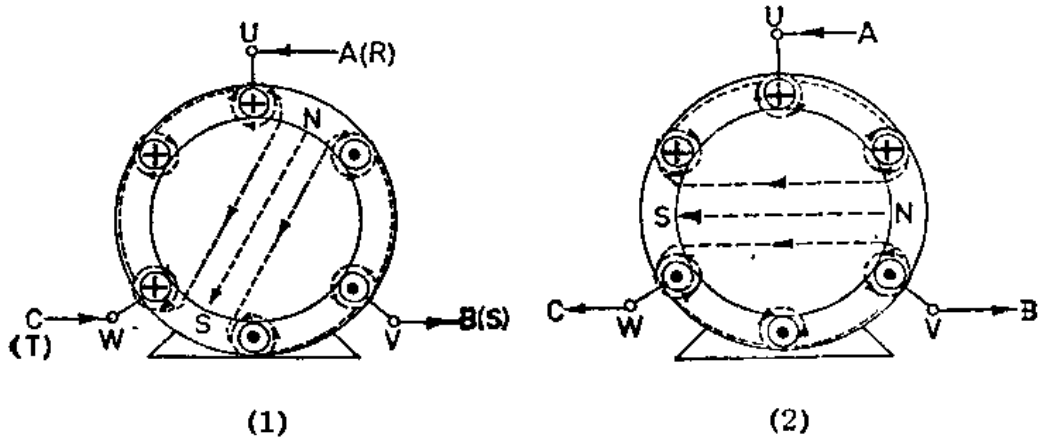
Örneğin, 0 derecede, A fazı N kutbunda maksimum değerdedir. B ve C fazları ise zayıf değerlerdedir. 60 derecede ise C fazı S kutbunda kuvvetli değerde, A ve B fazları ise N kutbunda daha zayıf olur. 120 derecede B fazı N kutbunda kuvvetli, A ve C fazları S kutbunda zayıftır.

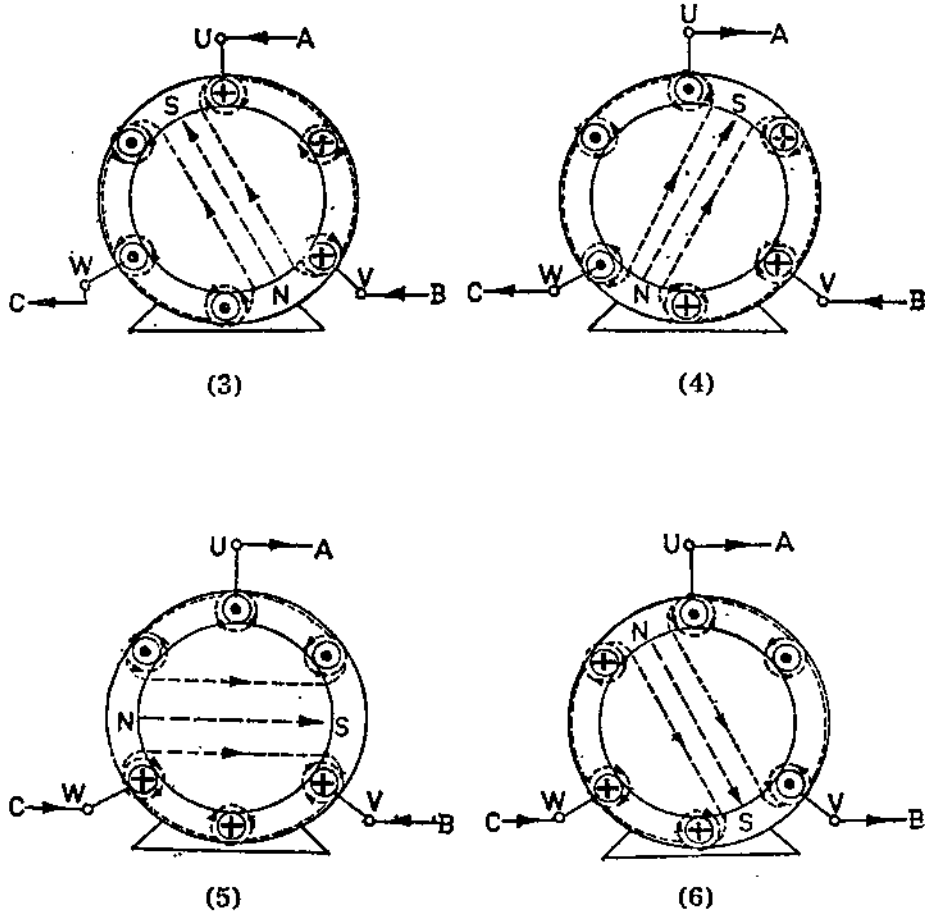


Şekil 2.6. Üç fazlı alternatif akımın değişim eğrisi

Çeşitli zaman değerlerinde, faz bobinlerinden geçen akımların oluşturduğu manyetik alanların yönlerini ve kutuplarını Şekil 1.6.'da inceleyebiliriz. Şekilde de görüleceği üzere işaretli (1) anında A ve C fazlarındaki akımların yönleri pozitif ve B fazının akımı negatiftir. Şekil 2.7.'deki (1) nolu şekilde A ve C fazlarının akım yönleri giriş

ve B fazının akım yönü çıkış olarak belirtilmiş olup; bu akım yönlerine göre her üç faz bobininden geçen akımların yönleri işaretlenmiştir. Bundan sonraki süreçte bobinlerden geçen akımların meydana getirecekleri manyetik alan çizgileri sağ el kuralına göre tespit edilip N-S kutupları belirlenmiştir. 3 fazlı akım değişim eğrilerinde işaretlenen (2) anında A faz akımı pozitif, B ve C faz akımları negatiftir. Şekil 2.7.'deki 2 nolu şekilde A faz akımı giriş, B ve C faz akımları çıkış olarak belirtilmiş olup; bu akım yönlerine göre her üç faz bobininden geçen akımların yönleri işaretlenmiştir. Bundan sonraki süreçte, bobinlerden geçen akımların meydana getirdikleri manyetik alan sağ el kuralına göre tespit edilip N-S kutupları belirlenmiştir.





Şekil 2.7. Çeşitli anlarda stator sargılarından geçen üç fazlı alternatif akımların meydana getirdiği kutuplar

(1) ve (2) nolu şekillerin N-S kutup değişimleri incelendiğinde kutupların saat ibresi yönünde 60 derece döndüğü görülmektedir.

(3),(4),(5) ve (6) anlarında ABC faz bobinlerinden geçen akımların meydana getirdikleri N-S kutupları Şekil 2.7.'deki (3),(4),(5) ve (6) şekillerinde gösterilmiştir. (7) anındaki kutup yönü ile (1) anındaki kutup yönü aynıdır. Söz konusu şekillerin tümü incelendiğinde; N-S kutuplarının saat ibresi yönünde döndüğü görülmektedir.

3 fazlı alternatif akımdaki bir periyotluk değişme N-S kutuplarının tam bir devir yapmasını sağlamaktadır. Alternatif akımın frekansı 50 Hz ise, saniyede 50 periyotluk bir değişim göstermektedir. Dolayısıyla statordaki faz bobinlerinin oluşturduğu N-S kutupları da saniyede 50 devir, dakikada 3000 devir dönmektedir. N-S kutuplarının dönme sayısı ile alternatif akımın frekansı doğru orantılıdır. İki kutuplu bir statorda, döner alanın saniyedeki devir sayısı alternatif akımın frekansına eşittir. 3 fazlı 4 kutuplu bir asenkron motorun devir sayısı ise alternatif akım frekansının yarısına

eşittir. Dolayısıyla, 4 kutuplu asenkron motorun devir sayısı, aynı akım frekansına sahip 2 kutuplu asenkron motorun döner alan devir sayısının yarısıdır. Döner alanın devir sayısına senkron devir de denir. Döner alanın devir sayısı denklem (2.1) ile bulunmaktadır (Saçkan, 1994).

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

n = Motor devir hızı(d/d)

f= Frekans(Hz)

p= Çift kutup sayısı

2.3. Asenkron Motorun Bazı Temel Büyüklükleri

Bu bölümde, asenkron motorun çalışma koşullarını etkileyen; ‘stator akımı’, ‘stator gerilimi’, ‘rotor akımı’, ‘rotor gerilimi’, ‘moment’, ‘kayma’, ‘güç katsayısı’ ve ‘güç’ gibi tanımlar açıklanmaktadır. Şebekeden çekilen alternatif gerilim, stator sargılarında alternatif akım oluşturmaktadır. Sargılarda oluşan bu akım, ‘stator akımı’ olarak tanımlanmaktadır. Şebekeden çekilen alternatif akım, stator sargılarında döner manyetik alan meydana getirmektedir. Döner alanın etkisiyle, stator sargıları ile rotor sargı veya çubuklarında endüksiyon elektromotor kuvveti oluşmaktadır. Statorda oluşan endüksiyon elektromotor kuvveti, şebekeden gelen ‘stator gerilimini’ dengelemektedir. Endüksiyon elektromotor kuvveti ise kısa devreli rotor çubukları üzerinden akım dolaşmasını sağlamaktadır. Rotor çubuklarından geçen bu akıma ‘rotor akımı’ adı verilmektedir. Lenz kanuna göre; rotor akımı ile rotor akımını meydana getiren stator akımı zıt yönlüdür.

Rotorda endüksiyon elektromotor kuvveti oluşabilmesi için stator döner alanının hızı ile rotor devri farklı olmalıdır. Stator döner alanı (senkron devir) hızı ile rotor devir sayısı arasındaki bu fark ‘kayma’ olarak adlandırılmaktadır. Kayma (s) genellikle yüzde olarak ifade edilmektedir. Kayma değeri, asenkron motorun çalışma koşullarına göre değişen bir büyüklüktür.

$$\% s = \frac{n_s - n_r}{n_s} 100 \quad (2.2)$$

s= Kayma

n_s = Senkron devir sayısı(d/d)

n_r = Motor mili devir sayısı(d/d)

Stator sargılarının oluşturduğu manyetik alan ile rotor çubuklarından geçen akımının meydana getirdiği manyetik alan arasındaki etkileşim sonucunda, rotorda dönme kuvveti oluşmaktadır. Rotorda oluşan bu kuvvete 'döndürme momenti' adı verilmektedir. Asenkron motor çalışırken; stator akımı, stator gerilimine göre geri kaldığı için faz farkı oluşmaktadır. Faz farkı açı cinsinden bir değerdir. Faz farkının kosinüsü, asenkron motorun şebekeden çektiği gücü etkilediğinden dolayı güç katsayısı (faktörü) olarak adlandırılmaktadır (Baş, 2010).

2.4. Stator Sargılarında İndüklenen Gerilim

Çift kutuplu (2P) bir asenkron motor için, stator ile rotor arasındaki boşlukta sinüzoidal akı (ϕ) ve döner alanın devir sayısı n_s olduğunu varsayarsak:

İletkenin bir saniyede kestiği akı= $2P\phi n_s/60$ maksvel/saniye (Maxwell) (2.3)

2P= Çift kutup sayısı

Φ = Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²)

Herhangi bir iletken, bir saniyede 10^8 maksvel (1 Weber) akıyı keserse, iletkende indüklenen EMK 1 Volt olacağı için:

$$E_{ort} = \frac{2P\phi n_s}{60 \cdot 10^8} \text{ (volt)} \quad (2.4)$$

E_{ort} = İletkende İndüklenen EMK (Volt)

n_s döner alan değeri için (2.1) denklemini kullanıldığında ise;

$$E_{ort} = 2P f \phi 10^{-8} \text{ (Volt)} \quad (2.5)$$

değerini almaktadır. İletkende indüklenen gerilimin etkin değerini bulmak için E_{ort} sinüzoidal gerilimlerin şekil faktörü 1,1 ile çarpılması durumunda :

$$E_{ort}=2,2Pf\phi\times 10^{-8} \text{ (Volt)} \quad (2.6)$$

olmaktadır. Stator sargılarına yerleştirilen bobinlerde indüklenen gerilim, bir iletkende indüklenen gerilimin iki katıdır (Saçkan, 1994).

$$E_{bobin}=4,4Pf\phi\times 10^{-8} \text{ (Volt)} \quad (2.7)$$

2.5. Rotor Sargılarında İndüklenen Gerilim Ve Rotor Frekansı

Asenkron motor hareketsiz haldeyken, stator frekansı f_s ile rotor frekansı f_r birbirine eşittir. Rotor dönmediği için $n_r=0$ ve denklem (2.2)'ye göre kayma $s=1$ olmaktadır. Rotor senkron dönüş hızındayken, rotor çubukları stator manyetik alanı tarafından kesilemeyeceği için $n_r= n_s$ olmakta; dolayısıyla kayma $s=0$, $f_r =0\text{Hz}$ ve $E_r= 0$ volt olmaktadır.

Rotor frekansı denklem (2.8) ile bulunabilmektedir.

$$f_r = sf_s = \frac{n_s-n_r}{n_s} f_s \quad (2.8)$$

Stator ve rotor sargılarında indüklenen gerilimler arasındaki bağıntı denklem (2.9)'da ifade edilmektedir.

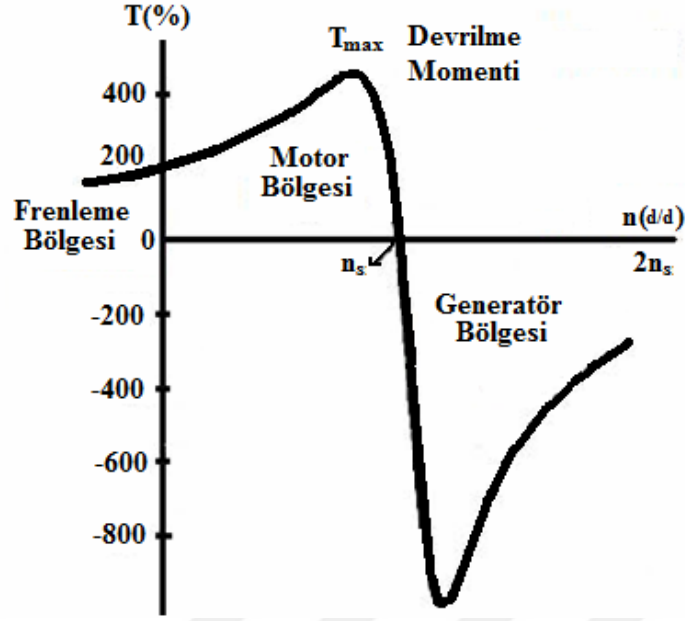
$$E_r=sE_s \quad (2.9)$$

Denklem (2.1) ve (2.9)'da görüleceği üzere, rotor hareket ederken rotor hızı, frekansı ve rotorda indüklenen gerilim, kayma ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

2.6. Asenkron Motorda Rotor Hızı ve Kayma

Asenkron motorun döner alan hızı olan senkron hızı ile rotor hızı hiçbir zaman eşit değildir. Çünkü, indüksiyon ile EMK elde edebilmek için rotor çubuklarını bir elektrik alanın kesmesi gerekmektedir ve rotor senkron hızındayken, rotor çubukları döner alan tarafından kesilememektedir. Rotorda yük olmasa bile, rotorun yenmesi gereken elektriksel ve mekanik dirençler hiçbir zaman sıfır olamayacağı için rotorun üzerinde az da olsa her zaman belirli bir yük vardır. Bundan dolayı rotor her zaman döner alandan daha yavaş döner. Motor miline yük bağlandığında ise rotor hızı daha fazla düşmekte ve rotor çubukları döner alan tarafından daha fazla kesilmektedir. Bu sayede, rotor çubuklarında daha fazla gerilim ve akım indüklenerek moment değeri artmaktadır.

Asenkron motor, dışarıdan uyarım makinesi ile döner alan yönünde ve döner alan hızından daha fazla döndürülürse kayma negatif değer alacaktır. Rotor akısı, stator sargılarında gerilim indükleyeceği için asenkron motor generatör gibi çalışacaktır. Asenkron motor döner alanın tersi yönünde ve senkron hızdan daha düşük hızda dönerse kayma pozitif olacaktır. Rotor kilitli durumda ise ısı kayıpları artarak motor aşırı bir şekilde ısınmaktadır. Motor kilitli haldeyken, stator döner alanı transformatör devresindeki gibi alternatif alanın yerini alarak gerilim indüklemekte ve motor genel olarak transformatör özellikleri göstermektedir. Şekil 2.8.'de kaymanın rotor dönme hızına göre değişimi verilmektedir (Baş, 2010).

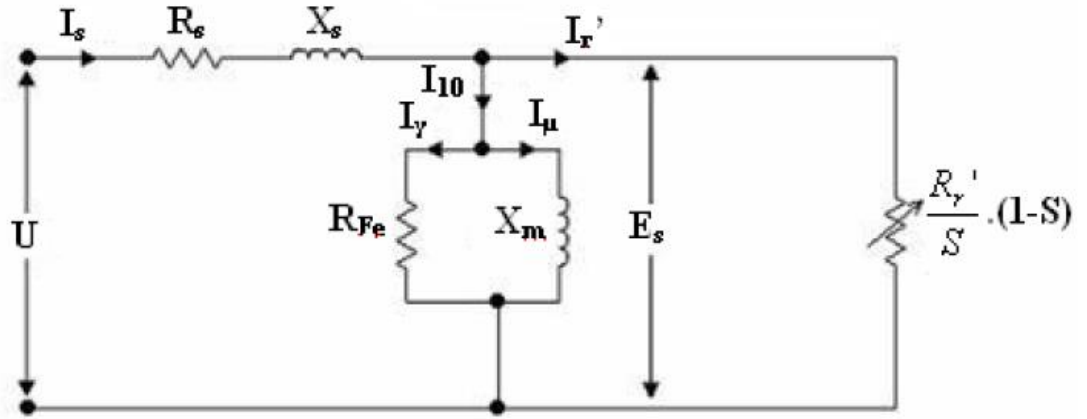


Şekil 2.8.Kaymanın (s) rotor dönme hızına göre değişimi

2.7. Asenkron Motorun Boşta Çalışması

Kısa devre rotorlu veya sargılı rotorlu asenkron motorun stator sargılarına 3 fazlı alternatif akımı yüklediğimizde, stator sargılarında döner manyetik alan meydana gelmektedir. Bu sayede rotor, döner alanın yönünde n_r devri ile dönmektedir. Motor miline herhangi bir yük yüklenmediğinde ise rotorun devri döner alanın devrine çok yakın olmaktadır. Rotorun serbestçe dönebildiği bu duruma asenkron motorun boşta çalışması adı verilmektedir (Saçkan, 1994). Rotorun boşta çalışması durumunda rotor iyice senkron hıza yaklaşmaktadır. Ancak sürtünme kayıplarından dolayı hiçbir zaman senkron hıza ulaşamamaktadır. Rotor boşta çalışırken çok küçük kayma ($s \approx 1$) ile yani senkron hızdan %1 daha düşük bir hızda dönmektedir. S kayma ile dönen asenkron motorun rotorunda indüklenen EMK değeri, denklem (2.9)'a göre hesaplanmaktadır. Denklemden de görüleceği üzere, asenkron motor boşta çalışırken rotor sargısından çok küçük bir gerilim indüklenmekte ve dolayısıyla rotor sargılarından çok küçük bir akım geçmektedir. Asenkron motorun rotor sargısından geçen bu akım, boşta çalışmada sadece sürtünme (hava, yatak, fırça sürtünmeleri) ve demir kayıplarına karşılık gelen kayıp momenti karşılamaktadır.

Motor şebekeden statorun demir ve rotorun sürtünme kayıplarını karşılamak için küçük değerde Wattlı akım çeker. Şekil 2.9.'da görülen I_γ akımı boşa çalışma akımının enerji bileşenidir. Boşa çalışmada kayma küçük olduğundan, rotorda pratik olarak demir kayıpları (R_{FE}) yok denecek kadar azdır. Motorun boşa çalışma sırasındaki güç katsayısı 0,1-0,2-0,3 gibi çok küçük bir değere sahiptir (Baş, 2010).



Şekil 2.9. Rotor direnç ve reaktansı ihmal edilmiş asenkron motorun eşdeğer devresi

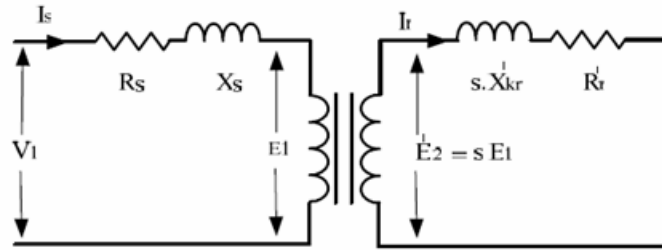
Asenkron motorun boşa çalışma deneyi ile sürtünme ve demir kayıpları bulunabilmektedir. Boşa çalıştırılan motorun şebekeden çektiği güç doğrudan kayıpları vermektedir. Çünkü motorun milinden alınan güç sıfırdır. Sadece yatakların sürtünmesinden ve pervanelerin hava ile sürtünmesinden dolayı sabit bir mekanik kayıp oluşmaktadır. Stator sargılardan geçen 3 fazlı alternatif akımın meydana getirdiği döner alan, stator nüvesinde demir kayıpları olarak da tanımlanan fuko ve histerezis kayıplarına neden olmaktadır. Boşa çalışırken döner alanın rotor nüvesini kesme hızı çok düşük olduğu için rotordaki demir kayıpları sıfır kabul edilmektedir. Ayrıca rotor kısa devre çubuklarından akım geçmediği için rotor bakır kaybı sıfır kabul edilebilmektedir. Stator sargılarından geçen faz akımları bakır sargıların etkin faz dirençlerinden dolayı ısı kaybı oluşmaktadır. Tüm bu bilgilere göre, asenkron motorun boşa çektiği güç değeri, stator demir ve stator bakır kayıpları ile sürtünme kayıplarının toplamına eşit olmaktadır (Saçkan, 1994).

2.8. Asenkron Motorun Yüklü Çalışması

Boşta çalışan asenkron motorun miline yük bindirdiğimizde, %1 kayma değeri artmakta ve rotorun devir hızı azalmaktadır. Bunun sebebi ise, bütün tahrik makinalarında olduğu gibi yükün artmasıyla birlikte motorun, kendisinden istenen enerji talebini dönen ekipmanların kinetik enerjisinden karşılamasıdır. Rotor dönüş hızının azalmasıyla birlikte döner alanın rotor sargılarını kesme hızı artmaktadır. Bundan dolayı, rotorda indüklenen faz EMK ve rotordan geçen faz akımları artmaktadır.

$$Z' r = R' r + j_s X' k r \quad (2.10)$$

Rotor akımının artmasıyla birlikte rotor kutuplarındaki manyetik akı da artmakta ve döner alan kutuplarının oluşturduğu manyetik akılar azalmaktadır. Hava aralığında meydana gelen döner manyetik akının azalmasıyla birlikte stator sargılarının şebekeden çektiği akım artmakta ve stator sargılarında indüklenen EMK azalmaktadır. Özetle, motor miline yük bindikçe motorun şebekeden çektiği faz akımları artmaktadır.



Şekil 2.10. Asenkron Motorun Yüklü Durumdaki Eşdeğer Devresi

Kayma değeri asenkron motorun milinden alınan döndürme momentine bağlıdır. Çok büyük olmayan yüklerde de yaklaşık olarak döndürme momenti ile doğru orantılıdır (Baş, 2010).

2.9. Asenkron Motor Denklemleri

f = Frekans

p = Çift kutup sayısı

n_s = Senkron devir sayısı(d/d)

P_g = Motorun şebekeden çektiği güç(Watt)

$P_ç$ = Dışarıya verilen mekanik güç(Watt)

T = Motor milinde ölçülen moment(Nm)

w = Açısal hız(rad/san)

η = Verim

φ = Güç Faktörü

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad (2.11)$$

$$P_g = \sqrt{3}VI \cos\varphi \quad (2.12)$$

$$w = 2\pi \frac{n_s}{60} \quad (2.13)$$

$$P_ç = T w \quad (2.14)$$

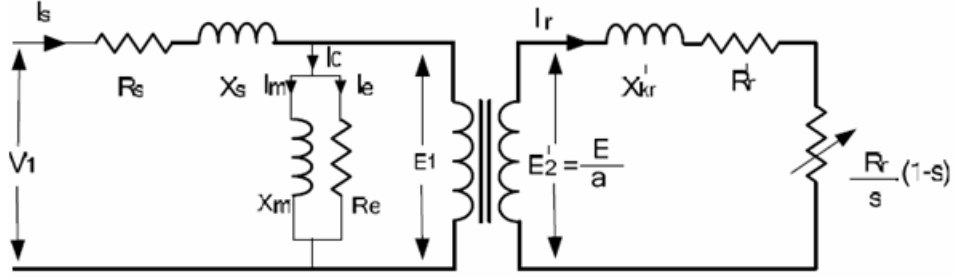
$$\eta = \frac{P_ç}{P_g} \quad (2.15)$$

2.10. Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi

Asenkron motorların eşdeğer devresinin bilinmesi durumunda; asenkron motorun gücü, döndürme momenti, kalkınma akımı, güç katsayısı ve yüke göre verim hesabı kolaylıkla yapılabilmektedir. Rotoru dönen bir asenkron motorun eşdeğer devresini çizebilmek için öncelikle gerilim denklemleri ile mıknatıslama akımına ait bağıntılar

göz önünde bulundurularak stator ve rotor akım devreleri ile primer-sekonder arasındaki manyetik halkalanmanın belirtilmesi gerekmektedir (Altıntaş).

Üç fazlı statorda bir fazın etkin direnci R_s , kaçak reaktansı X_s , dönüştürme oranı (a), mıknatıslanma akımı I_m , stator demir kayıpları I_e olduğunu varsayarak Şekil 2.11.'de gösterilen rotor eşdeğer devresi çizilebilmektedir.



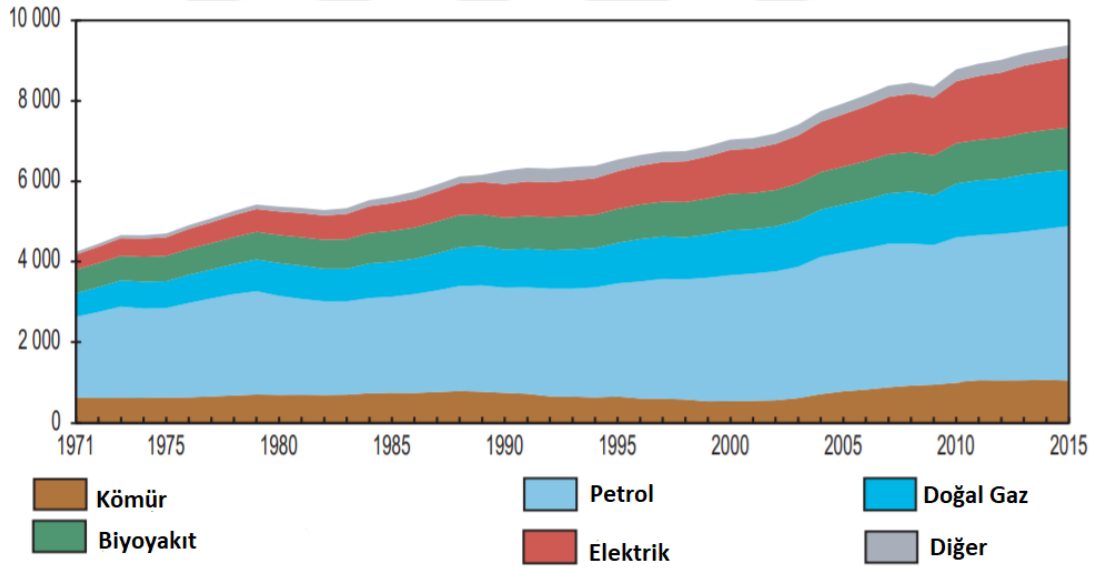
Şekil 2.11. Stator ve rotor eşdeğer devrelerinin ayrı ayrı gösterilmesi.

Asenkron motorlarda hava aralığından kaynaklı olarak I_m mıknatıslanma akımı çok büyük değerdedir. I_e değeri ise I_m akımına göre küçük değerdedir.

3. ASENKRON MOTOR ENERJİ VERİMLİLİĞİ

3.1. Enerji Verimliliği Neden Önemlidir?

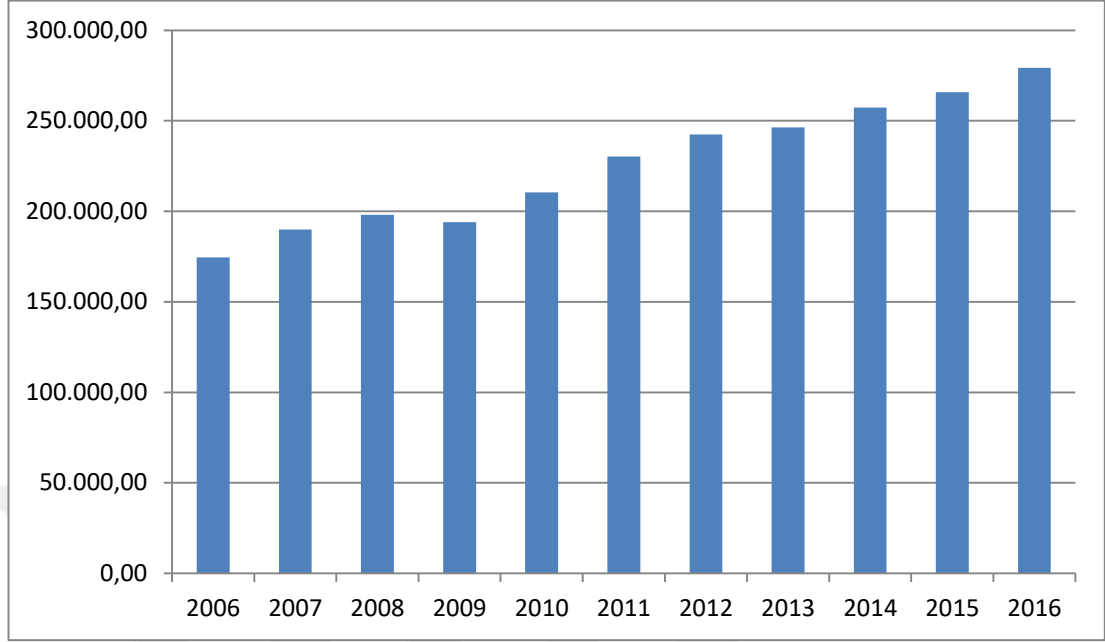
Enerji, 20. Yüzyıldan itibaren ülkelere rekabet üstünlüğü sağlayan en önemli unsurlardan birisi olmuştur. İçinde bulunduğumuz yüzyılda ise, teknolojik yenilikler, küreselleşmeden kaynaklı uluslararası geçirgenliğin artması, sermaye hareketleri ile sınırların belirleyiciliğinin azalması, haberleşme teknolojilerinde meydana gelen muazzam atılımlar ile birlikte dünya genelinde enerji tüketimi artmıştır. Ancak, yüksek enerji tüketiminden kaynaklı olarak sera gazı emisyonlarının ozon tabakasını inceltmesi, fosil yakıtların hızla tükenmesi sebebiyle; ülkeler ve uluslararası kuruluşlar, güvenli, çevre dostu, enerji arz güvenliği riskini indirgeyen enerji politikaları üzerinde araştırma yapmaktadırlar (Kavak, 2005)



Şekil 3.1. Dünya enerji tüketimi(Milyon TEP)

TEİAŞ tarafından Türkiye'nin 2016 yılı itibariyle toplam elektrik enerjisi talebi 279.286,4 GWh olarak belirtilmiştir (Anonim).

Ancak 2023 ekonomi hedefini destekleyecek enerji kaynaklarına bakıldığında enerji dışı bağımlılığımızın çok yüksek oranlarda olduğu bilinmektedir.

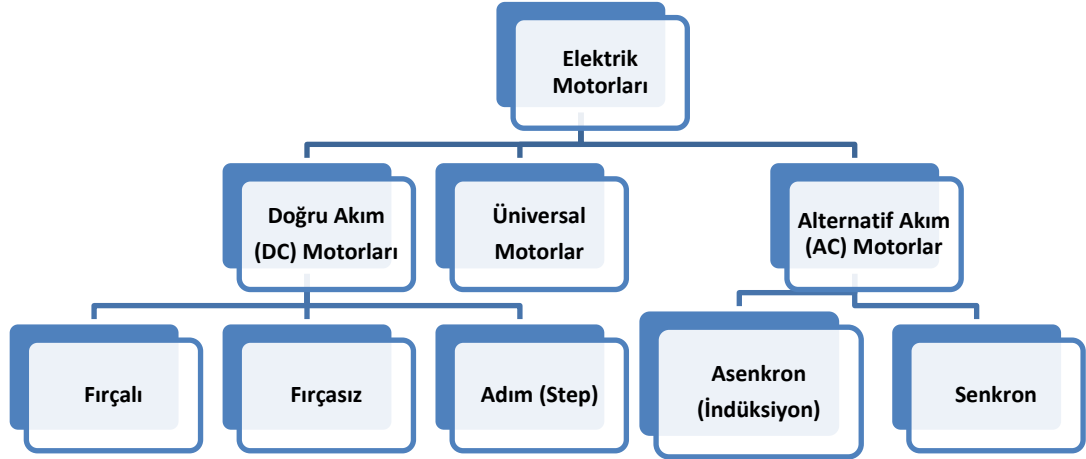


Şekil 3.2. Türkiye elektrik enerjisi brüt talep değişimi(GWh)

Toplam enerji tüketimindeki ithal kaynakların oranı 2012 yılına göre(%71,5) artış göstererek 2013 yılında %73,5 oranına yükselmiştir. Önümüzde ki yıllarda ise dışı bağımlılık oranının gittikçe artacağını söyleyebiliriz. Çünkü 1990'dan 2013'e toplam enerji ithalatı % 211,62 artarken; yerli üretimdeki artış % 24,78 ile sınırlı kalmıştır(Anonim).

3.2. Asenkron Motorlarda Enerji Verimliliği

Uluslararası Enerji Ajansı tahminlerine göre dünya çapındaki toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %45'i elektrik motorları kaynaklıdır. Sanayi sektöründeki toplam elektrik tüketiminin ise yaklaşık %65'i elektrik motorlardan kaynaklanmaktadır. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik motorların sanayide kullanımı; pompalar, fanlar, kompresörler, değirmenler, taşıma sistemleri, mermer kesme makinaları gibi çeşitli makine ve teçhizatla kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Elektrik motoru çeşitleri

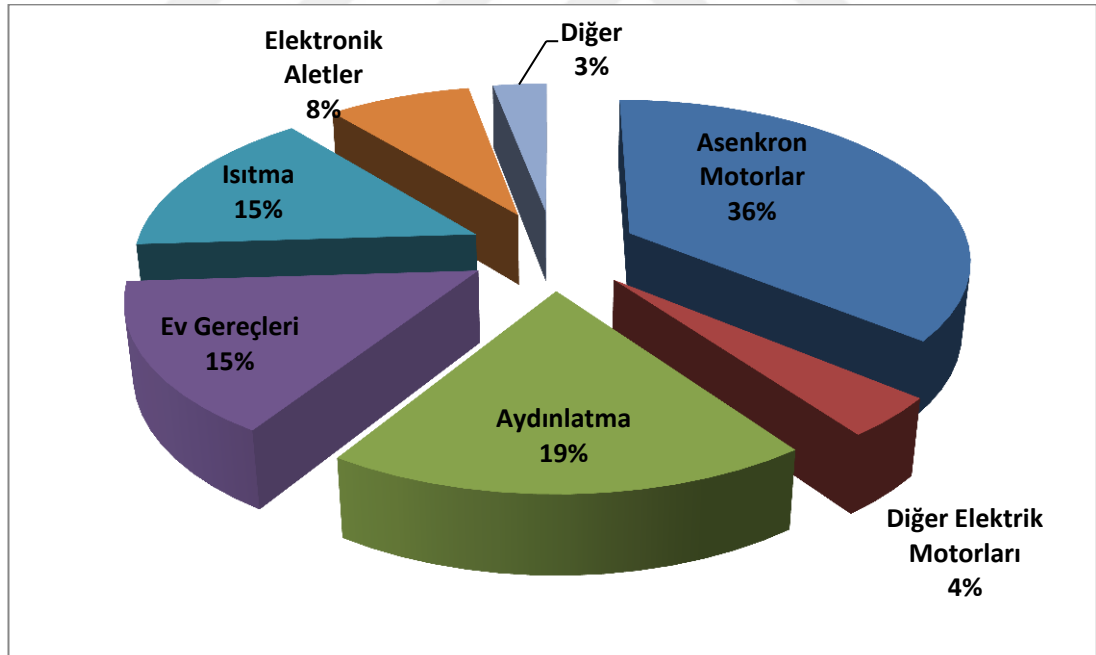
Ancak elektrik motorları şebekeden çekilen tüm elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürememektedir. Şebekeden çekilen elektrik enerjisinin bir kısmı dönüşüm esnasında sürtünme, rotor-stator kayıpları gibi sebeplerden dolayı ısı olarak kaybolmaktadır. Öyle ki enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturan standart alçak gerilimde çalışan orta boyutlu motorlarda (0,75 kW- 375 kW) en verimli motorlar, en az verimli motorlara kıyasla %30 enerji tasarruf edebilmektedir. Elektrik motorların yaşam boyu maliyetinin yaklaşık %97'sini elektrik tüketim maliyeti oluşturmasından dolayı, verimsiz motorlardan ziyade daha verimli bir motor kullanmak iyi bir iş önermesidir. Sürekli olarak çalışan elektrik motorları 1 yıldan az bir sürede, diğer çalışma koşullarındaki motorlar ise 2-3 yılda kendini geri ödemektedir. Elektrik motorlarının 20 yıla kadar çalışma ömrüne sahip olduğu göz önüne alındığında, verimli bir elektrik motorun kullanılması çok mantıklı bir yatırımdır.

Tüm bu sebeplerden dolayı BM'nin "Herkes için Sürdürülebilir Enerji (SE4ALL)" girişimine göre; enerji verimli elektrik motorlar ile motor güdümlü sistemlerin kullanılmasının, ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltma, önemli ekonomik yararlar ve refah yaratma potansiyeline sahip yüksek etkiye sahip bir fırsat olarak tanımlanmıştır. Söz konusu çalışmaya göre, tüm dünyada elektrik motorlarının en

verimli uygulamaları benimsenirse 2030 yılına kadar 322 TWh elektrik ve 206 Mt CO2 emisyon tasarrufu sağlanabilecektir.

Yukarıda belirtilen fırsatın farkına varan gelişmiş ülkeler tarafından sanayi sektörüne yönelik motor dönüşüm programları yürütülmekte ve sonuçları izlenmektedir. Özellikle ABD, Kanada, İsviçre, Hollanda ve Almanya bu alanda ciddi araştırmalar yapan ülkelerdendir. Dünya çapında motor üreticilerinin yaklaşık üçte birine sahip Çin'de ise motor dönüşüm uygulamaları konusunda son birkaç yıldır önemli çalışmalar yürütülmektedir (Mete, 2017).

Asenkron motorlar ise ucuz olmaları, az bakım gerektirmeleri, çalışmaları sırasında ark oluşturmamaları, birkaç Wattan 3500 kW'a kadar imal edilebilmeleri, çeşitli fazlarda yapılmaları, momentlerinin yüksek olması ve teknolojiadaki gelişmeler sonucunda devir sayılarının çok geniş sınırlar içinde değiştirilmesi nedeniyle endüstride en çok kullanılan elektrik motor çeşididir (Anonim). Bu avantajlarından dolayı Türkiye'de; toplam net elektriğin yaklaşık %36'sı, sanayi elektriğinin yaklaşık %70'i üç fazlı asenkron motor sistemleri tarafından tüketilmektedir.



Şekil 3.4. Türkiye'deki enerji talebi kullanım oranları

Türkiye'de elektrik motorlarında kullanılan enerjinin % 90'ı asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Bundan dolayı asenkron motorlarda enerji tasarrufu sağlanarak Türkiye'nin enerji tüketimi ciddi oranlarda azaltılabilir. Öyle ki elektrik

motor sistemlerinde enerji verimliliğinin artırılması ile elde edilecek kaynak, 2 adet Keban Barajından üretilecek enerji ile eşdeğerdedir(Anonim).

3.3. Motorda Meydana Gelen Enerji Kaybı ve Verimlilik Tanımı

Asenkron motorlarda enerji verimliliğini arttırmak için genel olarak aşağıda belirtilen konuların incelenmesi gereklidir:

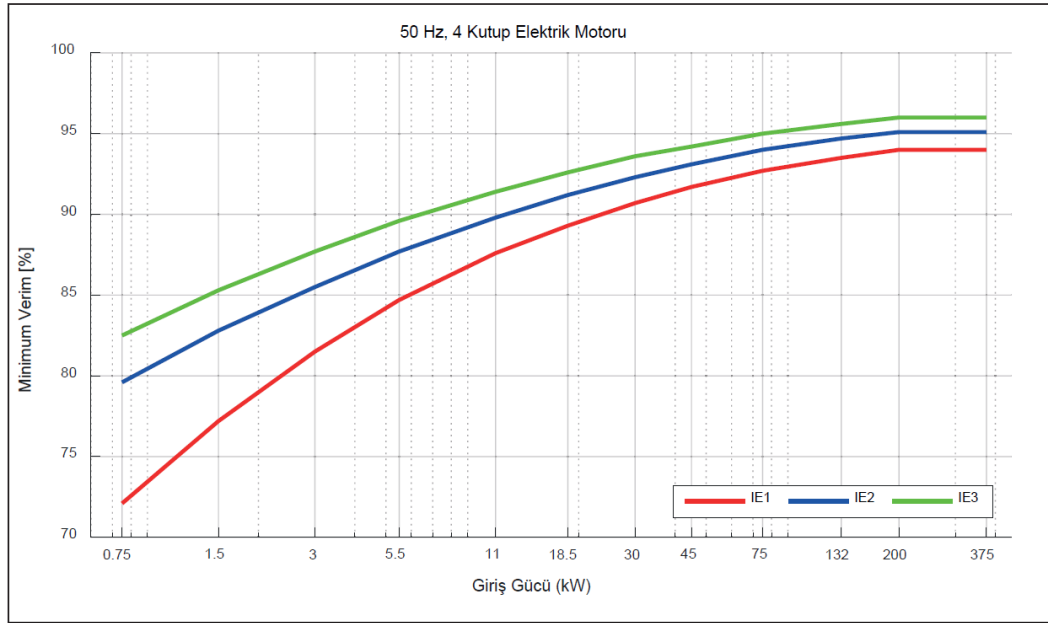
- a. Değişken hızlı motorlar ile % 10-50
- b. Verimli motor sınıfı kullanımı ile % 2-8
- c. Uygun motor seçimi ile % 1-3
- d. Kaliteli enerji besleme ile % 0.2-3
- e. Sistemlerde değişiklik ile % 2-10 civarlarında enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir.

Belirtilen oranlar prosesin durumu ve motorun çalışma koşullarına göre oldukça değişiklik gösterebilir (Fathizadeh).

a. Değişken Hızlı Motor Sürücülere: Motordaki yüke göre alternatif akımın frekansını ve dolayısıyla motorun dönüş hızını ve gücünü kontrol ederek motoru optimum devirde tutan değişken hız sürücülere kullanarak enerjide tasarrufu sağlanabilmektedir. Söz konusu sürücüler, elde edilen enerji tasarrufuyla kendini 1-2 yıl içerisinde amorti edebilmektedir.

b. Verimli Motor Sınıfı Seçimi: Avrupa Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği İmalatçıları Komitesi (CEMEP) tarafından 2001 yılında ilan edilmiş olan verim sınıfları, 2009 yılında kabul edilen yeni IEC standardı ile güncellenmiştir. 2012 yılında yürürlüğe giren IEC 60034-30 standardında belirtilen verim sınıflarının anma gücüne göre değişimi şekil 3.5.'te görülmektedir

- IE3 Premium
- IE2 Yüksek Verimli
- IE1 Standart Verimli (Anonim)



Şekil 3.5. IE sınıflarının sağlaması gereken verimlilik alt sınırları (Çatalbaş vd., 2017)

Verimliliğin bu şekilde sınıflandırılması; işletmelerdeki teknik sorumlular için motor seçiminde büyük kolaylık sağlamaktadır. Burada somut bir örnek olması açısından tesisindeki tüm eski model AC motorları yenilemek isteyen bir işletme sahibi; IE3 sınıfı motorları satın alarak hem işletmesindeki AC motor verimlilik sınıfını en üst seviyeye çıkaracak hem de enerji tüketimini azaltacaktır.

22 kW, 1500d/dk senkron hıza sahip Siemens marka bir AC motorunun IE1/IE2/IE3 sınıfları için verimlilik açısından kıyaslayacak olursak :

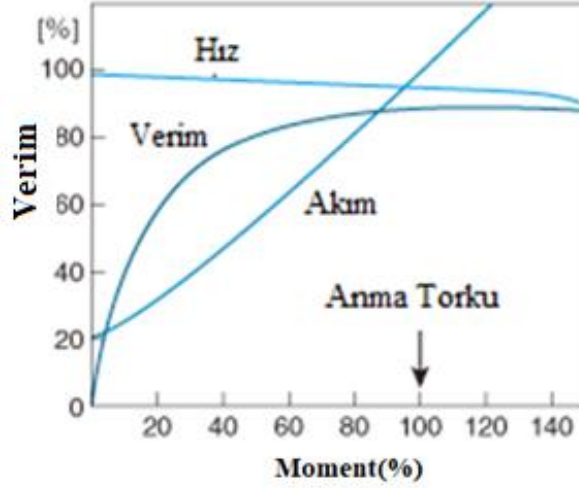
IE1 motor verimi = %89,9

IE2 motor verimi = %91,6

IE3 motor verimi = %93,0 olduğunu görürüz.

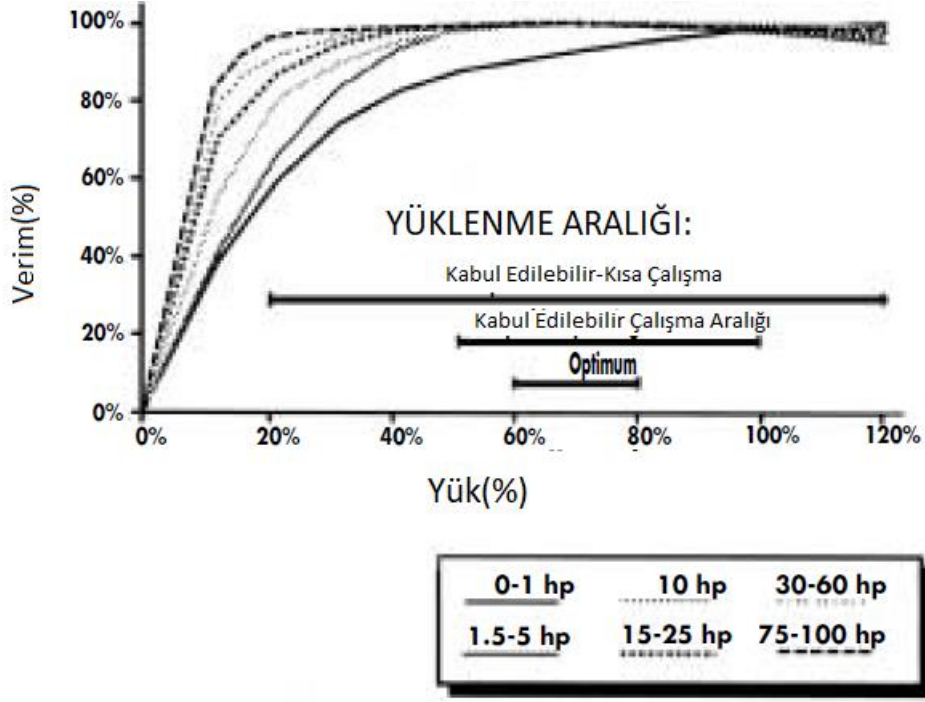
Daha verimli elektrik motorlarının düşük verimli motorlar ile değiştirilmesi ile enerji kaybı düşmekte ve dolayısıyla işletme masrafları azalmaktadır. Ayrıca yüksek verimli motorlarda ısı kaybının az olmasından dolayı motor ömrü daha uzun olmaktadır (Anonim).

c. Uygun Motor Seçimi: Motorlar yüke uyumlu olarak seçilmeli ve aşırı ihtiyatlı davranıp gereğinden büyük motor seçme alışkanlığından vazgeçilmelidir. Böylelikle motorların plakalarında yazılı anma güçlerine göre düşük güçte ve dolayısı ile düşük verimde çalışmaları önlenmelidir (Anonim).



Şekil 3.6. Sincap kafesli asenkron motorun yüklenme karakteristiği

Elektrik motorların çoğunluğu %50 ile %100 arasında değişen anma yük oranlarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Örneğin 10 hp gücündeki bir elektrik motorun makul yük aralığı 5 ila 10 hp arasındadır. En verimli çalıştığı yük değeri ise 7,5 hp'dir. %50 yük değerinin altında, motor verimliliği dramatik bir şekilde düşmektedir. Ancak şekil 3.7.'de görüldüğü üzere motor güçlerine göre optimum verimliliğe sahip yük aralıkları da değişmektedir. Motor gücü arttıkça optimum verimlilik aralığı da genişlemektedir. Eğer motordaki yük değeri azalırken ani şekilde verimlilikte düşüş yaşıyorsa motorun düşük yükte çalıştığı söylenebilir. Aşırı yükte çalışan motorlar ise normalden fazla ısınarak verimin düşmesine neden olur. Bu nedenle motorların verimli olabilmesi için optimum yük değerlerinde çalışması gerekmektedir(Anonim).

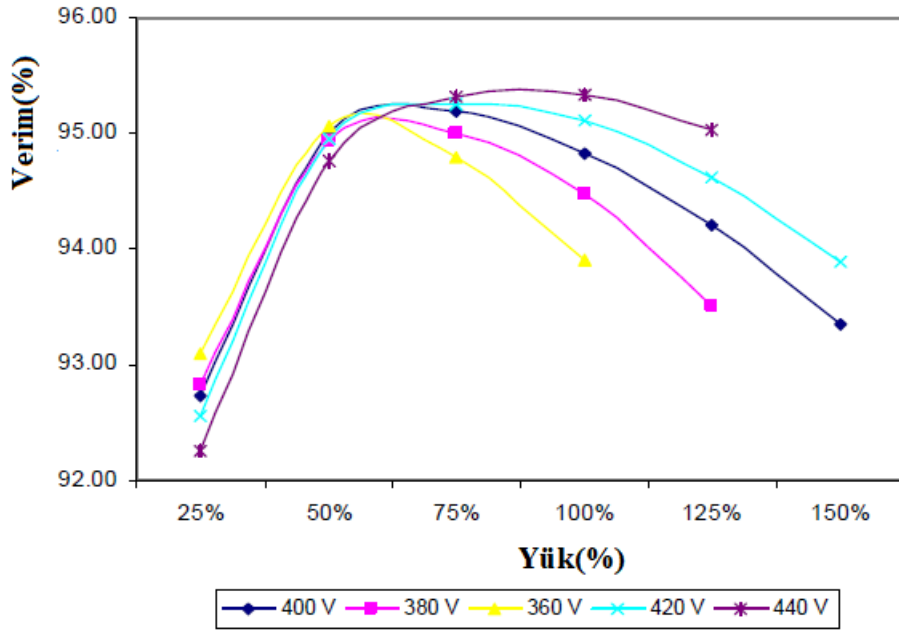


Şekil 3.7.Farklı güç değerlerine sahip motorlar için yük/verimlilik grafiği

d. Kaliteli Enerji Besleme:

Güç Kalitesi (Gerilim Dengesizliği): Şebekeden çekilen gücün kalitesini belirleyen gerilim dengesizliği ve dalgalanması, asenkron motorların kayıplarını, dolayısıyla enerji verimliliğini önemli derecede etkileyen faktörlerdir. Standart test koşullarında hesaplanan motor verimleri ise idealize edilen şebeke gerilimi için ölçülmektedir.

Avrupa'da, şebekeye verilen 3 faz sanayi elektriğinin gerilimi 380-415 volt arasında değişmekte olup genel kullanım 400 voltur. Standart motorlar ise 380-420 volt aralığında ve %5 tolerans değeri gözetilerek tasarlanmaktadır. Şekil 3.8'de şebekeden çekilen gerilime göre verim değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere aynı yük için şebeke gerilimi arttırılırsa verim azalmakta veya artmaktadır. Bu yüzden şebekeden çekilen gerilim ile verim arasında basit bir ilişki kurulamamaktadır(Zhang vd., 2011).



Şekil 3.8. Şebeke geriliminin motor verimine etkisi((Zhang vd., 2011))

Gerilim dengesizliği motor verimliliğini olumsuz yönde etkilediği gibi vibrasyon ve mekanik vuruntular yaratacağı için motor ömrünü de kısaltmaktadır.

Çizelge 3.1. Gerilim dengesizliğinin motor verimine etkileri

Motor Yüğü (%)	Gerilim Dengesizliği		
	Nominal	% 1	% 2,5
100	%94,4	%94,4	%93,0
75	%95,2	%95,1	%93,9
50	%96,1	%95,5	%94,1

Çizelge 3.1.'de görüleceği üzere, şebekeden çekilen gerilim dengesizliği arttıkça asenkron motorun verimi de azalmaktadır.

Güç Kalitesi (Gerilim Dalgalanması): Motorlar, işaret plakasındaki gerilimin %10'undan daha farklı bir gerilimde çalıştırılmamalıdır. Yüksek gerilimler motor sıcaklığını, hızı ve titreşimi olumsuz yönde etkilemektedir. Düşük gerilimler ise, yol verme sırasında motorun aşırı yüklenmesine sebep olabilmektedir.

Çizelge 3.2. Gerilim değişiminin motor verimine etkileri(Anonim)

Çalışma Karakteristiği	Gerilim Değişiminin Etkisi		
	%90 Gerilimde	%110 Gerilimde	%120 Gerilimde
Tam Yükte	%0,5-1 artar	%1-4 azalır	%7-10 azalır
$\frac{3}{4}$ Yükte	%1-2 azalır	%2-5 azalır	%6-12 azalır
$\frac{1}{2}$ Yükte	%2-4 artar	%4-7 azalır	%14-18 azalır

Bir asenkron motor yükte çalışırken elektrik şebekesinden belirli bir miktar enerji çekmektedir. Enerjinin bir kısmı ısıl kayıp olarak açığa çıkarken büyük oranda ise kullanılabilir mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Motor verimliliğinin bulunması için toplam enerji kaybının hesaplanması gerekmektedir. IEE Std-112 bölüm 5'e göre tanımlanmış 5 farklı enerji kaybı türü mevcuttur:

- 1) Stator bakır kaybı (P_s)
- 2) Stator demir kaybı (P_{core})
- 3) Kaçak yük kaybı (P_{LL})
- 4) Rotor bakır kaybı (P_r)
- 5) Sürtünme ve vantilasyon kaybı (P_{fw})

İlk üç madde de yer alan enerji kayıpları motorun stator kısmında, diğer iki madde ise enerji hava aralığından rotora aktarılırken meydana gelmektedir (Anonim). Sincap kafesli asenkron motorların toplam mekanik kaybını (P_{fw}) oluşturan etmenler; yataklardaki sürtünme kaybı, rotorun hava sürtünme kaybı, dış üniteye yer alan motor soğutma fanının çalışma kaybı ile rotor çubuklarını soğutan fanın çalışma kaybından oluşmaktadır. 2 kutuplu sincap kafesli asenkron motorların mekanik kayıpları, 4 ve 6 kutuplu asenkron motorlara göre daha fazladır. Bunun sebebi ise, sargıların indüklenme başlangıcında 2 kutuplu motorların yüksek devir hızına sahip olmasıdır. Asenkron motorların mekanik kayıplarının büyük bölümü dış üniteye yer alan motor soğutma fanı kaynaklıdır. Bundan dolayı, mekanik kayıpları azaltmak için soğutma fanının boyutu ve kapasitesi küçültülmelidir. Ancak, motor soğutma fanı hiç hesap yapılmadan, rasgele şekilde küçültülürse motor sıcaklığı çok fazla artarak arızalara neden olacaktır. Bundan dolayı, motor soğutma fanı büyüklüğü belirlenirken ve motor tasarlanırken, motor soğutma ihtiyacı ile mekanik kayıplar dikkate alınmalıdır (Junkim vd., 2013)

$$P_{tk} = P_G - P_{\zeta} \quad (3.1)$$

$$P_{tk} = P_s + P_r + P_{core} + P_{fw} + P_{LL} \quad (3.2)$$

P_G ve P_{ζ} motordaki giriş ve çıkış güçlerini, P_{tk} ise toplam motor kaybını tanımlamaktadır.

1) Stator bakır kaybı: Stator bakır sargılarında meydana gelen I^2R kaybına karşılık gelmektedir. 3 fazlı motorlarda bu kayıp $1,5 \cdot I^2R$ olarak gerçekleşmektedir. Yüke bağlı olarak değişen stator akımının karesi ile doğru orantılıdır.

2) Stator demir kaybı: Yükten bağımsız, ama giriş gerilimine göre değişen bir kayıptır. Motordaki manyetik akının karesine göre değişmekte, dolayısıyla giriş geriliminin karesine göre artmakta veya azalmaktadır.

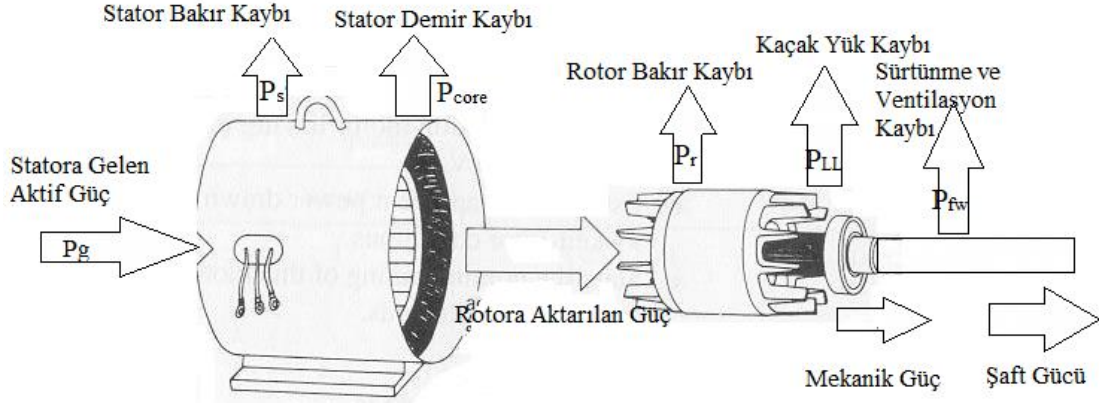
3) Kaçak yük kaybı: Yüke bağlı olarak değişim gösteren kayıpları tanımlayan genel bir kategoridir. 2500 hp ve üzeri güçteki motorlar için tam yük çıkış gücünün %0.9'u olarak belirlenebilir.

4) Rotor bakır kaybı: Kayma değerine göre değişim göstermektedir.

5) Sürtünme ve vantilasyon kaybı: Büyük güçlü çoğu elektrik motorunun sabit bir kaybı olduğu söylenebilir. Mekanik aksamların dönmesi sırasında meydana gelen sürtünme ile motorun fan ile soğutulması sırasında harcanan güce karşılık gelmektedir. Sürtünme ve vantilasyon kayıpları boşta çalışma deneyi ile hesaplanabilmektedir (Habetler vd., 2006;Becnel vd., 1987).

Verim, asenkron motorun şebekeden çektiği gücün yüzde kaçını motorun milinden mekanik güç olarak aktardığı olarak tanımlanmaktadır. Verim giriş gücünün çıkış gücüne oranı şeklinde hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{P_{\zeta}}{P_g} 100 \quad (3.3)$$



Şekil 3.9. Asenkron motor enerji kayıpları (Fathizadeh)

3.4. Asenkron Motor Verimlilik Tahmin Yöntemleri

Yıllar içerisinde çeşitli kullanım amaçları için birçok motor verimlilik tahmin yöntemi önerilmiştir. 1990'lı yıllardan önce yapılan laboratuvar denemeleri ile motor verimlilik hesaplamaları için önemli kaynak biriktirilmiştir. 1996 yılında Amerika Enerji Departmanı (DOE) desteğiyle Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı içerisinde kurulan araştırma ekibi tarafından daha önce önerilmiş 28 verimlilik tahmin yöntemi zorluk derecesi ve ekipman gideri bakımından incelenmiştir. Araştırma ekibi tarafından hazırlanan raporda zorluk derecelerine göre 3 en iyi yöntem önerilmiştir. Ancak teknolojiye yaşanan gelişme ile sensörsüz hız ve stator direnç tahmin yöntemlerinde gelişme yaşanmış ve söz konusu raporda belirtilen test prosedürleri ve ölçümleri gereksiz hale gelmiştir.

Bu bölümde anlatılan motor verimlilik yöntemleri basit temel bir algoritmayı veya birbirinden farklı algoritmaların kombinasyonu şeklinde olabilmektedir. Literatür içerisinde yer alan tahmin yöntemleri, zorluk ve doğruluk derecelerine göre sınıflandırılmaktadır. Zorluk dereceleri belirlenirken, tahmin yöntemleri için gerekli bilgi miktarı, ölçüm cihazı giderleri, bilgi toplama şekli ve motor kullanım şekline bakılmaktadır. Doğruluk yüzdesi hesaplanırken ise doğrudan ölçülen motor mili momenti ve rotor hızı değeri kullanılarak hesaplanan verimlilik ile tahmin edilen verimlilik değeri karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 3.4.'te 15 en iyi verimlilik tahmin yöntemlerinin analizi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu tahmin yöntemleri ise kendi aralarında benzer fiziksel özellikler göz önünde bulundurularak 6 ana başlık altında sınıflandırılmıştır:

3.4.1. Plaka metodu

- 1) *Standart Plaka Metodu*: Motor verimliliğinin plaka değeri ile aynı ve sabit olduğu kabul edilmektedir. Ancak plaka değeri IEEE Std-112 Metot B'ye uygun olarak hesaplanmamış, motor sargıları yeniden sarılmış ise motor çalışma koşulları ile üreticinin test koşulları farklılık gösterebilmektedir. Bu yüzden standart plaka metodunun doğruluğu düşüktür.
- 2) *Volgelsang ve Benning (v & B) Metodu I,II*: V&B I ve II metotları standart plaka metodunun varyasyonlarıdır. Ticari uygulamalarda da kullanılan bu metotlarda "Motor Analizör" cihazı kullanılmaktadır. V&B I'de boşta çalışma, normal yük ve kesik güç deneylerinin yapılması gerekmektedir. V&B II'de ise boşta çalışma deneyinin yapılmasına gerek yoktur. Ancak plaka verilerinin kullanılması gerekmektedir. Sonuç olarak V&B II, I'e göre daha az doğruluğa sahiptir.

3.4.2. Kayma metodu

- 1) *Standart Kayma Metodu*: Anlık yükün, ölçülen kayma- tam yükte kayma oranı ile doğrudan orantılı olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayımına göre denklem (3.4) yaklaşımı yapılmıştır.

$$\eta = \frac{S}{S_n} \frac{P_n}{P_g} \quad (3.4)$$

Bu denklemde kayma oranı yük oranını temsil etmektedir. Ancak, yük oranı ile verimlilik eşit olmadığı için standart kayma metodunda verimlilik hatalı hesaplanmaktadır.

- 2) *Geliştirilmiş Ontario Hydro Kayma Metodu*: Özellikle verimlilik- yük eğrisinin düz olmadığı kısımda yaşanan gerilim dengesizliği kaynaklı ve anma hız değerinde ki değişimin sebep olduğu ölçüm hatasını düzeltmek için (3.5) denklemi geliştirilmiştir.

$$\eta = \frac{S}{S_n} \frac{P_n}{P_g} \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 \quad (3.5)$$

Ancak NEMA standartlarına göre üreticilere plakada yazan hız değerlerinin gerçek hız değerlerinden %20'ye kadar farklılık göstermesi kabul edilebilir bir durumdur. Bu yüzden bu metot ile tahmin edilecek verim değerlerinde yüksek hata oranının olması mümkündür.

3) *Tepe Sınırı Kayma Metodu*: En temel tepe sınırı kayma metodunda P_s kaybının sıfır olduğu varsayılmıştır.

$$\eta < (1-s) \quad (3.6)$$

Ancak yapılan araştırmalar sonucunda P_s kaybının toplam kayıp miktarının yaklaşık %40'ını oluşturduğu gözlenmiştir. Bu yüzden bu metotta denklem (3.7)'de görüldüğü şekliyle geliştirme yapılmıştır.

$$\eta < (1-s) \left(\frac{3I^2R}{P_G} \right) \quad (3.7)$$

Bu metotta tahmin edilen verim değeri gerçek verimden her zaman daha fazladır. Çünkü P_r , P_{core} , P_{fw} ve P_{LL} kayıpları ihmal edilmektedir.

3.4.3. Akım metodu

1) *Standart Akım Metodu*: Verim ve akım değeri arasında ki en temel ilişki (3.8) denkleminde olduğu şekilde gösterilebilir.

$$\eta = \frac{I}{I_n} * \frac{P_n}{P_G} \quad (3.8)$$

Gerçekte ise akım-yük doğrusu çok az non-lineerdir. Bu durum göz önünde bulundurularak 3.8 denkleminde geliştirme yapılarak (3.9) denklemi elde edilmiştir. İki yaklaşımın ortalama değerinin en doğru verimlilik tahminini verdiği önerilmektedir.

$$\eta = \frac{2I - I_b}{2I - I_b} * \frac{P_n}{P_G} \quad (3.9)$$

3.4.4. Eşdeğer devre metodu

- 1) *Standart Eşdeğer Devre Metodu (IEEE Std-112 F/F1)*: Empedans hesaplaması, boşa çalışma, değişken gerilim, ters dönme ve rotorsuz çalışma testlerinin yapılması gerektiği için zor ve saha çalışması için uygun bir metot değildir.
- 2) *ORMEL96 Metodu*: Eşdeğer devre çıkarılması sırasında plaka verileri ve stator direnç değerleri kullanılmaktadır.
- 3) *Rockwell Verimlilik Metodu (RMEW)*: Rockwell Reliance tarafından önerilen “Motor Verimlilik Sihirbazı” ile motor verimi hesaplanmaktadır.
- 4) *Kilitli Rotor Metodu*: Eşdeğer devrenin parametreleri kilitli rotor test sonuç verileri kullanılarak hesaplanmaktadır.
- 5) *Frekans Metodu*: Rotor sabitken, 0.01 ile 500 Hz frekans aralığında ölçülen motor empedans değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

3.4.5. Belirlenmiş kayıp metodu

- 1) *IEEE Std-112 E1 Metodu*: Çizelge 3.3'te görüldüğü üzere motor gücüne göre değişen P_{LL} varsayımları kullanılmaktadır. Varsayımlar anma güç değerine göre yapılmıştır.

Çizelge 3.3. P_{LL} varsayım değerleri

Motor Gücü	P_{LL} Değeri- Anma Güç Oranı(%)
1-90 kW	1,8
91-375 kW	1,5
376-1850 kW	1,2
>1851 kW	0,9

- 2) *OHME Metodu*: Anma güç değerinde P_{fw} ve P_{core} toplam kaybın %3,5- 4,2 aralığında olduğu varsayılmaktadır. P_{LL} kaybı içinse çizelge 3.3. verileri kullanılmaktadır.

3.4.6. Moment metodu

1) *Hava Aralığı Moment (AGT) Metodu*: Motor verimliliği, denklem (3.10)'da belirtildiği üzere T_{mil} , T_{AG} (Hava Aralığı Momenti) ve w_r (rotor hızı) verilerine göre hesaplanabilmektedir.

$$\eta = \frac{T_{mil} w_r}{P_g} = \frac{T_{AG} w_r - P_{fw} - P_{LL}}{P_g} \quad (3.10)$$

P_{fw} ve P_{LL} kayıp değerleri boşta çalışma deneyi ile elde edilebilmektedir. TAG ise anlık olarak ölçülen şebeke akım ve gerilim değerleri ile ölçülebilmektedir.

$$T_{AG} = \frac{\text{kutup sayısı}}{2\sqrt{3}} \left\{ \begin{array}{l} (i_A - i_B) \int [V_{CA} - R_s (i_C - i_A)] dt \\ -(i_C - i_A) \int [V_{AB} - R_s (i_A - i_B)] dt \end{array} \right\} \quad (3.11)$$

Bu metodun önemli bir avantajı ise gerilim ve akım dengesizliklerinden kaynaklı enerji kayıplarını tespit edebilmesidir. Ayrıca oldukça yüksek olan doğruluk derecesi (%0.5) ile online izleme için elverişlidir. Ancak çizelgede de belirtildiği üzere zorluk derecesinin yüksek olması ve boşta çalışma deney sonuç bilgilerine ihtiyacı olması hava aralığı moment tahmin metodunun dezavantajıdır.

2) *Şaft Moment Metodu*: Bu metotta kayıplar ölçülmeksizin doğrudan şafttan rotor hızı ve moment değerleri ölçülmektedir. Zorluk derecesi ve doğruluğu yüksektir. Moment ölçüm cihazı maliyeti yüksek olduğu için sanayiye yönelik ölçümler için uygun değildir (Habetler vd., 2006).

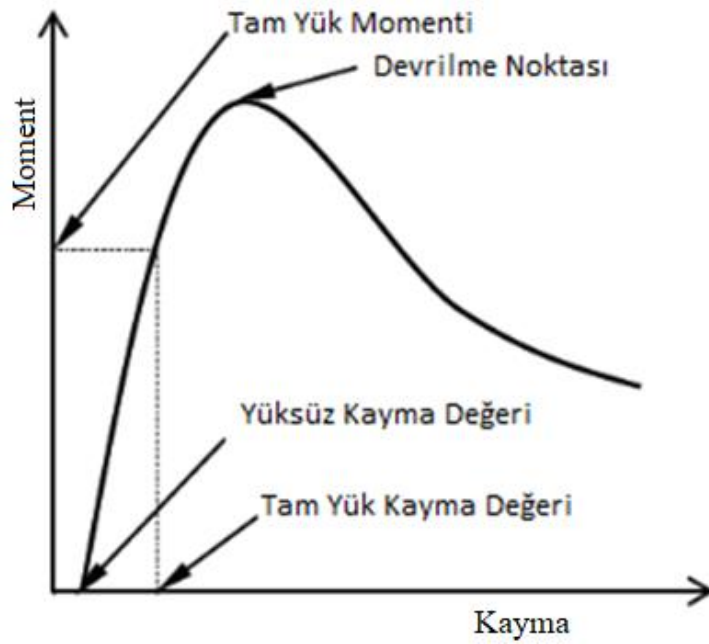
Çizelge 3.4. Motor verimlilik tahmin metotlarının karşılaştırılması(Habetler vd., 2006)

Motor verimlilik Tahmin Metotları	Test ve Hesaplama/Tahmin Gereklilikleri								Performans	
	Boşta Çalışma	Tam Yük	Güç Kesintisi	V/f	Hız	Moment	Motor Plaka Verileri	Stator Gerilimi	Zorluk Derecesi	Beklenen Hata
Standart Plaka Metodu	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Düşük	% 10
V&B Metodu I	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Ölç	Hayır	Hayır	Ölç	Yüksek	N/A
V&B Metodu II	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Ölç	Hayır	Evet	Ölç	Orta	%2,5
Standart Kayma Metodu	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Ölç	Hayır	Evet	Ölç	Düşük	% 7
Tepe Sınırı Kayma Metodu	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Ölç	Hayır	Evet	Ölç	Orta	% 8
Standart Akım Metodu	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Orta	%6
IEEE Std-112 Metodu F1	Evet	Hayır	Evet	Evet	Ölç	Hayır	Evet	Ölç	Yüksek	%5
ORMEL96 Metodu	Hayır	Hayır	Seçime Bağlı	Hayır	Ölç	Hayır	Evet	Seçime Bağlı	Düşük	%4
Rockwell Eff. Wizard Metodu	Seçime Bağlı	Hayır	Hayır	Hayır	Ölç	Hayır	Evet	Ölç	Orta	% 1
Kilitli Rotor Metodu	Evet	Hayır	Hayır	Evet	Ölç	Hayır	Evet	Hayır	Yüksek	N/A
Frekans Metodu	Evet	Hayır	Evet	Evet	Ölç	Hayır	Hayır	Ölç	Yüksek	N/A
IEEE Std-112 Metodu E1	Evet	Evet	Evet	Evet	Ölç	Hayır	Evet	Ölç	Yüksek	%3
OHME Metodu	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Ölç	Hayır	Evet	Ölç	Orta	%2-3
Hava Aralığı Moment Metodu (AGT)	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Ölç	Tahmin	Evet	Ölç	Yüksek	%0.5
Saft Moment Metodu	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Ölç	Ölç	Hayır	Hayır	Yüksek	<%0.5

Araştırma sonuçlarına göre motor verimlilik hesaplama kolaylığı yönünden ORMEL96, REMW, OHME ve AGT metotları en iyi adaylar olarak belirlenmiştir. Tüm bu 4 metot, motor yükünün %50 ve üzeri olduğu durumlar için verimliliği daha doğru tahmin etmektedir. Ancak motor yükünün düşük olduğu durumlarda verimliliği hesaplamak gereksizdir. Bu yüzden bu kabul edilebilir bir dezavantajdır.

3.4.7. Moment- kayma metodu

Motor tarafından üretilen momentin kayma değerine göre gösterdiği değişim moment-kayma eğrisinden bulunabilmektedir. Motorların optimum çalışabileceği yük aralığında moment ile kayma eğrisinin neredeyse doğrusal olduğu söylenebilmektedir. Optimum motor yük aralığında şekilde de görüldüğü üzere kayma ile moment doğrudan orantılıdır. Kaymanın yaklaşık %20 civarında olduğu devrilme noktasında ise maksimum moment değerine ulaşılmaktadır.



Şekil 3.10. Asenkron motorun moment-kayma eğrisi

Bu bölümde moment-kayma eğrisi kullanılarak motor verimliliği tahmin edilecektir. Verimliliği hesaplamak için ilk olarak test edilecek motorun moment-kayma eğrisinin çizilmesi gerekmektedir. Daha sonra ise giriş gücü ve motor devir hızı hesaplanmalıdır. Moment- kayma eğrisinin çizilebilmesi tam yükteki güç ve tam yükteki hız değeri ile boşta çalışma hız değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Söz

konusu değerler makine üreticisinin yayınlamış olduğu katalogdan ve sahada yapılacak ölçümler ile sağlanmaktadır. Moment- kayma eğrisinin çizilmesi için:

- Katalog değerleri kullanılarak (2.2) denklemi ile kayma değerleri hesaplanır;
- (2.13) ve (2.14) denklemleri kullanılarak kayma değerlerine karşılık gelen moment değerleri hesaplanır.

Daha sonra ise motor yükte çalışırken lazer takometre ile ölçülen değer kullanılarak yükte ki kayma değeri hesaplanır ve moment-kayma eğrisi yardımıyla kayma değerine karşılık gelen yükteki moment değeri tahmin edilir. Motor devir hızı ve moment değeri bilindiği için denklemler yardımıyla P_c bulunur. Dijital güç ölçüm cihazı yardımıyla ölçülen P_g bilindiği için (3.3) denklemi ile motor verimi hesaplanır.

Çizelge 3.5. Doğrudan yük ölçüm sonuçları(Saravan vd., 2013).

Giriş Gücü(kW)	Moment(Nm)	Kayma(%)	Motor Verimi
2,45	12,19	2,60	76,00
3,28	16,60	3,26	76,90
3,48	18,79	3,46	81,80
4,15	22,88	3,90	83,00

Çizelge 3.6.'da yer alan veriler motor kayıpları hesaplanmadan doğrudan motor mili moment ve hız değerleri hesaplanarak bulunmuştur.

Çizelge 3.6. Moment-kayma metodu sonuçları(Saravan vd., 2013).

Giriş Gücü(kW)	Moment(Nm)	Kayma(%)	Motor Verimi
2,45	12,00	2,60	74,00
3,28	17,00	3,26	77,98
3,48	19,20	3,46	81,00
4,15	22,95	3,90	82,78

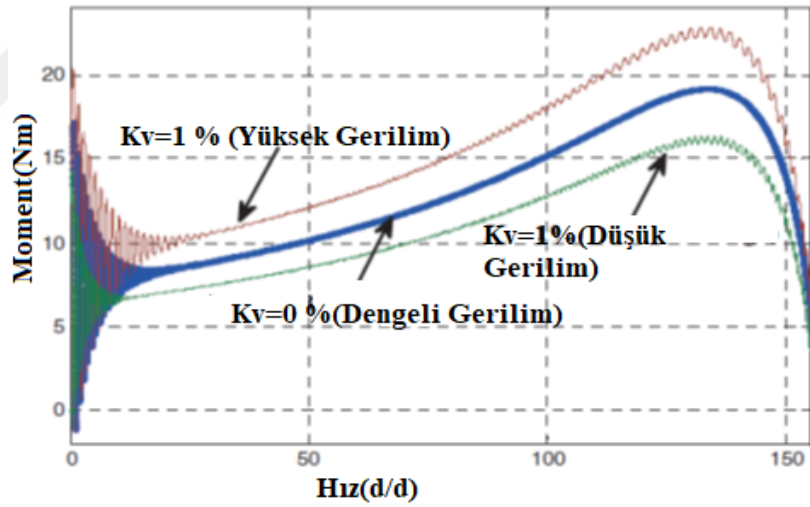
Çizelge 3.7.'de yer alan veriler moment-kayma metodu kullanılarak bulunmuştur. Bölüm 3.2.'de belirtildiği üzere katalogta yazan anma güçlerine göre düşük güçte çalışan motorlar daha az verimlidir. Yukarıda ki çizelgelerde farklı giriş güçlerine göre de ölçülen motor verim değerleri görülebilmektedir.

Çizelge 3.7. İki ölçüm metodunun karşılaştırılması(Saravan vd., 2013).

Yük(%)	Öçülen Verim (%)	Hesaplanan Verim (%)	Hata(%)
60	76,00	74,00	1,44
75	76,90	77,98	1,40
80	81,80	81,00	0,98
90	83,00	82,78	0,24

Çizelge 3.8.'de ise doğrudan yük ölçüm sonuçları ile moment-kayma metodu ile tahmin edilen veriler karşılaştırılmış ve farklı yük değerlerine göre verimlilik hata yüzdeleri verilmiştir (Saravan vd., 2013). Motorun yüklenme değeri arttıkça gerçek değer ile moment-kayma metodu ile tahmin edilen değer birbirine yaklaşmaktadır. Moment-kayma metodunun %1,44 olan hata payı kabul edilebilir bir değerdir.

Moment-kayma grafiği, gerilim dalgalanmalarına göre değişmektedir. Bundan dolayı, moment-kayma grafikleri oluşturulurken gerilim dalgalanmaları da hesaba katılmalıdır.



Şekil 3.11. Asenkron motorun moment-hız grafiğinin Kv=1% derecesindeki değişimi

Şekil 3.11'de görüleceği üzere, düşük gerilimlerdeki dalgalanmalar sonrası oluşan moment-hız grafiği, dengeli gerilimin moment-hız grafiğine, yüksek gerilimlerdeki dalgalanma grafiği ile karşılaştırıldığında daha benzerdir. Bu sonuca göre, motorların düşük gerilimlerdeki dalgalanma koşullarında çalışmasının, yüksek gerilimlerdeki dalgalanma koşullarında çalışmasından daha makul olduğu görülmektedir(Nautiyal, 2013).

4. ENERJİ VERİMLİLİĞİNE YÖNELİK ÜLKEMİZDE YAPILAN İYİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Gelişmiş ülkelere göre enerji yoğun ekonomilerden biri olan ülkemizde sanayi sektöründe gerçekleştirilebilecek iyileştirmeler sayesinde kaynak verimliliği ve sürdürülebilir üretim yapısına geçişimiz için önemli bir adım atılabilecektir. Söz konusu iyileştirmelerin yapılabilmesi için motor dönüşüm politikasının ulusal çapta hayata geçirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Motor dönüşüm politikasının gerçekleştirilebilmesi için uluslararası tecrübeler incelenmiştir. Elektrik motor dönüşüm politikalarında kullanılan temel araçların; finansal teşvikler, ulusal zorunlu minimum enerji performans kriterleri ve kapasite geliştirme programları olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu araçların ulusal ve uluslararası enerji politikalarıyla uyumlu bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir.

Elektrik motorlarında enerji verimliliğine yönelik yapılacak dönüşüm, ulusal enerji verimliliğinin artırılması için en kısa ve kolay yollardan biridir. Bundan dolayı Kalkınma Bakanlığı tarafından hazırlanan Onuncu Kalkınma Planında bu konuya önem verilmiştir. Onuncu Kalkınma Planında, “Enerji Verimliliği” konusu için belirlenen eylemlerin gerçekleştirilmesinden Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı sorumludur. “Enerji Verimliliği” konusu için belirlenen eylemler:

Politika 1: Düşük verimli AC elektrik motorlarının daha yüksek verimli olanlarıyla değiştirilmesi.

Politika 2: KOBİ’lerin enerji verimliliği konusundaki eğitim, etüt ve danışmanlık hizmetlerinin desteklenmesine yönelik mekanizmaların iyileştirilmesi.

Politika 3: Enerji verimliliği alanındaki teknolojilerin ve iyi uygulama örneklerinin KOBİ’lerde yaygınlaştırılması.

Yukarıda belirtilen politikalar arasındaki en önemli başlık ise, düşük verimli AC elektrik motorlarının daha yüksek verimli olanlarıyla değiştirilmesidir.

Bu kapsamda, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na bağı Verimlilik Genel Müdürlüğü tarafından “Sanayide Elektrik Motorlarının Dönüşüm Programını” yürütme kararı alınmıştır.

Programın amacı, ulusal sanayi sektöründe enerji verimli üretime geçilmesi, karbon salınımını azaltılmasıdır.

Bunun içinse, sanayi üretiminde bağımsız ve akuple kullanılan 7,5 kW ve üzeri elektrik motorların daha verimli motorlar ile değiştirilmesine yönelik elektrik motor üreticileri ile nihai kullanıcılar teşvik edilecektir.

Verimlilik Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmesi planlanan bu program kapsamında belirlenen 5 ana faaliyet ise:

Faaliyet1. Sanayide kullanılan 7,5 kW ve üzeri AC motorlarına ilişkin envanterin çıkarılması,

Faaliyet2. Enerji verimli elektrik motorlarına ilişkin mevzuatın ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi,

Faaliyet3. Sanayideki elektrik motorlarının dönüşümünün hızlandırılması için finansal destek modellerinin geliştirilmesi,

Faaliyet4. Elektrik motoru üreticilerin teknoloji düzeylerinin ve üretim kapasitelerinin geliştirilmesi,

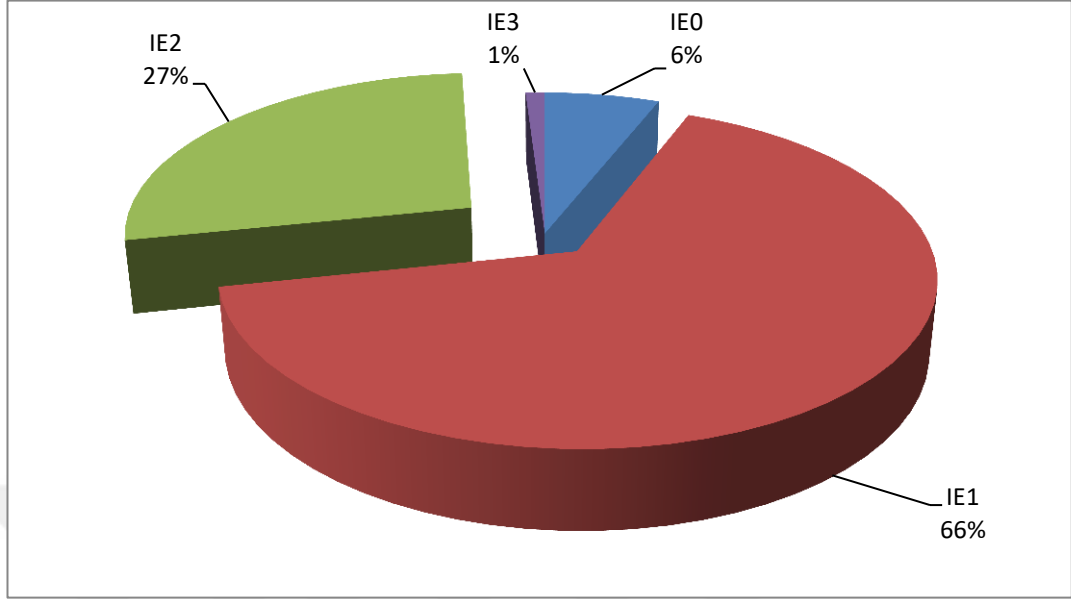
Faaliyet5. İşletmelerde enerji verimli motorlara ilişkin farkındalığın artırılması.

4.1. Sanayide Elektrik Motorlarının Dönüşüm Programı

Faaliyet 1 kapsamında; önceden belirlenen 62 ilde faaliyet gösteren ve yıllık elektrik tüketimi 50 TEP ve üzeri olan 887 imalatçı firmaya ait motor envanteri hazırlanmıştır. Yaklaşık 95.000 adet 7,5 kW ve üzeri elektrik motorunun analiz edildiği envanter çalışması, uluslararası boyutta yapılan en büyük çalışmadır. Tamamlanan envanter çalışmasına göre;

- 23 farklı sanayi sektöründe faaliyet gösteren toplam 887 firmaya ait 93.139 adet AC ve 1.755 adet DC motor verisi elde edilmiştir. Sanayide kullanılan 7,5 kW ve üzeri güçteki AC motorların %65'lik bölümünün IE1, %27'lik bölümünün IE2 verim

sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Motor dönüşümü için istenilen Premium verimli (IE3) motorların ise sanayide sadece %1'lik bir paya sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. IEC verim sınıflarına göre Türkiye’de kullanılan motor sayısı

- Sanayide toplamda 4.306.622 adet 7,5 kW ve üzeri AC motorun halihazırda kullanıldığı yönünde stok tahmini yapılmıştır.
- Mevcut stokta yer alan 7,5 kW ve üzeri AC motorun ortalama yaşının 12 yıl, ortalama gücünün 42,5 kW, ortalama çalışma süresinin ise 5.456 saat/yıl olduğu tespit edilmiştir.
- Sanayide tüketilen elektriğin %72’lik bölümünün AC motorlar tarafından tüketildiği tespit edilmiştir.
- Elde edilen verilere göre, sanayide kullanılan yaklaşık 167.000 AC motorda değişken hız sürücü sistemi kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Motor dönüşümüne ek olarak DHS kullanılması durumunda yaklaşık 1,5 milyar TL’lik bir tasarruf yapılabileceği öngörülmüştür.
- Sanayide kullanılan verimsiz (IE0, IE1, DHS bulunmayan IE2) AC motor sayısının 3.783.694 adet olduğu tahmin edilmektedir.

Çizelge 4.1. Sektörlere göre 7,5 kW ve üzeri AC motor sayısı oranı

Sektör Kodu ve Tanımı	7,5 kW ve üzeri AC Motor Sayısı	Sektörler Toplamı İçindeki Oranı (%)
10 – Gıda ürünlerin imalatı	757.504	17,6
25 – Fabrikasyon metal ürünler imalatı	518.864	12,0
28 – Başka yerde sınıflandırılmamış makine imalatı	442.012	10,3
32 – Diğer imalatlar	251.154	5,8

- Verimsiz motorların tamamının dönüşümünün sağlanması durumunda yıllık yaklaşık 34 milyar kWh elektrik tasarrufu sağlanacaktır. Bu sayede ulusal ekonomimize yıllık olarak yaklaşık 8,5 milyar TL’lik bir katkı sağlanacaktır.
- Söz konusu motor dönüşümü için gerekli olan yatırım tutarı ise yaklaşık 14,6 milyar TL’dir. Motor dönüşüm programının geri ödeme süresi 21 aydır. Verimsiz motorlarda DHS kullanılması durumunda geri ödeme süresi 18 aya düşmektedir.

Çizelge 4.2. Değişken hız sürücüsü kullanımı ve motor dönüşüm senaryolarından elde edilen elektrik tasarrufu ve geri dönüş süreleri

Senaryolar		Elektrik Fiyat Tarifeleri	
		Birim Fiyat 0,22 TL/kWh	Birim Fiyat 0,25 TL/kWh
Verimsiz Motorların Verimli Olanlarıyla Değiştirilmesi	Dönüşüm Maliyeti (TL)	14.575.729.477	14.575.729.477
	Yatırımın Geri Dönüş Süresi (ay)	24	21
	Dönüşümü Yapılacak Motor Sayısı	3.783.695	3.783.695
	Elde Edilecek Yıllık Elektrik Tasarrufu (kWh/yıl)	33.770.491.922	33.770.491.922
	Elde Edilecek Yıllık Tasarruf (TL/yıl)	7.429.508.223	8.442.622.980
Verimsiz Motorların Verimli Olanlarıyla Değiştirilmesi + Gerekli Motorlara Hız Sürücüsü İlavesi	Dönüşüm Maliyeti (TL)	14.496.618.013	14.496.618.013
	Yatırımın Geri Dönüş Süresi (ay)	20	18
	Dönüşümü Yapılacak ve DHS İlave Edilecek Motor Sayısı	3.783.695	3.783.695
	Elde Edilecek Yıllık Elektrik Tasarrufu (kWh/yıl)	38.721.419.911	38.721.419.911
	Elde Edilecek Yıllık Tasarruf (TL/yıl)	8.518.712.380	9.680.354.977
Gerekli Motorlara Hız Sürücüsü İlavesi	Dönüşüm Maliyeti (TL)	563.400.142	563.400.142
	Yatırımın Geri Dönüş Süresi (ay)	5	4
	DHS İlave Edilecek Motor Sayısı	166.789	166.789
	Elde Edilecek Yıllık Elektrik Tasarrufu (kWh/yıl)	6.614.889.775	6.614.889.775
	Elde Edilecek Yıllık Tasarruf (TL/yıl)	1.455.275.750	1.653.722.443

Çizelge 4.2.'de görüleceği üzere, elektrik motor dönüşüm yatırımlarının geri ödeme süresi kullanılan elektrik motorun çalışma saatine doğrudan bağlıdır. Bu yüzden bazı yatırımlar 1 yıl gibi kısa bir sürede kendini geri öderken, bazı yatırımlar ise 5 yıl gibi kullanıcı açısından çok cazip görülmeyen sürelerde kendini geri ödeyebilmektedir. Ancak, yüksek verimli elektrik motorlarının ortalama 10-15 yıl olan ömürleri boyunca tasarruf ettirmeye devam edeceği unutulmamalıdır (Mete, 2017).

4.2. SÜTAŞ Firmasında Kullanılan Elektrik Motorlarının Verimliliğinin Artırılması Projesi

Süt ve Süt ürünleri sektöründe faaliyet gösteren firmaların; elektrik tüketimi, fosil yakıtlar ve hayvansal gübre kaynaklı sera gazları nedeniyle çevreye olumsuz etkileri olmaktadır. Söz konusu olumsuz etkileri azaltabilmek için Sütaş firmasında 2020 yılına kadar enerji verimliliğini %40 artırma hedefi belirlenmiştir. Bu hedefi gerçekleştirebilmek içinse; 2014 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından destek verilen 4 VAP (Verimlilik Arttırıcı Proje) ile tesisin enerji verimliliği artırılmıştır. Bu kapsamda; Aksaray ve Karacabey Süt fabrikalarında çalışan orta ve düşük verimli elektrik motorları süper premium (IE4) verim sınıfındaki motorlar ile değiştirilmiştir. Karacabey süt fabrikasında 61 adet elektrik motoru değiştirilerek 58,6 TEP yıllık enerji tasarrufu sağlanmıştır. Projenin geri ödeme süresi 1,9 yıl olarak hesaplanmıştır. Aksaray süt fabrikasında ise 29 adet elektrik motoru değiştirilerek 24,7 TEP yıllık enerji tasarruf edilmiştir. Projenin geri ödeme süresi 1,8 yıl olarak hesaplanmıştır (Topak,2017) .

4.3. TOFAŞ Fabrikası Yüksek Verimli Motor Uygulama Fizibilitesi

2011 yılında Tofaş Fabrikasında yapılan fizibilite çalışmasında eski tip asenkron motorlar yerine yeni tip daha verimli asenkron motorlar kullanılması durumunda, tasarruf edilecek enerji miktarı ve bu tasarruftan elde edilecek kazanç değeri kullanılarak motor değişim giderlerinin geri dönüş süresi hesaplanmıştır. Fizibilite çalışmasında 1,1 kW ile 160 kW arasında değişen ve 1.000 d/d üzerinde ki hızlarda çalışan 158 adet motor incelemeye alınmıştır. Söz konusu çalışmada farklı çalışma koşullarına sahip 43 adet motor grubu vardır.

Mevcut motorlar ile aynı özelliklere sahip daha verimli yeni nesil motorlar karşılaştırılarak; satın alma maliyetleri, yıllık toplam çalışma süreleri, o yıla ait hurda alım değeri ve enerji maliyeti parametrelerine göre çizelge 4.3 çıkarılmıştır.

Çizelge 4.3. Motor yenileme fizibilite sonuçları(1,1-160 kW)

Sıra No	Fizibilite Kalemi	Değer	Birim
1	Yeni Motor Maliyeti	276.345	TL
2	1 kg Hurda Değeri	0,758	TL
3	Asenkron Motorların Toplam Hurda Ağırlığı	20.286	KG
4	Eski Hurda Toplam Değeri	15.377	TL
5	Toplam Yatırım Maliyeti(=1-4)	260.968	TL
6	1 kWh Elektrik Fiyatı	0,18	TL
7	Bir Yıllık Toplam Enerji Tasarrufu	577.716	kWh
8	Bir Yıllık Toplam Mali Kazanç(=6*7)	103.989	TL
9	Bir Aylık Toplam Mali Kazanç	8.666	TL
10	Geri Ödeme Süresi	30,11	Ay

Ayrıca gücü 55kW üzerinde ki 14 adet asenkron motor fizibilite dışında tutularak yeni bir hesaplama daha yapılmıştır. Bunun sebebi ise gücü 55 kW üzerinde olan asenkron motorların yıllık karlılık oranlarının daha düşük olmasıdır.

Çizelge 4.4. Motor yenileme fizibilite sonuçları(55-160kW)

Sıra No	Fizibilite Kalemi	Değer	Birim
1	Yeni Motor Maliyeti	115.936	TL
2	1 kg Hurda Değeri	0,758	TL
3	Asenkron Motorların Toplam Hurda Ağırlığı	11.324	KG
4	Eski Hurda Motor Alım Değeri	8.585	TL
5	Toplam Yatırım Maliyeti(=1-4)	107.351	TL
6	1 kWh Elektrik Fiyatı	0,18	TL
7	Bir Yıllık Toplam Enerji Tasarrufu	456.227	kWh
8	Bir Yıllık Toplam Mali Kazanç Değeri(=6*7)	76.720	TL
9	Bir Aylık Toplam Mali Kazanç Değeri	6.393	TL
10	Geri Ödeme Süresi	16,79	Ay

Çizelge 4.4. ile çizelge 4.5. 'in karşılaştırılması yapılırsa ilk fizibilitenin yaklaşık 30 ay, diğerinin ise yaklaşık 16 ay geri ödeme süresi olduğu görülmektedir (Baykal,2011). Her iki fizibilitede hesaplanan amortisman sürelerinin de firmalar tarafından kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir.

4.4. TSE Elektrik Motoru Deney Laboratuvarı Denetimleri

2015 yılında dünyada 12 milyar dolar Pazar hacmine ulaşan elektrik motor imalat sektöründeki ülkemizin payı 200 milyon dolar civarındadır. Dünya genelinde faaliyet gösteren en büyük 30 motor üreticisi sıralamasında üç ulusal şirketimiz yer almaktadır. Dünyada ise yaklaşık 3 bin motor imalatçısı faaliyettedir. Ulusal piyasamıza yılda yaklaşık 400 bin yeni 7,5 kW üzeri elektrik motoru giriş yapmaktadır. Piyasaya giren elektrik motorlarının yaklaşık 35 bini ithal edilmektedir. Yıllık yerli üretim kapasitesi ise 500 bin adet olup üretilenlerin 75 bini ihraç edilmektedir. 2015 yılında 7,5 kW üzeri elektrik motorlarının ihracat değeri 45 milyon dolar ithalat değeri ise 98 milyon dolardır. Tüm güçlerdeki elektrik motorlarının ihracat değeri 67 milyon dolar, ithalat değeri ise 178 milyon dolardır. Elektrik motorların söz konusu üretim ve tüketim büyüklüğü dikkate alındığında, elektrik motorlarının arz güvenliğini sağlamak için nitelikli bir test altyapısının oluşturulması gerektiği görülmüştür. Bu kapsamda TSE tarafından güç aralığı 0,75 kW-90 kW olan “Motor Deney Laboratuvarı” TSE Gebze Kalite Kampüsü Elektroteknik Laboratuvarı Müdürlüğünde kurulmuştur. Ayrıca laboratuvar süreç içerisinde TÜRKAK’a akredite olmuştur. Denetim faaliyetleri kapsamında 15-17 Haziran 2017 tarihleri arasında Ankara’da pilot denetim gerçekleştirilerek; 7 markadan 12 adet IE2 verim sınıfından alınan numuneler TSE Elektrik Motorları Laboratuvarına teste gönderilmiştir. 7 markadan alınan 12 farklı model elektrik motoru numunesinin 6 adedi tebliğde zorunlu olan verim değerini doğrudan karşılarken, 4 tanesi ancak tolerans değerleri dikkate alındığında minimum sağlanması gereken verim değerine ulaşabilmektedir. 2 adet motor numunesinin ise test sonucunun tolerans değerlerinin de dışında olduğu tespit edilmiştir (Çatalbaş vd., 2017)

5. SAHA DENEYLERİ VE PROSEDÜRLERİ

Bu bölümde, imalat sanayinde yaygın olarak kullanılan asenkron motorların yüksek verimli asenkron motorlar ile değiştirilmesi durumunda tasarruf edilecek elektrik enerjisi ve kazanılacak ekonomik değer uygulamalı olarak hesaplanacaktır.

Deneyleerin amacı:

- Muğla'nın önde gelen sektörleri arasında yer alan mermer fabrikalarında kullanılan asenkron motorların enerji verimliliklerinin ölçülmesi,
- Fabrikalarda, düşük verimli asenkron motorların kullanıldığı tespit edilmesi halinde yüksek verimli asenkron motorların kullanılmasının maliyet avantajları hakkında firmalara bilgi verebilmektir.

Belirlenen yöntem ise; laboratuvar ortamında ve sahada asenkron motorların enerji verimliliklerinin ölçülmesidir. Görüldüğü üzere, deneysel süreçler iki farklı aşamadan oluşmaktadır. Deneysel süreçler tamamlandıktan sonra ise, deney sonuçlarından edilen veriler analiz edilerek değerlendirmeler yapılacaktır. Bu kapsamda; mevcut motor ile aynı özelliklere sahip daha verimli yeni nesil motorlar karşılaştırılarak; satın alma maliyetleri, yıllık toplam çalışma süreleri, o yıla ait hurda alım değeri ve enerji maliyeti parametrelerine göre yatırımın geri dönüş süresi hesaplanacaktır. Yapılacak bu fizibilite çalışması ile üniversite-sanayi işbirliği özelinde örnek bir uygulama hayata geçirilmiş olacaktır.

5.1. Deney Süreçlerinde Kullanılan Test Ekipmanları

Çizelge 5.1'de belirtilen ekipmanlar 18/12/2015 tarihinde onaylanan 15/234 nolu Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) kapsamında alınmıştır.

Çizelge 5.1. Deney ölçüm cihazları

Sıra No	Malzeme Adı	Modeli
1	Dijital Hafızalı Osiloskop	UTD 2052 CEX 50 MHz
2	Optik Takometre	DT2236C
3	0,75 kW 3 Fazlı Asenkron Motor	AGM2E 80 4b(1500 d/d)
4	0,75 kW DC Motor	5M0606082M(1500 d/d)
5	Lazer (Infrared) Termometre	TT Tecnic VC303B
6	Gürültü Ölçer	Cem DT 805L
7	Multimetre	90E Auto Range
8	Ampermetre	EPA241A AC/DC
9	Pens Ampermetre	Unit UT 202 400A AC
10	Enerji Analizörü	EPM-07-96 LED

5.1.1. Optik takometre

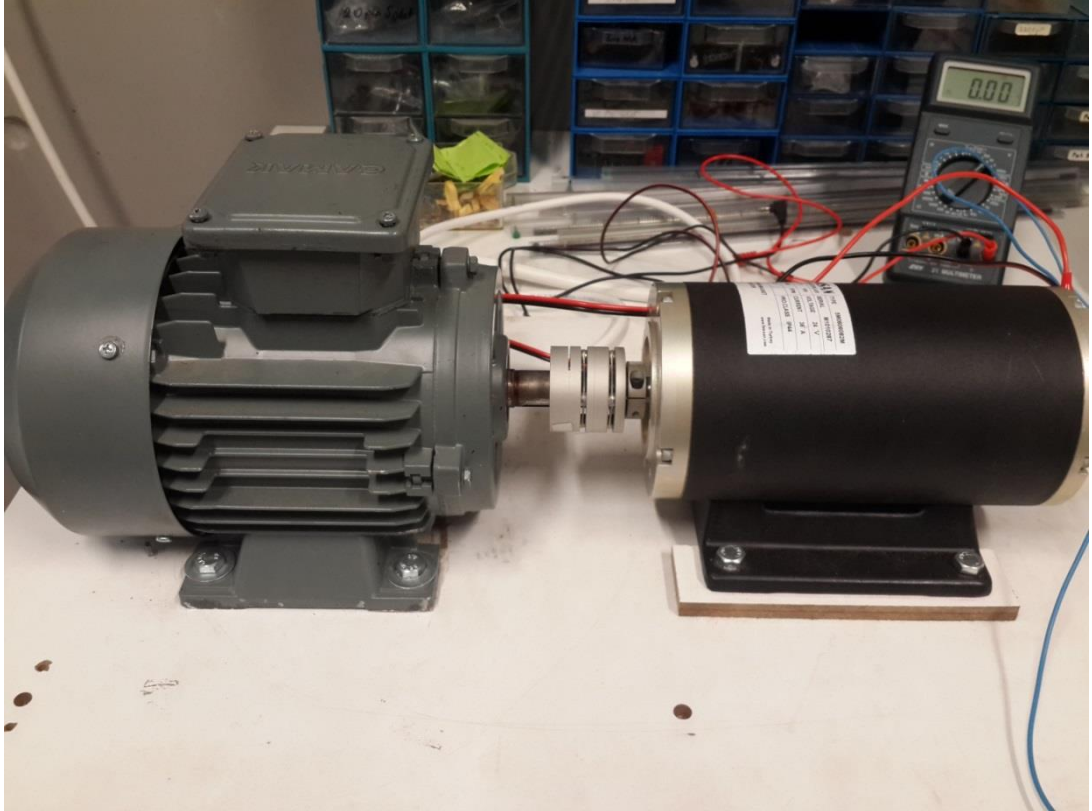
El tipi optik Takometre makinelerde, parça ve kurulumlarda (örneğin taşıyıcı bantlar, motorlar ve bantla çalışan mekanizmalarda) devir tespiti için idealdir, ayrıca hızın optik ölçümünü gerçekleştirir. El tipi optik Takometrede temassız ölçüm, dönen parçaya eklenmiş bir yansıtıcı şerit yardımıyla yapılır. Yansıtıcı şeritlerin kullanımı her zaman gerekli değildir. Eğer koşullar uygunsa ve ölçülecek obje ile arada kısa bir mesafe varsa (<30 cm) devir ölçümünü bu şeritleri kullanmadan yapabiliriz.



Resim 5.1. Optik takometre

5.1.2. 0,75 kW 3 fazlı asenkron motor

Asenkron motorların enerji verimliliğini laboratuvar ortamında ölçmek için Gamak Marka 0,75 kW 3 fazlı asenkron motor kullanılmıştır. Asenkron motorun klemenslerine bağlanan enerji analizör cihazı kullanılarak, yüke göre şebekeden çekilen akım, gerilim, güç gibi değerler kaydedilmiştir.



Resim 5.2. Asenkron motor – DC generatör bağlantı düzeneği

- 4 kutuplu, pik Döküm
- Türk standartları uygunluk işareti
- Avrupa Birliği normlarına uygunluk işareti
- Verimlilik sınıfı IE2
- Çalışma Yüksekliği 1000 metreye kadar

Çizelge 5.2. Laboratuvarda ölçümü yapılan asenkron motorun plaka değerleri

Gerilim (V)	Frekans (Hz)	Güç (kW)	n (d/d)	I (A)	Cos (ϕ)	Verim (%)
400	60	0,75	1410	1,92	0,71	79,6
460	60	0,86	1690	1,92	0,71	79,6

5.1.3. 0,75 kW DC makine (generatör)

Asenkron motorun miline küple edilen DC makine bir nevi generatör olarak kullanılmıştır. AC motorun çıkış gücü DC generatörün giriş gücüne eşittir. Dolayısıyla, DC generatörün yüke bağlı verimi ile DC generatörün çıkışından elde edilen enerji değerleri ölçülerek; asenkron motorun çıkış gücü hesaplanabilmektedir.

- Çalışma Gerilimi 24 V
- Çalışma Akımı 36 A
- 1500 d/d
- Çalışma Rejimi S2



Resim 5.3. Asenkron motor – DC generatör bağlantı düzeneği yandan görünüm

5.1.4. Infrared lazer termometre

Kızılötesi Lazer Termometreler, madde üzerindeki sıcaklığı temas etmeden ölçmek için kullanılan cihazlardır. İnfrared termometreler sadece madde yüzey sıcaklığını ölçerler ve cam arkasından ölçüm yapamazlar. Bu infrared termometreler ile parlak yüzeylerde sıcaklık ölçümü yapmak mümkün değildir. İnfrared termometresi seçerken dikkat edeceğimiz önemli noktalar; maksimum kaç derece sıcaklık ölçeceğimiz ve bu sıcaklığı ne kadar uzaktan ölçeceğimizdir.



Resim 5.4. Infrared lazer termometre

5.1.5. Ses seviyesi ölçer

Asenkron motorların yapısını oluşturan mekanik parçalar; mil, gövde, muhafaza taşı, pervane, kapaklar, yataklar ve aktarma organları şeklinde sıralanabilir. Sanayide kullanılan asenkron motorlarda oluşan mekanik arızaların büyük bölümü rulmanda meydana gelen arızalardan kaynaklıdır. Rulmanın iyice ömrünün azaldığı son evrede, hız ve ivme spektrumunda, geniş bant gürültüsü görülmektedir. Asenkron motorlarda meydana gelen rulman arızalarından dolayı motordaki sürtünme kayıpları artmaktadır. Bu arızalar neticesinde motorda titreşimler ve/veya aşırı ısınma gibi problemler meydana gelebilmektedir. Bu durum da motorun verimini doğrudan etkilemektedir (Koca vd., 2017). Asenkron motorların gürültü seviyelerinin ölçülmesi, motorun beklenen verim değerlerinde çalışıp çalışmadığı konusunda bize fikir verebilecektir.



Resim 5.5. Gürültü ölçer

5.1.6. Multimetre

DC Generatörün çıkışına paralel bağlanan 24 volt 75 Watt'lık lambaların çektiği akım ve gerilim değerleri iki adet multimetre ile ölçülmüştür.



Resim 5.6. Multimetre

5.1.7. Pens ampermetre

Mermer fabrikasında faaliyet gösteren asenkron motorların akım-gerilim değerlerini ölçmek için kullanılmıştır.



Resim 5.7. Pens ampermetre

5.1.8. Enerji analizörü

Kontaktör, akım koruma rölesi, sigorta ve diğer bağlantı ekipmanları kullanılarak hazırlanan elektrik panosuna yerleştirilen enerji analizör cihazı, asenkron motorun şebekeden çektiği elektrik enerjisi değerlerini ölçmek için kullanılmıştır.



Resim 5.8. Enerji analizörü ve multimetreler

5.2. Motor Yenileme Karlılık Analizi Hesaplama Yöntemi

Yatırım projelerinin değerlendirilmesi, çeşitli yatırım tekliflerini, kullanacakları kıt kaynaklar ve kalkınma planında saptanmış hedeflere yapacakları katkılar açısından analize tabi tutmak demektir. Sermaye, döviz, kalifiye işgücü gibi kaynaklar kıt olduğu için, yatırım projeleri arasında seçim yapmak zorunludur. Bu nedenle, yatırım projeleri, bir yandan kullanacakları kıt kaynaklar, diğer yandan gelişme hedeflerine yapacakları katkılar açısından karşılaştırılarak en uygun olanı seçilmelidir. Yatırım projeleri ise, bazı proje değerlendirme kriterleri baz alınarak seçilmelidir. Yatırımcı içinse en önemli kriter ise projenin karlılığıdır. Bir sonraki bölümde, projeye yatırılan sermayenin ne kadar sürede geri alınabileceğini hesaplayan “Geri Ödeme Süresi Yöntemi” anlatılacaktır.

5.2.1. Geri ödeme süresi yöntemi

Bu kriter bir projeye yatırılan sermayenin ne kadar süre içinde geri alınabileceğini göstermektedir. Bu yöntem iki yönlü bir karar alma konusunda yarar sağlamaktadır:

- Kabul edilmiş asgari bir ödeme rakamı ile söz konusu projenin geri ödeme devresi karşılaştırılır ve buna göre proje ret veya kabul edilir.
- İki veya daha fazla proje arasında bir seçim yapılırken, geri ödeme süresi daha kısa olan projeye öncelik verilir.

Bir yatırım projesinin geri ödeme süresi, yıllık karlarının sabit veya değişken olmasına göre farklı şekilde hesaplanmaktadır. Yıllık karlar sabitse;

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım Tutarı}}{\text{Yıllık Kar}} = \frac{I_0}{p} \quad (5.1)$$

İkinci senaryoya göre; yıllık karlar dalgalanıyorsa, her yıl elde edilen kar projenin maliyetine (yatırım tutarına) eşit oluncaya kadar toplanır ve aradan geçen yıl sayısı geri ödeme süresine eşit olur (Öney, 1987). Özetle:

$$I_0 = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (5.2)$$

Geri ödeme süresinin artması özellikle asenkron motor gibi arızalanma riski yüksek yatırım kalemleri için dezavantajlı bir durumdur.

5.2.2. Amortismanların hesaplanması

Bilindiği üzere amortismanlar, tesisteki arsa hariç varlıkların yıpranma paylarını ifade eder ve maliyet unsurudur. Bu nedenle yıllar itibariyle ortalama bir amortisman oranı üzerinden amortismanlar hesaplanarak maliyetlere dahil edilmektedir.

Çizelge 5.3. Ortalama amortisman oranını hesaplama yöntemi

Amortisman Tabi Kıymetler	Değeri	Amortisman Oranı	Amortisman Tutarı
Bina-İnşaat			
Tesisat			
Tefriş			
Teçhizat			
Toplam			
Ortalama Amortisman Oranı			

Çizelge 5.3 ise faaliyette olan şirketler için kullanılmaktadır. Amortismanına tabi kıymetler toplamından birikmiş amortisman düşülmekte, bakiye tutar ortalama amortisman oranı ile çarpılarak yıllar itibariyle amortisman tutarları bulunmaktadır (Kabukçuoğlu,2005).

Çizelge 5.4. Yıllık amortisman değerini hesaplama yöntemi

Amortismanına Tabi Kıymetler	Değeri
Sabit Tesis Yatırımı	
Sabit Kıymet Fiyat Artışı	
Finansman Giderleri	
Diğerleri	
Amortismanına Tabi Sabit Kıymetler Toplamı	
(-) Birikmiş Amortismanlar	
Amortismanına Tabi Tut.Net Kıymet Tutarı	

5.3. Karlılık Analizi Kapsamında Yapılan Deney ve Hesaplamalar

Tez kapsamında yapılan deney ve ölçümler iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada 0,75 kW asenkron motorun akım, gerilim, aktif güç gibi değerleri laboratuvar ortamında ölçülmektedir. Bu veriler kullanılarak asenkron motorun dönme hızı, aktif güç, görünür güç, akım, motor sıcaklığı ve gürültü seviyesi gibi parametrelere göre verimindeki değişim hesaplanmaktadır.

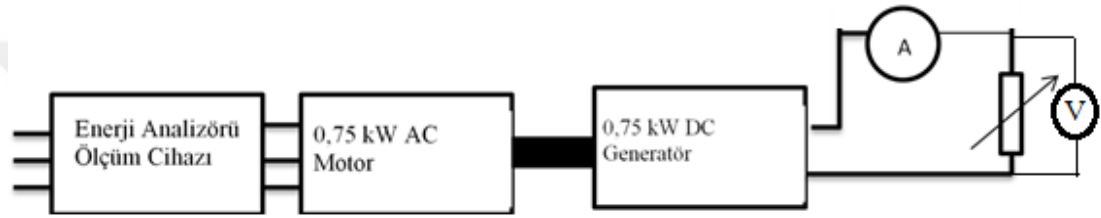
İkinci aşamada ise Yatağan ve Bayır bölgelerinde faaliyet gösteren 4 mermer fabrikasında 9 asenkron motorun enerji verimliliği ölçümleri yapılmaktadır. Söz konusu çalışma kapsamında, Mermer fabrikasında çalışan, motor anma gücü 132 veya 110 kW olan çeşitli yaş aralarındaki asenkron motorların; akım, gerilim ve motor mili hızı ölçülmektedir. Motor mil hızını ölçmek için optik takometre; motorun şebekeden çektiği elektriğin akım ve gerilim değerlerinin anlık ölçümü için pens ampermetre kullanılmaktadır.

Ölçümü yapılan asenkron motorlar mermer kesiminde kullanılan ST(Este) makinaların dikey kesim testerelerinin çalıştırılmasında kullanılmaktadır. Dikey

kesim testerelerinde genellikle 110 kW veya 132 kW anma gücüne sahip asenkron motorların kullanıldığı görülmüştür. Asenkron motor enerji verimliliği ölçümlerinde ST makinalarının seçilmesinin sebebi ise mermer kesim ortamının tozlu olması ve mermer blokların sertlik derecesinin sabit olmaması gibi makinaların arızalanmasına sebep olabilecek birçok parametreyi barındırmasındandır.

5.3.1. Laboratuvar ortamında yapılan ölçümler

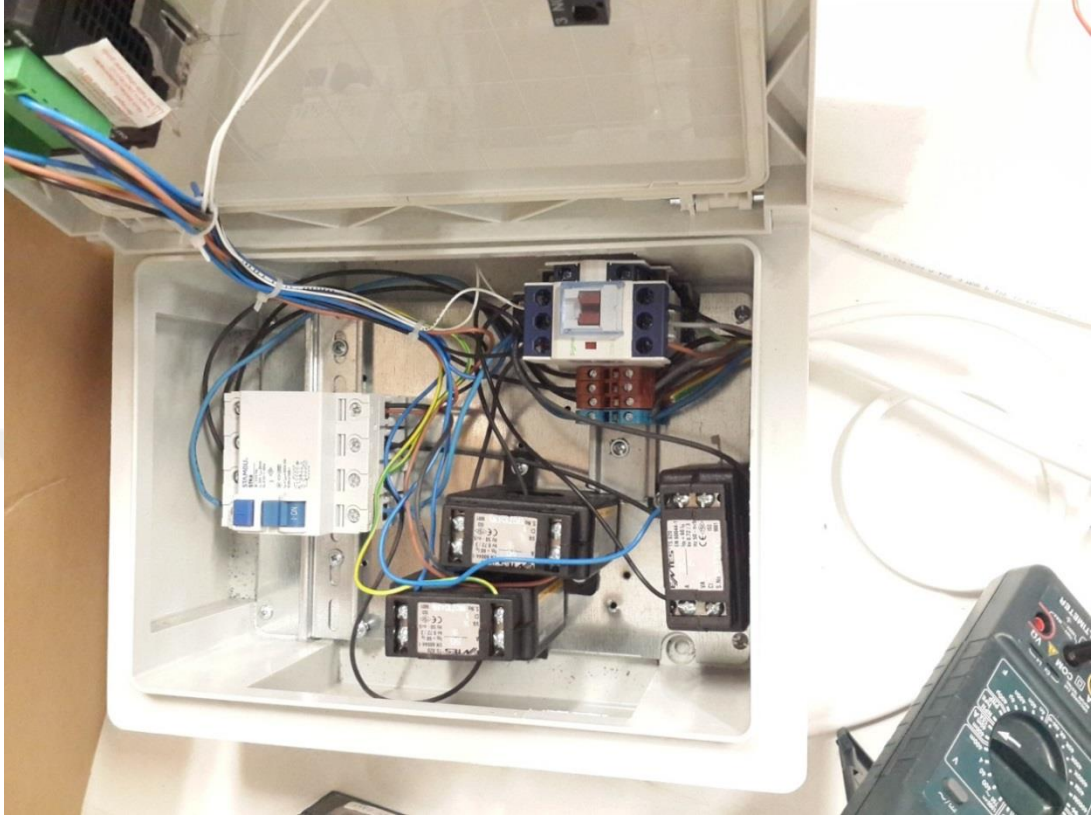
Şekil 5.1'de laboratuvar ortamı ölçümleri için kurulan deney setinin şeması yer gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Laboratuvar deney düzeneği şeması

0,75 kW kurulu güce sahip 3 faz asenkron motor ve asenkron motorun rotoruna bağlı 0,75 kW DC generatör düzeneği kurulmuştur. Bu kapsamda şebekeden çekilen enerjinin ölçüldüğü enerji analizör cihazı, sigorta, kontaktör, akım trafoları ve bağlantı ekipmanlarını içeren elektrik panosu düzeneği hazırlanmıştır. AC motorun farklı yük değerlerindeki çalışmasını ölçebilmek içinse DC generatörün çıkışına yük bağlanmıştır. 3 faz asenkron motor ve DC generatörün milleri kaplin kullanılarak birbirlerine entegre edilmiştir. Asenkron motorun şebekeden çektiği akım, gerilim, güç değerleri; DC generatörün çıkışına bağlanan yük artırılarak enerji analizör cihazında ölçülmüştür. Ayrıca asenkron motorun devir hızı lazer takometre ile ölçülmüştür. DC generatörün çıkışında elde edilen akım ve gerilim değerleri multimetre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen tüm değerler Çizelge 5.6'da gösterilmektedir. DC generatör imalatçı firmasından temin edilen akım-verim değerleri kullanılarak, DC generatörün farklı yük değerlerine göre değişen verimi MATLAB programı kullanılarak tahmin edilmiştir. Ölçülen DC generatör çıkış gücü ve söz konusu yükteki verim değerleri kullanılarak (5.5) denklemi ile DC generatörün giriş gücü hesaplanmıştır. (5.4) denklemine görüleceği üzere AC motorun çıkış gücü DC generatörün giriş gücüne eşittir. Son olarak, enerji

analizöründe ölçtüğümüz 3 faz asenkron motor giriş gücü ile hesaplanan çıkış gücü kullanılarak (5.3) denklemi ile asenkron motor veriminin yüke bağlı değişimi hesaplanmıştır.



Resim 5.9. Deney düzeneği elektrik panosu

Yukarıda da ifade edildiği üzere asenkron motorun verim denklemleri:

$$P_{AC\text{çıkış}} = P_{AC\text{giriş}} \eta_{AC} \quad (5.3)$$

$$P_{AC\text{çıkış}} = P_{DC\text{giriş}} \quad (5.4)$$

$$P_{DC\text{çıkış}} = P_{DC\text{giriş}} \eta_{DC} \quad (5.5)$$

(5.3), (5.4) ve (5.5) denklemleri kullanılarak yazılan asenkron motor verim denklemi ise;

$$\eta_{AC} = \frac{P_{DC\text{çıkış}}}{P_{AC\text{giriş}}} \frac{1}{\eta_{DC}} \quad (5.6)$$

$$P_{AC\text{giriş}} > P_{AC\text{çıkış}} = P_{DC\text{giriş}} > P_{DC\text{çıkış}} \quad (5.7)$$



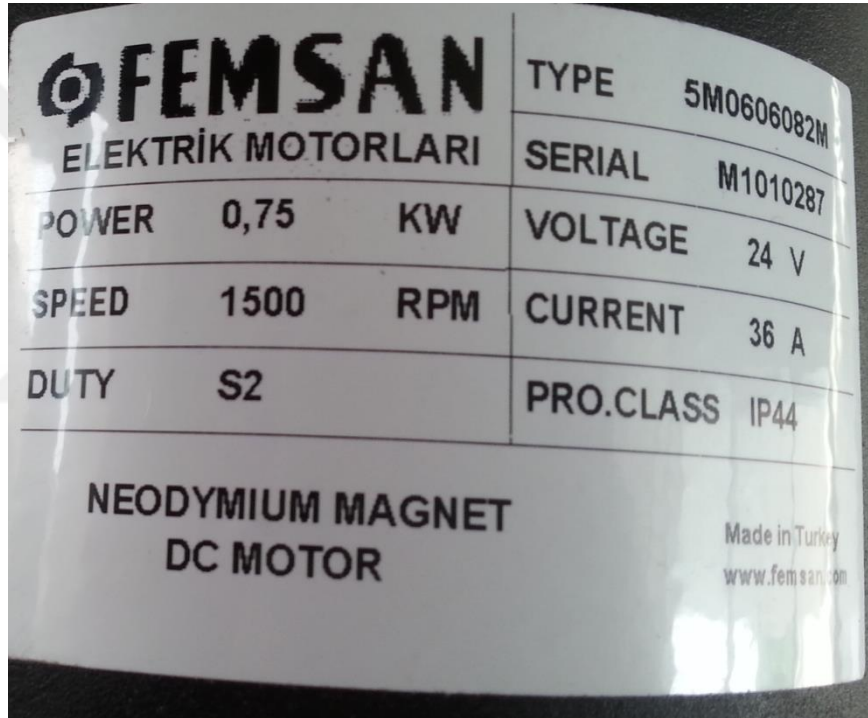
Resim 5.10. Deney düzeneği yükte çalışırken

Asenkron motorun şebekeden çektiği güç değerleri ile DC generatörün çıkışından elde edilen güç değerleri test ekipmanları tarafından ölçülmüştür. DC generatörün devir hızına, akıma ve momente göre değişen verim değerleri ise üretici firmadan temin edilmiştir.

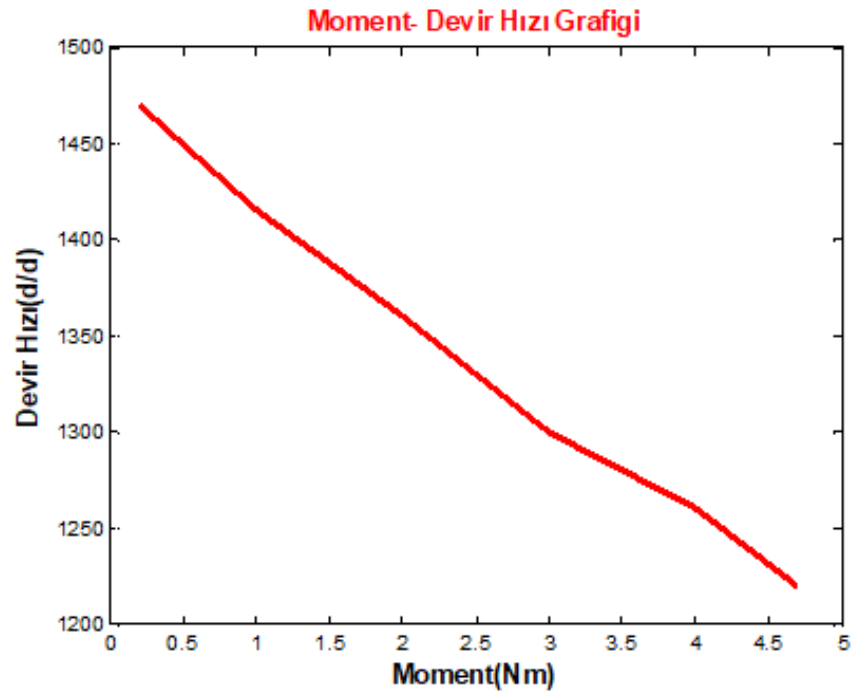
Çizelge 5.5. DC generatörün ölçülen verim değerleri

Ölçüm No	Devir Hızı (d/d)	Akım (A)	Moment(Nm)	Verim (%)
1	1470	4	0,2	32
2	1415	9,7	1	64
3	1360	16,5	2	72
4	1300	23,6	3	73
5	1260	30,4	4	74
6	1220	34,8	4,7	73

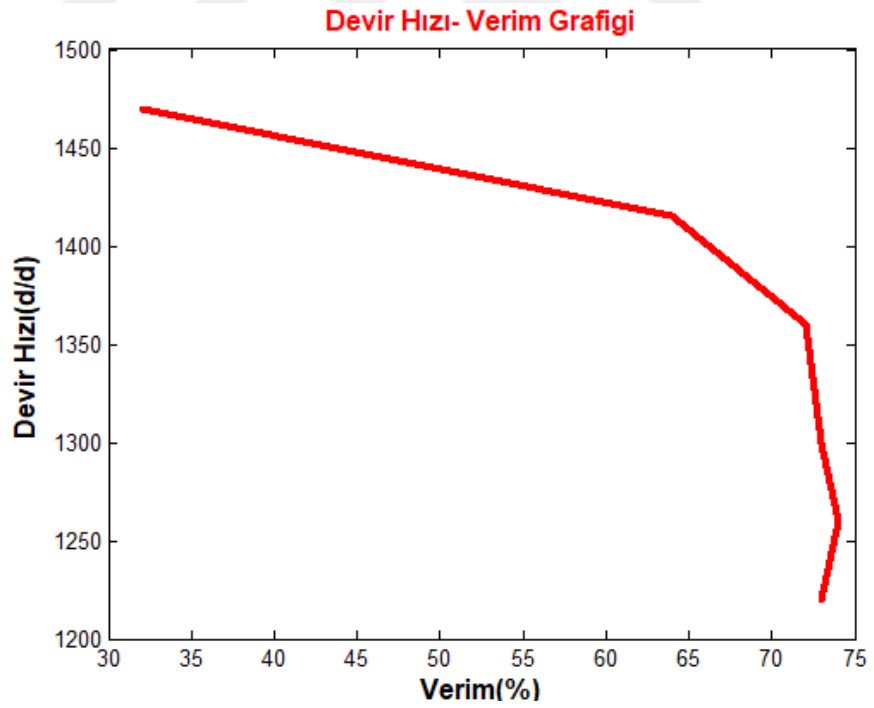
DC generatör firmasından temin edilen veriler kullanılarak devir hızı, akım ve momente göre değişen verim incelenmiştir.



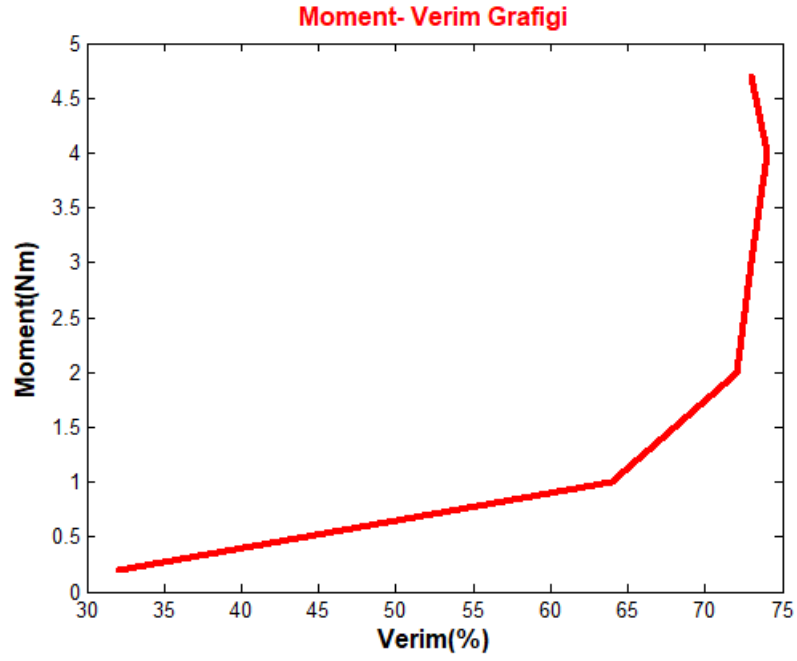
Resim 5.11. DC generatörün plaka değerleri



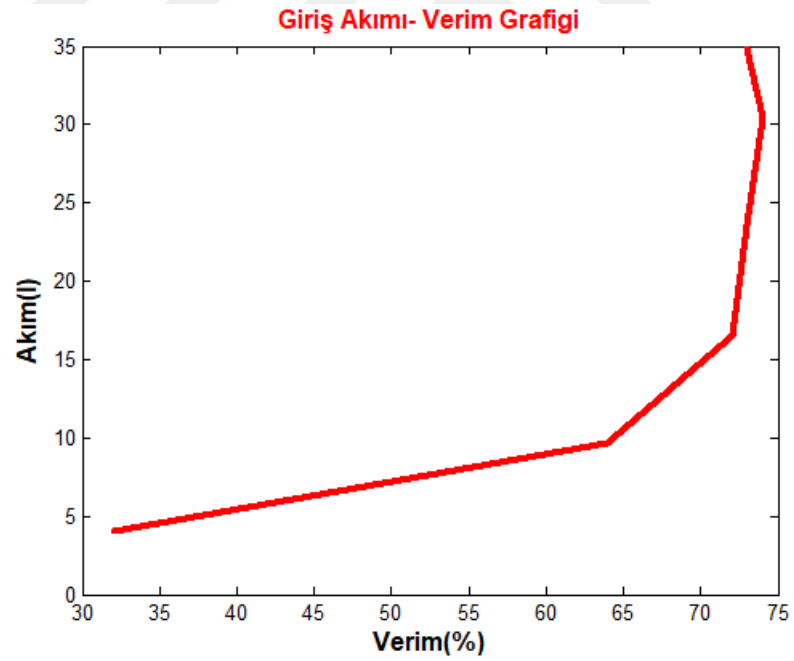
Şekil 5.2. DC generatör moment-devir hızı grafiği



Şekil 5.3. DC generatör devir hızı-verim grafiği



Şekil 5.4. DC generatör moment-verim grafiği



Şekil 5.5. DC generatör akım-verim grafiği

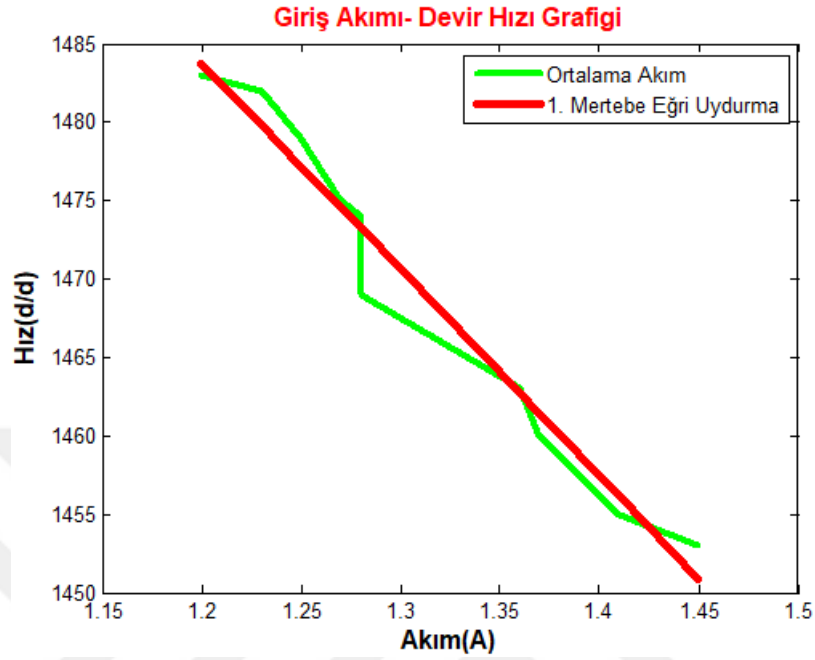
AC motor ile DC generatörün küple edildiği deney düzeneğinden elde edilen veriler ise çizelge 5.6'da gösterilmektedir. MATLAB programında bulunan "basic fitting" kullanılarak deney düzeneğinde ölçülen akım değerlerine göre anlık verim değerleri hesaplanarak çizelge 5.6'ya eklenmiştir.

Çizelge 5.6. Laboratuvar ortamında yapılan deney ölçüm sonuçları

	Asenkron Motor										Dc Generatör				Asenkron Motor Verimi (%)
	V _{ort}	I _{ort}	P(W)	Motor Yüklü (%)	Q(kVar)	Cos(fi)	S(kva)	n(d/d)	Gürültü (DB)	Isı-C	V _a	I _a	P(W)	DC Verim(%)	
1	376,3	1,2	337	44,9	0,72	0,43	0,78	1483	80,9	30,2	19,74	5,94	117,3	50,18	69,36
2	378,9	1,23	348	46,4	0,74	0,43	0,79	1482	80,5	33,1	19,83	6,26	124,1	51,32	69,49
3	379,3	1,25	364	48,5	0,74	0,44	0,82	1479	80,3	33,6	19,37	7,64	148	56,45	72,03
4	380	1,27	394	52,5	0,75	0,47	0,84	1475	81,1	33,8	19,02	8,96	170,4	60,05	72,02
5	379,5	1,28	413	55,1	0,74	0,49	0,84	1474	81,5	34,1	19,71	9,94	195,9	63,47	74,73
6	371,7	1,28	457	60,9	0,7	0,55	0,86	1469	82,1	34,4	20,2	11,95	241,4	67,91	77,78
7	375,9	1,36	532	70,9	0,72	0,6	0,89	1463	82,3	34,5	19,99	14,91	298,1	71,20	78,70
8	375,4	1,37	565	75,3	0,71	0,63	0,9	1460	83,1	34,7	20,23	15,56	314,8	71,61	77,80
9	374,3	1,41	576	76,8	0,72	0,63	0,91	1455	83,1	34,9	20,93	17,02	356,2	72,13	85,73
10	376	1,45	621	82,8	0,73	0,66	0,95	1453	83,7	35,4	20,88	18,63	389	72,46	86,45

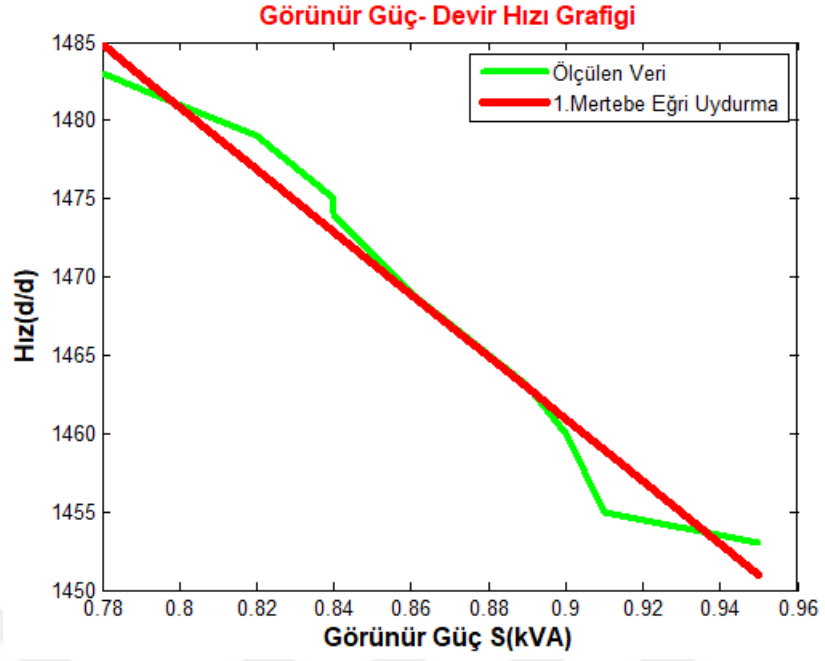
Laboratuvar ortamında yapılan ölçüm değerleri kullanılarak asenkron motorların devir hızı, güç, akım gibi parametrelerinin birbiriyle olan ilişkisi incelenmiştir.

Laboratuvar ortamında 0,75 kW AC motor ve 0,75 kW DC generatör ile oluşturulan deney düzeneğinde yapılan ölçümlere göre ortaya çıkan grafikler aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

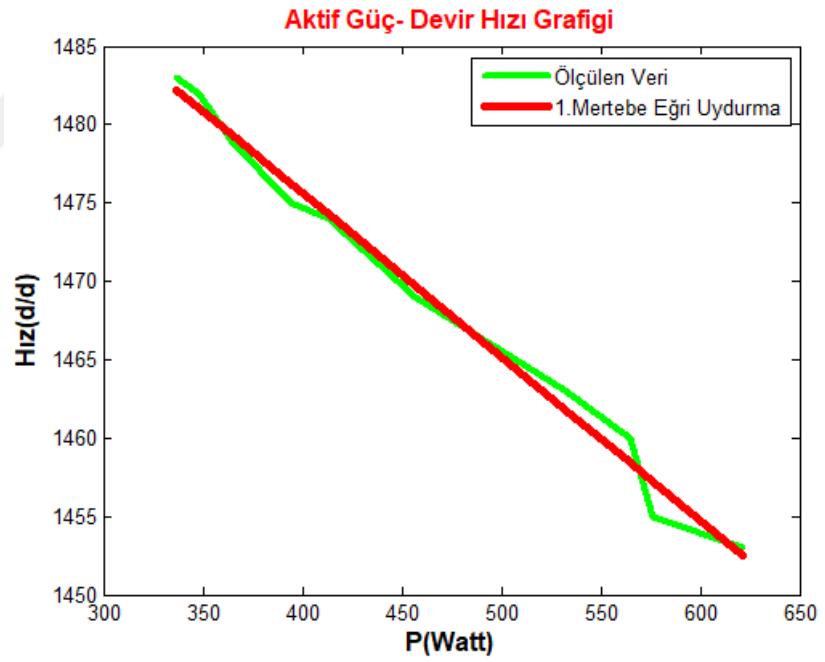


Şekil 5.6. AC motor giriş akımı - devir hızı grafiği

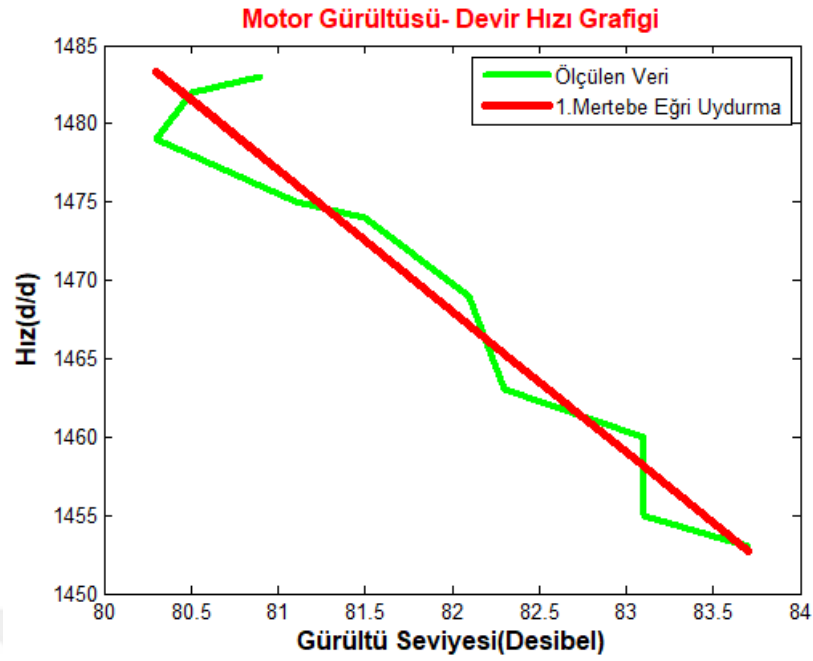
Şekil 5.6’da görüleceği üzere asenkron motor yüklendikçe şebekeden çekilen akım miktarı artmakta ve devir hızı azalmaktadır. Ortalama akım değeri ölçülen 3 faz akımının ortalamasıdır.



Şekil 5.7. AC motor görünür güç- devir hızı grafiği

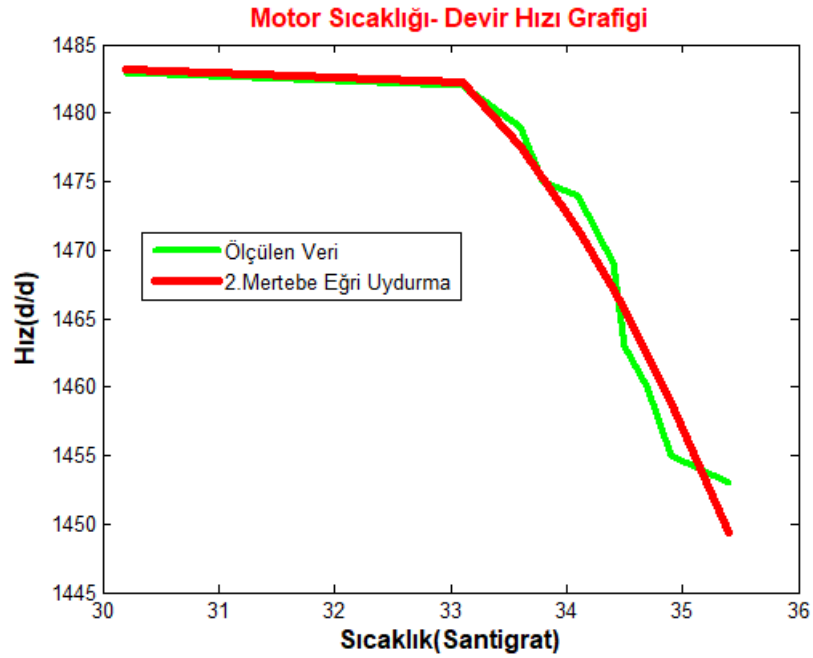


Şekil 5.8. AC motor aktif güç- devir hızı grafiği

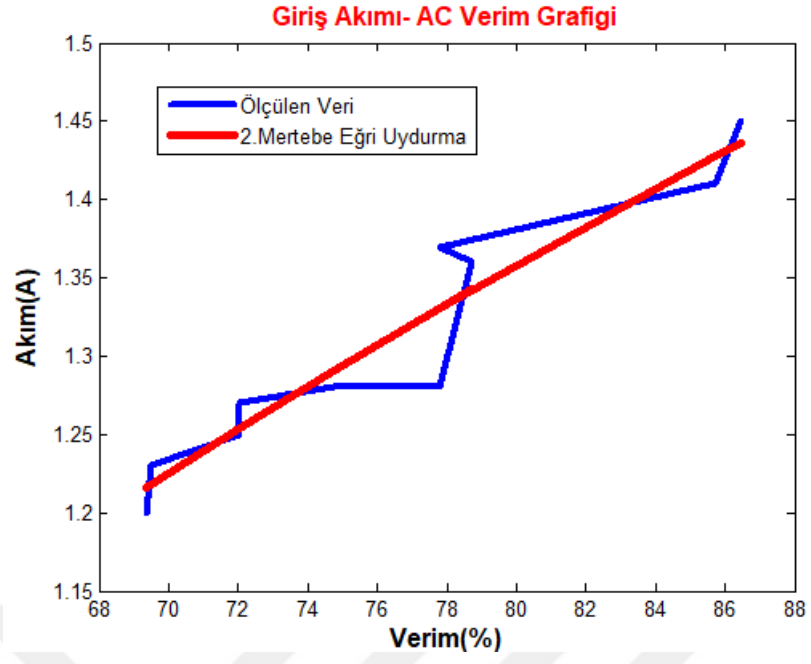


Şekil 5.9. AC motor gürültüsü- devir hızı grafiği

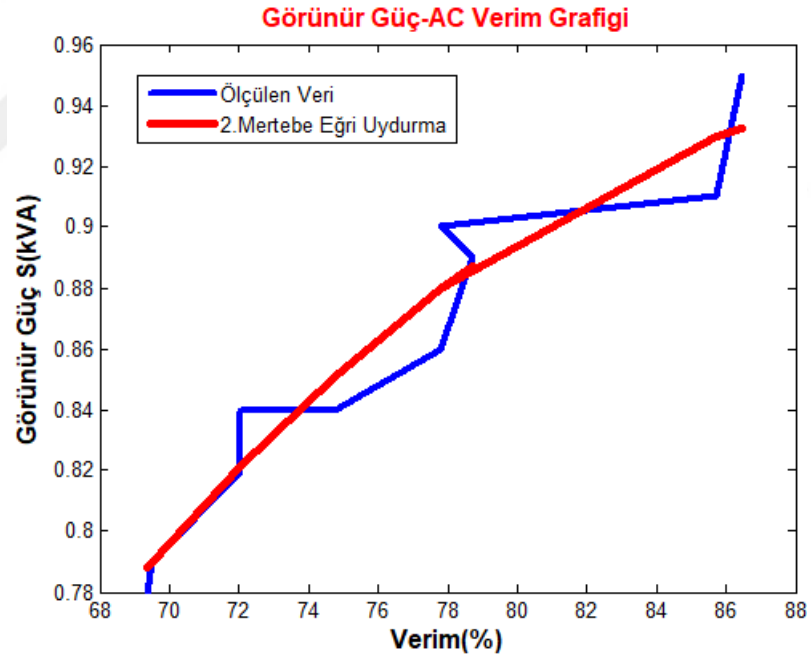
Şekil 5.9’da görüleceği üzere, deney düzeneğinde ölçümler yapılırken bazı anlarda dış ortam gürültüsünün sabit olmamasından dolayı motor gürültüsü değerlerinde dalgalanmalar görülmüştür.



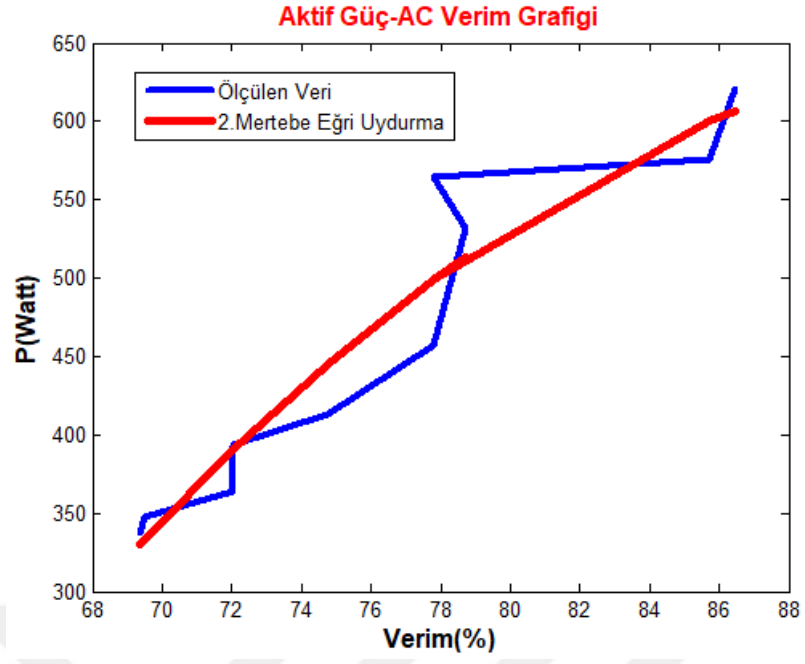
Şekil 5.10. AC motor sıcaklığı- devir hızı grafiği



Şekil 5.11. AC motor giriş akımı - verim grafiği

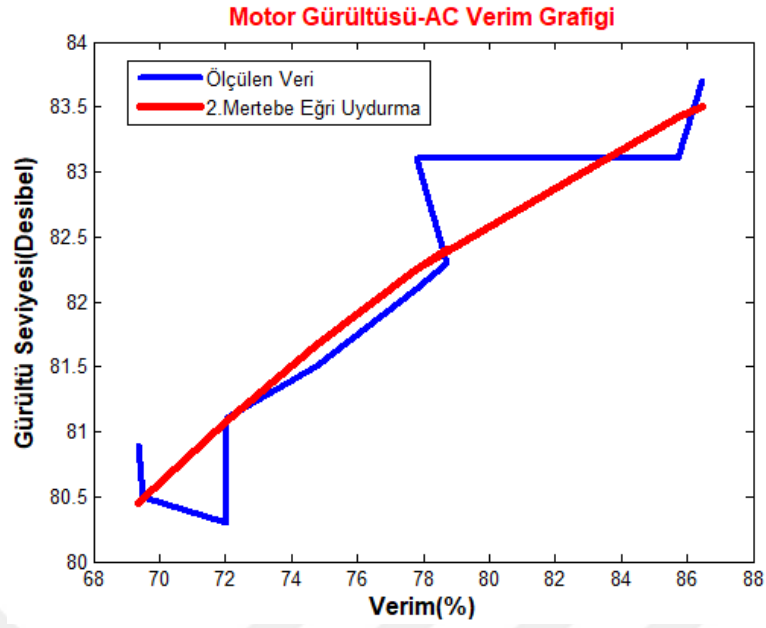


Şekil 5.12. AC motor görünür güç-verim grafiği



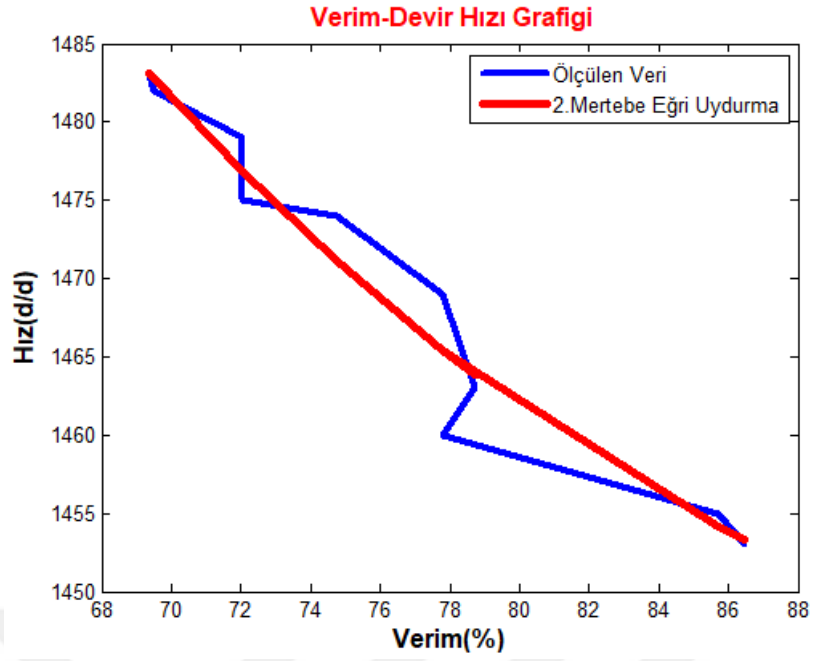
Şekil 5.13. AC motor aktif güç-verim grafiği

Şekil 5.13'te görüleceği üzere şebekeden çekilen güç arttıkça motor verimi artmaktadır.

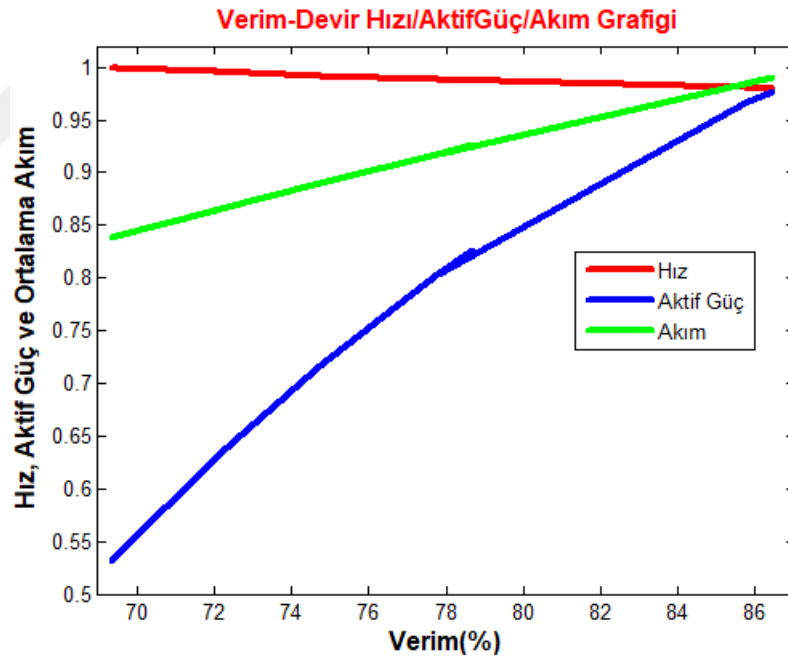


Şekil 5.14. AC motor gürültüsü-verim grafiği

Şekil 5.14'te görüleceği üzere, deney düzeneğinde ölçümler yapılırken bazı anlarda dış ortam gürültüsünün sabit olmamasından dolayı motor gürültüsü değerlerinde dalgalanmalar görülmüştür.



Şekil 5.15. AC motor devir hızı-verim grafiği



Şekil 5.16. AC motor hız/güç/akım-verim grafiği

Şekil 5.16'da görüleceği üzere asenkron motorun devir sayısı azaldıkça verim lineer şekilde artmaktadır. Şebekeden çekilen ortalama akım ve aktif güç değerleri arttıkça motor verimi artmaktadır.

5.3.2. Mermer fabrikası ölçüm sonuçları

Mermerin de dahil olduğu doğal taşlar, ocaklardan istihraç edildikten sonra ticareti yapılabilen en eski inşaat malzemeleridir. Binlerce yıldır yapılarda ve anıtlarda güzelliği, dayanıklılığı nedeniyle kullanılmaktadır. Kullanımı gittikçe artan doğal taşlar günümüzde özellikle inşaat, kaplama, döşeme, heykeltçilik, mezar taşı yapımı, mıcır, porselen ve cam sanayi, optik sanayi ve süs eşyası yapımında kullanılmaktadır. Doğal taş sektörü, son yıllarda yeni üreticilerin de pazara girmesiyle ivme kazanan; hem ülkemiz hem de dünya ticareti için en önemli sektörlerden birisidir.

Dünyanın en zengin mermer yataklarının bulunduğu Alp kuşağında yer alan Türkiye, 5,1 milyar m³ ve 13,9 milyar ton muhtemel mermer rezervine sahiptir. Ülkemizin toplam rezerv büyüklüğü, 15 milyar m³ olduğu tahmin edilen dünya rezervinin %33'üne karşılık gelmektedir. Ülkemizde çeşitli renk ve desenlerde kristalin kalker (mermer), kalker, traverten oluşumlu kalker (oniks), konglomera, breş ve magmatik kökenli kayalar (granit, siyenit, diyabaz, diyorit, serpantin, vb.) bulunmaktadır.

Sektörde yaklaşık 1.500 adet doğal taş ocağı, fabrika ölçeğinde faaliyet gösteren 2.000 kadar tesis, orta ve küçük ölçekli 9.000 atölye faaliyet göstermektedir. Sektörde yaklaşık 300 bin kişi istihdam edilmektedir. Üretimin en fazla olduğu iller; Balıkesir, Afyon, Bilecik, Denizli ve Muğla'dır. Bu illerin toplam üretimi ulusal üretimin % 65'ini oluşturmaktadır. Ekonomik mermer yataklarının bulunduğu diğer iller ise; Bursa, Kırşehir, Çankırı, Çorum, Kastamonu, Niğde, Kayseri, Artvin, Bitlis, Erzincan, Bayburt, Sivas, Tokat, Denizli, Kütahya, Eskişehir, Diyarbakır, Elazığ, Çanakkale, Konya, İstanbul ve Manisa'dır.

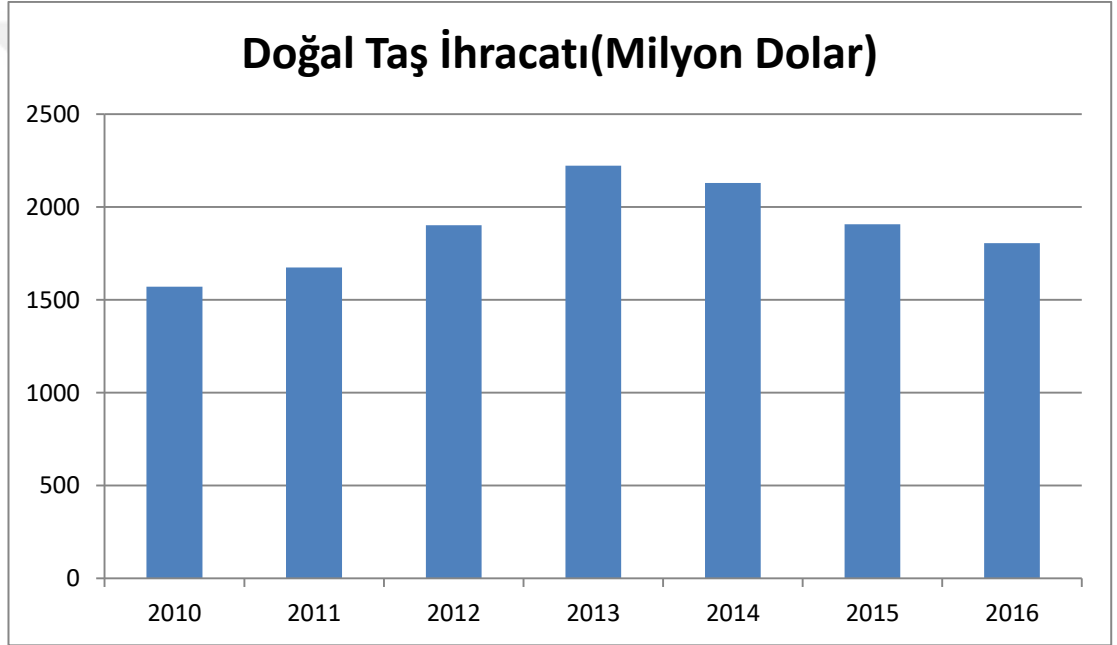
Türk mermeri, farklı renk skalası ve kalitesiyle dünyanın pek çok ülkesinde ve dünyaca tanınmış mekânların iç ve dış dekorasyonunda kullanılmaktadır. Vatikan'ın en önemli kiliselerinden biri olan Saint Pierre kilisesinin girişindeki sütun ve kaplamalarda Afyon Iscehisar mermerleri kullanılmıştır. ABD'de Beyaz Saray'da yetkililerin basın açıklamaları yaptıkları alanda Elazığ Vişnesi kullanılmaktadır. Alman Parlamentosu, Fransa Parlamentosu ve ABD Temsilciler Meclisi Elazığ Vişnesinin kullanıldığı diğer mekânlardır. Dünyanın en önemli eğlence merkezlerinden Disneyland'da 18 bin metrekare Türk mermeri yer alırken; dünyanın

dört bir yanındaki pek çok lüks otelin ıslak zeminlerinde Türk mermeri kullanılmıştır.

Doğal taş üretiminin tamamına yakını özel sektör tarafından karşılanmaktadır. Türkiye’de yıllık doğal taş üretimi 11,5 milyon ton civarında olup işleme tesislerinin toplam plaka üretim kapasitesi yaklaşık 6,5 milyon m²’dir.

Türkiye’nin doğal taş sektöründeki ihracat kompozisyonuna baktığımızda, Çin %34,2’lik pay ile ilk sırada yer almaktadır. Çizelge 5.7’de doğal taş ihracatının yıllık değişimi görülmektedir (Anonim).

Çizelge 5.7. Ülkemizin doğal taş ihracatı (2010-2016)



Muğla’nın üretim ve ihracat kapasitesi bakımından en güçlü sektörlerinden biri olan mermer istihraç ve işleme sektöründeki asenkron motor kullanımı diğer sektörlerle göre daha yoğundur. Bundan dolayı, asenkron motor verimliliğinin saha ölçümleri için mermer fabrikaları seçilmiştir. Muğla’da faaliyet gösteren 60’dan fazla mermer işleme ve istihraç tesisi Bayır, Yatağan ve Kavaklıdere bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Saha ölçümleri ve anket çalışması ise Yatağan ve Bayır’da faaliyet gösteren orta ölçekli 4 mermer işleme tesisinde gerçekleştirilmiştir.

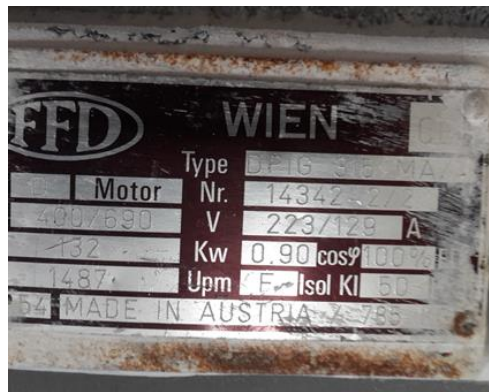
Mermer blokları ST(Este) veya Katrak makinalarında kesilmektedir. Ölçüm yapılan fabrikada kullanılan blok kesme makinası ise ST(Este) türündedir. Dış vinç yardımıyla ST’ye yüklenen blok istenen kalınlık ve ebatta kesildikten sonra amaca

göre fayans hattına veya ebatlama makinelerine gönderilmektedir. Fayans hattından çıkan ürünler 10'luk fayanslar halinde kutulara yerleştirilip stoklanmaktadır. Ebatlama makinelerine gönderilen plakalar ise istenilen ebatlarda kesilerek stoklanmaktadır. Dairesel ST testerelerinde, çelik disklerin çevresinde elmas soketler dizilmiştir. Çelik diskler dönerken elmas soketler yardımıyla mermer kesimi yapılmaktadır (Anonim).

Yatağan'da 2 ve Bayır'da 2 adet olmak üzere 4 mermer fabrikasındaki 9 asenkron motorun plaka değerleri çizelge 4.8'de gösterilmektedir. Ölçüm yapılan asenkron motorların anma güçleri 110-132 kW değerleri arasında olup tümünün senkron devir hızı 1500 d/ddır.

Çizelge 5.8. Sahada ölçümü alınan asenkron motorların plaka değerleri

Test Motor Numarası	Anma Gücü(kW)	Modeli	Anma Hızı(d/d)	Anma Akım(A)	Anma Momenti (nm)	Cos(φ)	Verim		
							(4/4)	(3/4)	(1/2)
1	132	GM2E 315 M 4a	1485	235	849	0,86	94,7	94,5	93,8
2	132	DPIG 315 MA/4	1487	223	848	0,90	94,9	95	94,8
3	110	GM2E 315 S4	1485	195	707	0,86	94,5	94,5	93,8
4	110	GM2E 315 S4	1485	195	707	0,86	94,5	94,5	93,8
5	132	GM 315 M 4a	1485	249	849	0,86	94,7	94,5	93,8
6	132	GM 315 M 4a	1485	235	849	0,86	94,7	94,5	93,8
7	110	GM2E 315 S4	1485	195	707	0,86	94,5	94,5	93,8
8	132	GM2E 315 M 4a	1485	235	849	0,86	94,7	94,5	93,8
9	110	GM2E 315 S4	1485	195	707	0,86	94,5	94,5	93,8



Resim 5.12. DPIG 315 MA/4 tip asenkron motorun plaka değeri

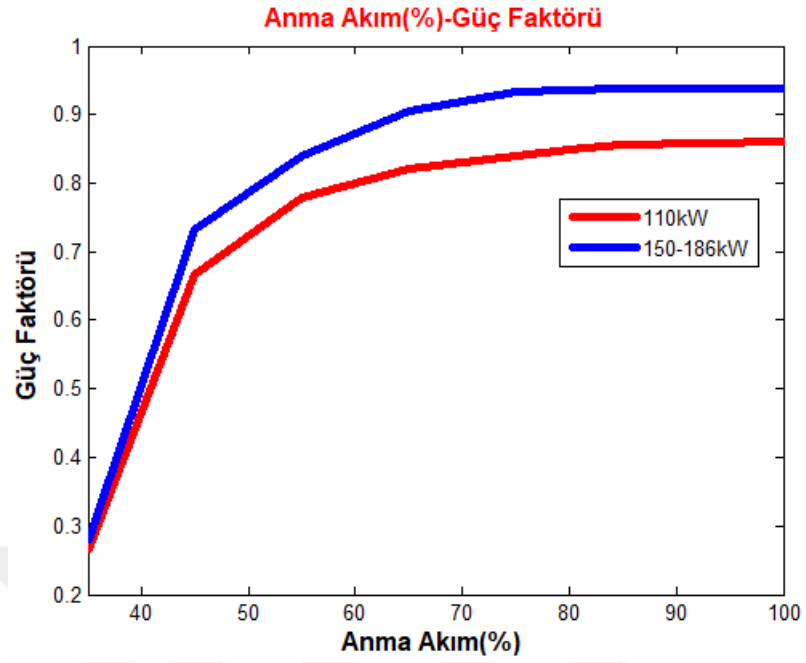
Saha Ölçümleri

Mermer işleme fabrikasında yapılan ölçümlerde pens ampermetre ile asenkron motorların akım-gerilim değerleri ölçülmüştür. Ayrıca optik takometre ile motor devir hızı ölçülmüştür. Fabrika içerisinde aynı anda birden fazla asenkron motor çalıştığı için ses seviyesi ölçümleri gerçek değerleri yansıtmamaktadır. Bundan dolayı ses seviyesi ölçüm sonuçları çizelgelere dahil edilmemiştir.



Resim 5.13. GM2E315M4A tip asenkron motor mermer kesimi

Yatağan ve Bayır'da faaliyet gösteren 4 mermer fabrikasının bünyesinde çalışan 9 asenkron motorun ölçüm sonuçları çizelge 5.9'da gösterilmiştir. Motor ölçüm sonuçları çizelgeye eklenirken mermer kesim hızı ve mermer damar sertliğine göre anlık değişen ölçüm değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır. Asenkron motorun şebekeden çektiği gücü hesaplamak için (2.12) denklemi kullanılmıştır. Söz konusu denklemde de görüleceği üzere şebekeden çekilen aktif gücü hesaplayabilmek için akım ve yüke bağlı değişen güç faktörü değerine ihtiyaç vardır. Bu kapsamda, anlık güç faktörünü elde edebilmek için ilk olarak ölçülen akım değerinin anma akımına oranı hesaplanmaktadır. Son olarak, şekil.5.17'de gösterilen grafik ve MATLAB programı yardımıyla güç faktörü değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 5.17. Anma akım yüzdesi-güç faktörü grafiği (Anonim)

Şebekeden çekilen akımın, anma akıma oranı %75 civarlarındaiken güç faktörü değeri maksimum değere yaklaşmaktadır. Ayrıca asenkron motorun anma gücü arttıkça güç faktörü değeri artmaktadır.



Resim 5.14. GM2E315S4 tip asenkron motor mermer kesimi

Çizelge 5.9’da belirtilen ölçüm sonuçları sadece Este makinalarının dikey testerelerinde kullanılan asenkron motorlardan elde edilmiştir. Este makinaları mermer bloklarının kesilmesi sürecinde en fazla kullanılan makinalardır.

Çizelge 5.9. Asenkron motorların saha ölçüm sonuçları

Motor Ölçüm Numarası		I1	I2	I3	I _{ort}	V _{ort}	Devir Hızı (d/d)	P _g (kW)
1	Boşta	65	67,2	66	66,1	394	1499	11,32
	Yüklü	161,2	141,8	153,7	152,23	393	1491	84,87
2	Boşta	80,5	83,3	84,3	82,7	394	1499	16,99
	Yüklü	135,7	122,9	128,4	129,0	394	1496	70,25
3	Boşta	47,9	51	57,7	52,20	394	1499	8,94
	Yüklü	166,1	172,3	194,3	177,57	390	1488	102,92
4	Boşta	103,3	101,5	106,3	103,70	391	1499	44,74
	Yüklü	173,5	170,2	178,8	174,17	389	1488	100,57
5	Boşta	92,4	91,4	82,8	88,87	379	1499	17,85
	Yüklü	250	253,8	233,0	245,6	372	1486	136,06
6	Boşta	100,4	104,6	105,2	103,40	375	1499	43,05
	Yüklü	247,0	254,8	217,4	239,73	372	1486	132,84
7	Boşta	74,3	82,7	78,4	78,47	391	1499	10,95
	Yüklü	247,5	250,8	263,4	253,9	382	1482	144,47
8	Boşta	61,2	61,1	57,6	59,97	375	1499	8,02
	Yüklü	217	224	214	218,33	360	1489	116,94
9	Boşta	52	46,7	50,7	49,80	372	1499	7,96
	Yüklü	96,7	98,9	99,3	99,27	370	1494	47,59

Este makinalarını kullanan ustalar ile yapılan görüşmelerde, eski ve sarıma girmiş olan asenkron motorların düşük yüklerde çalıştırıldığı tespit edilmiştir. Çünkü eski motorlar anma yüklerine yaklaştığında este makinası titreşime girmektedir. Bundan dolayı elmas testereler kendi eksenini etrafında düzgün dönmekte ve kısa sürede testereler kullanılamaz hale gelmektedir.



Resim 5.15. DPIG 315 MA/4 tip asenkron motor mermer kesimi

Mermer fabrikalarının yoğunlaştığı Yatağan ve Bayır bölgelerinden seçilen 4 farklı mermer fabrikasının yetkililerine yöneltilen anket sonuçları çizelge 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13'te gösterilmektedir. Mermer fabrikalarının anket sonuçları A, B, C, D olarak isimlendirilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere eski olan asenkron motor sık sık arızalandığı ve bakıma girdiği için ortalama günlük çalışma süresi diğer motora göre daha azdır.



Resim 5.16. Pens ampermetre ile mermer fabrikasında yapılan ölçümler

Çizelge 5.10. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları_ A mermer fabrikası

SORU	Ölçüm_1	Ölçüm_2
Kullanılan Motor Yaklaşık Kaç Yaşında?	1	23
Kullanılan Motor Günlük Ortalama Kaç Saat Çalışıyor?	13,5 saat	10,5 saat
Kullanılan Motor Aylık Ortalama Kaç Gün Çalışıyor?	26 gün	26 gün
Motor Sargıları Değiştirildi mi?	Hayır	Evet
Sargılar Kaç Kez Değiştirildi?	-	1
Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor mu?	Evet	Evet
Hangi Tür Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor?	Yıldız- Üçgen Bağlantısı	Yıldız- Üçgen Bağlantısı
Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç kWh?	1.500.801 kWh	
Ortalama Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç TL?	540.000 TL	
Geri Ödeme Süreniz Kaç Ay Olursa Verimsiz Motorunuzu Daha Verimli Bir Motorla Değiştirirsiniz?	36 Ay	

Çizelge 5.11. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları__ B mermer fabrikası

SORU	Ölçüm_3	Ölçüm_4
Kullanılan Motor Yaklaşık Kaç Yaşında?	14	13
Kullanılan Motor Günlük Ortalama Kaç Saat Çalışıyor?	16 saat	16 saat
Kullanılan Motor Aylık Ortalama Kaç Gün Çalışıyor?	26 gün	26 gün
Motor Sarguları Değiştirildi mi?	Evet	Evet
Sargılar Kaç Kez Değiştirildi?	En az bir defa	En az bir defa
Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor mu?	Hayır	Hayır
Hangi Tür Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor?	-	-
Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç kWh?	1.067.000 kWh	
Ortalama Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç TL?	384.000 TL	
Geri Ödeme Süreniz Kaç Ay Olursa Verimsiz Motorunuzu Daha Verimli Bir Motorla Değiştirirsiniz?	12 Ay	

Çizelge 5.12. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları__ C mermer fabrikası

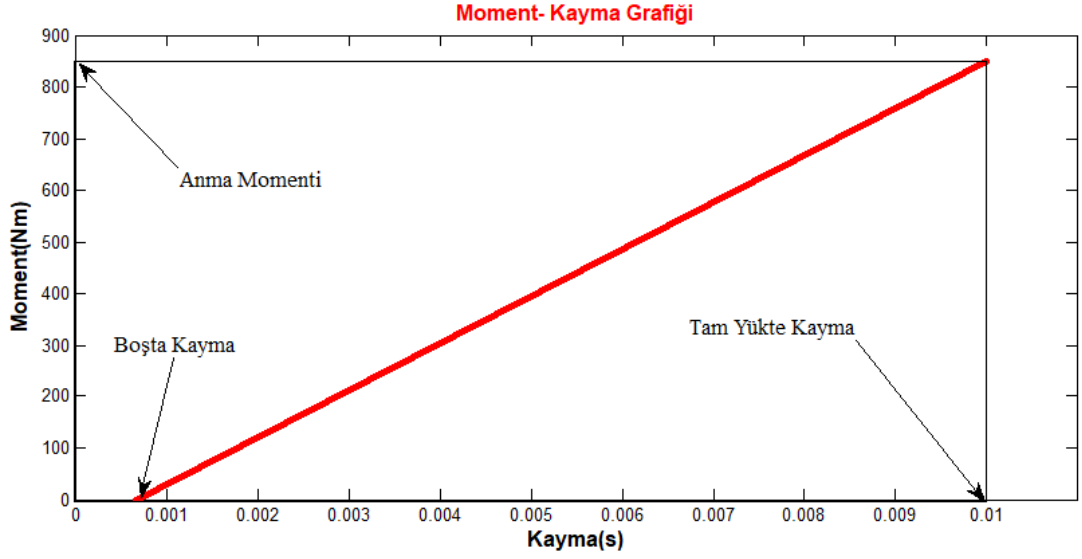
SORU	Ölçüm_5	Ölçüm_6
Kullanılan Motor Yaklaşık Kaç Yaşında?	10	10
Kullanılan Motor Günlük Ortalama Kaç Saat Çalışıyor?	7 saat	7 saat
Kullanılan Motor Aylık Ortalama Kaç Gün Çalışıyor?	26 gün	26 gün
Motor Sarguları Değiştirildi mi?	Evet	Evet
Sargılar Kaç Kez Değiştirildi?	En az bir defa	En az bir defa
Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor mu?	Evet	Evet
Hangi Tür Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor?	Yıldız- Üçgen Bağlantısı	Yıldız- Üçgen Bağlantısı
Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç kWh?	1.000.000 kWh	
Ortalama Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç TL?	360.000 TL	
Geri Ödeme Süreniz Kaç Ay Olursa Verimsiz Motorunuzu Daha Verimli Bir Motorla Değiştirirsiniz?	12 Ay	

Çizelge 5.13. Mermer fabrikası yetkililerine yöneltilen anket sonuçları__ D mermer fabrikası

SORU	Ölçüm_7	Ölçüm_8	Ölçüm_9
Kullanılan Motor Yaklaşık Kaç Yaşında?	12	10	17
Kullanılan Motor Günlük Ortalama Kaç Saat Çalışıyor?	18 saat	17 saat	17 saat
Kullanılan Motor Aylık Ortalama Kaç Gün Çalışıyor?	26 gün	26 gün	26 gün
Motor Sargıları Değiştirildi mi?	Hayır	Evet	Evet
Sargılar Kaç Kez Değiştirildi?	-	1	En az bir defa
Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor mu?	Evet	Evet	Evet
Hangi Tür Verim Arttırıcı Ekipman Kullanılıyor?	Yıldız- Üçgen Bağlantısı	Yıldız- Üçgen Bağlantısı	Yıldız- Üçgen Bağlantısı
Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç kWh?	1.110.000 kWh		
Ortalama Elektrik Enerjisi Sarfiyatınız Yıllık Kaç TL?	400.000 TL		
Geri Ödeme Süreniz Kaç Ay Olursa Verimsiz Motorunuzu Daha Verimli Bir Motorla Değiştirirsiniz?	6 Ay		

5.3.3. Moment-kayma yöntemiyle sahada ölçülen asenkron motorların verimlerinin tahmin edilmesi

Bu bölümde, mermer fabrikalarında ölçülen asenkron motor çalışma değerleri ve moment-kayma yöntemi kullanılarak söz konusu asenkron motorların verimleri tahmin edilecektir. Bölüm 3.4.7’de moment-kayma metodu hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Önceki bölümde anlatıldığı üzere motorların optimum çalışabileceği yük aralığında moment ile kayma eğrisi neredeyse doğrusaldır. Moment- kayma eğrisinin çizilebilmesi içinse tam yükteki güç ve tam yükteki hız değeri ile boşa çalışma hız değerlerinin kullanılması gerekmektedir. İlk olarak ölçümü yapılan 9 adet asenkron motorun plaka değerleri ve ölçülen boşa çalışma devir hızı kullanılarak şekil 5.18’de gösterilen şekilde bir moment-kayma eğrisi oluşturulmuştur. Saha ölçümleri sırasında lazer takometre ile ölçülen anlık devir hızı kullanılarak motorun anlık kayması hesaplanmıştır. MATLAB (basic fitting) yardımıyla şekil 5.18’den motorun anlık momenti hesaplanmıştır.



Şekil 5.18. GM2E 315 M4 a tip motorun moment- kayma grafiği

$$P_{\zeta} = \frac{T \cdot n}{9,55} \quad (5.1)$$

Motorun devir hızını ölçtüğümüze ve moment değerini de hesapladığımızı göre motorun milindeki çıkış gücünü denklem (5.1)'i kullanarak hesaplayabiliriz. Tüm bu işlemler yapıldıktan sonra hesaplanan değerler çizelge 5.14'te görülebilir:

Çizelge 5.14. Mermer fabrikalarında ölçülen asenkron motorların verimleri

Motor Ölçüm Numarası	Motor Anma Gücü (kW)	Devir Hızı (d/d)	Moment (Nm)	Iort(A)	Cos (φ)	Pg (kW)	Pç (kW)	Verim (%)
1	132	1491	485	152,23	0,819	84,87	75,72	89,22
2	132	1496	353	129,0	0,798	70,25	55,22	78,61
3	110	1488	555	177,57	0,858	102,92	86,48	84,03
4	110	1488	555	174,17	0,857	100,57	86,48	85,99
5	132	1486	785	245,6	0,860	136,06	122,15	89,75
6	132	1486	785	239,73	0,860	132,84	122,15	91,95
7	110	1482	858	253,9	0,860	144,47	133,15	92,16
8	132	1489	667	218,33	0,859	116,94	103,93	88,87
9	110	1494	252	99,27	0,748	47,59	39,42	82,85

6. SONUÇLAR

6.1. Bulgular ve Analizler

Bir önceki bölüm olan Saha Deneyle ve Prosedürleri bölümünde laboratuvar ortamında ve sahada yapılan ölçüm sonuç ve analizleri incelenmiştir. Bu bölümde ise mermer fabrikalarında kullanılan 9 adet asenkron motorun daha yüksek verimli motorlar ile değiştirilme fizibilitesi analiz edilmiştir. Bu kapsamda eski ve yeni motorların verim değerleri kullanılarak yıllık enerji ve parasal tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Mevcut motorların hurda değeri hesaplanırken piyasada geçerli olan hurda alım fiyatı baz alınmıştır. Çizelge 6.1’de değiştirilecek motorlarla ilgili birim değerler gösterilmektedir:

Çizelge 6.1.Değiştirilecek motorlarla ilgili birim değerler

	Birim	Miktar
1 Kg Hurda alım değeri	TL	1,17
1 kWh Elektrik fiyatı [f]	TL	0,36
110 kW Verimli AC Motor Fiyatı	TL	13.105
132 kW Verimli AC Motor Fiyatı	TL	15.925
GM2E 315 M 4a tip motor ağırlığı	Kg	861
GM2E 315 S4 tip motor ağırlığı	Kg	784
DPIG 315 MA/4 tip motor ağırlığı	Kg	750

Mermer fabrikaları genellikle çift vardiya sistemi ile çalışmaktadır. Mermer fabrikalarının sadece biri yerleşim alanı içerisinde kaldığı ve dolayısıyla tek vardiya çalışmak zorunda olduğu için günlük çalışma süresi diğer fabrikalara göre daha azdır. Anket çalışmasına göre asenkron motorların ortalama 9 senede bir sargılarının değiştirildiği hesaplanmıştır. Motor sargılarının değiştirilmesinin piyasa fiyatının ise yaklaşık 3.700 TL olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca motor rulmanlarının ortalama 2 senede bir değiştirildiği ve rulman değişim maliyetinin yaklaşık 700 TL olduğu teknik yetkililerden öğrenilmiştir. Bu kapsamda eski motorların yıllık bakım maliyetinin yaklaşık 762 TL olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2. Mermer fabrikalarında kullanılan asenkron motorların yenileme fizibilitesi

Motor Ölçüm Numarası	Motor Kullanım Süresi (Yıl)	Motor Anma Gücü (kW)	P _ç (kW)	Motor Yüğü (%)	Mevcut Motor Verimi (%) [η_1]	Yeni Motor Verimi IE2 (%) [η_2]	Yıllık Çalışma Süresi (saat) [t]	Yıllık Enerji Tasarrufu (kWh/Yıl) [K]	Yıllık Tasarruf Değeri (TL/Yıl) [Y]	Eski Motor Hurda Değeri (TL) [f_h]	Yeni Motor Maliyeti (TL) [f_y]	Yıllık Bakım Maliyeti (TL) [f_b]	Motor Yenileme Maliyeti (TL) [f_m]	Motor Yenileme Geri Ödeme Süresi(Ay) [$t_ö$]
1	1	132	75,7	64,3	89,22	94,5	4.212	19.977,6	7.191,9	1.007,4	15.925	0	14.917,6	24,9
2	23	132	55,2	53,2	78,61	93,8	3.276	37.281,1	13.421,2	877,5	15.925	762	14.285,5	12,8
3	14	110	86,5	93,6	84,03	94,7	4.992	57.907,4	20.846,7	917,3	13.105	762	11.425,7	6,6
4	13	110	86,5	91,4	85,99	94,7	4.992	46.176,2	16.623,4	917,3	13.105	762	11.425,7	8,2
5	10	132	122,2	103,1	89,75	94,7	2.184	15.449,0	5.561,6	1.007,4	15.925	762	14.155,6	30,5
6	10	132	122,2	100,6	91,95	94,7	2.184	8.416,5	3.030,0	1.007,4	15.925	762	14.155,6	56,1
7	12	110	133,2	131,3	92,16	94,7	5.304	20.516,4	7.385,9	917,3	13.105	762	11.425,7	18,6
8	10	132	103,9	88,6	88,87	94,7	5.616	40.398,3	14.543,4	1.007,4	15.925	762	14.155,6	11,7
9	17	110	39,4	43,3	82,85	93,8	5.304	29.513,6	10.624,9	917,3	15.925	762	14.245,7	16,1

Mermer fabrikalarında yapılan ölçüm sonuçları ile firma yetkililerine yöneltilen anket sonuçları kullanılarak asenkron motor yenileme fizibilite analizi çizelge 6.2’de gösterilmektedir. Özellikle eski ve sargıları değişmiş olan motorların verimlilik değerlerinin çok düşük olduğu dikkat çekicidir.

Çizelge 6.2'den de görüleceği üzere fizibilite analizi yapılan 9 motorun 3 adeti 0-12 ay, 4 adeti ise 12-24 ay arasında kendini geri ödemektedir. Firma yetkililerin anketlerde belirttikleri kabul edilebilir geri ödeme sürelerinin 6-12 ay arasında olduğu göz önünde bulundurulduğunda, sadece 4 adet asenkron motorun daha verimli olan asenkron motorlar ile değiştirilmesinin mümkün olabileceği görülmektedir. Fizibilite analizi yapılan 9 asenkron motorun ortalama geri ödeme süresinin ise 20,6 ay olduğu hesaplanmıştır Çizelge 6.2'deki sonuçlar elde edilirken kullanılan denklemler aşağıda belirtilmiştir.

$$K = P_{\phi} t \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)'de yıllık elektrik enerjisi tasarrufu (kWh) hesaplanmakta olup, motor milinden aynı çıkış gücünü elde edebilmek için mevcut ve yeni motorun şebekeden çekeceği güçlerin farkı ile motorların yıllık çalışma süreleri kullanılmıştır.

$$Y = K * f \quad (6.2)$$

Denklem (6.2) 'de yıllık elektrik enerjisi tasarrufu ve güncel sanayi elektriği kWh maliyet verileri kullanılarak tasarrufun yıllık TL değeri hesaplanmaktadır.

$$f_m = f_y - (f_h + f_b) \quad (6.3)$$

Denklem (6.3)'te sıfır motor maliyeti ile eski motorun hurda satış gelir değeri kullanılarak motor yenileme maliyeti hesaplanmaktadır.

$$t_{\phi} = \frac{f_m}{Y} 12 \quad (6.4)$$

Denklem (5.4)'te motor yenileme maliyeti ile yıllık tasarrufun mali değeri kullanılarak motor yenileme geri ödeme süresi hesaplanmaktadır.

6.2. Fizibilite Hesaplama Örneği

Bu bölümde daha açıklayıcı olması açısından, çizelge 6.2'deki fizibilite hesaplamalarının uygulamalı örneği verilmektedir. Söz konusu hesaplama örneği, motor ölçüm numarası 1 olan fizibilite hesabı için yapılmaktadır.

İlk olarak yeni ve daha verimli bir asenkron motor kullanılması halinde tasarruf edilecek yıllık elektrik enerjisi miktarı denklem (6.1) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K=75,7(\text{kW}) * 4212(\text{saat}) * \left(\frac{1}{0,892} - \frac{1}{0,945} \right) = 19.977,58 \text{ (kWh/Yıl)}$$

İkinci olarak ise tasarruf edilecek elektrik enerjisinin TL değeri denklem (6.2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Y=19.977,588 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{Yıl}} \right) * 0,36 \left(\frac{\text{TL}}{\text{kWh}} \right) = 7.191,93 \left(\frac{\text{TL}}{\text{Yıl}} \right)$$

Tasarruf edilecek elektrik enerjisinin mali değeri hesaplandıktan sonra ise motor yenilemenin maliyeti hesaplanmaktadır. Motor yenilemenin maliyetini hesaplamak içinse yeni motorun piyasa değerinden yıllık bakım maliyeti ile eski motorun hurda değeri çıkarılmaktadır. Söz konusu hesaplamalar denklem (6.3) kullanılarak yapılmaktadır.

$$f_m = 15.925 - (1.017,4 + 0) = 14.917,6 \text{ (TL)}$$

Son olarak ise motor yenilemenin geri ödeme süresi denklem (6.4) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$t_{\text{ö}} = \frac{14.917,6 \text{ (TL)}}{7.191,93 \text{ (TL/Yıl)}} * 12 = 24,9 \text{ (Ay)}$$

KAYNAKLAR

Altıntaş, F., *Asenkron Makinalar*, Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı Meslek Yüksek Okulu,70s.

Anonim, *5. Ünite Asenkron Motorları*, Milli Eğitim Bakanlığı- Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğü, 41s.

Anonim, *Elektrik Motor Sistemlerinde Enerji Verimliliği*, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, 38s.

Anonim, *Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri*, Türkiye Elektrik İletim A.Ş.,

Anonim, *Key World Energy Statistics*, Uluslararası Enerji Ajansı, 2017, 96s.

Anonim, *Elektrik Motor Sistemlerinde Enerji Verimliliği*, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, 38s.

Anonim, *Asenkron Motor Kataloğu*, GAMAK.

Anonim, *IE2 Yüksek Verimli & IE3 Süper Yüksek Verimlilik Sınıfı AC Motorları*, Siemens.

Anonim, *Determining Electric Motor Load And Efficiency*, U.S. Department of Energy, 16s.

Anonim, *Doğal Taş Sektörü*, T.C. Ekonomi Bakanlığı- İhracat Genel Müdürlüğü, Ankara, 2017,9s.

Anonim, *Makine Teknolojisi-Mermer Plaka Kesimi(1)*, Milli Eğitim Bakanlığı, 2011, 39s.

Anonim, *İhracat Rakamları İstatistikleri, İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği*, 2017

Anonim, *Premium Verimli Motorlar*, Prism Engineering, 2017

- Baş, M.İ. (2010) *Değişken Gerilim Ve Frekanslı, Senkronuz Ve Sinüs Olmayan PWM İle Çevirici Tasarımı Ve İncelenmesi*, Yüksek Lisans, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 107s.
- Baykal, R. (2011) *Asenkron Motorlar Üzerine Enerji Verimliliği Uygulaması*, Yüksek Lisans, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 92s.
- Becnel, C.L, Kılıgore J.W. ve Merrill E.F. (1997), Determining Motor Efficiency by Field Testing, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-23(3): 440-443.
- Çatalbaş, B. ve Özgül M., (2017), Sanayi Ürünleri Güvenliği ve Denetimi Genel Müdürlüğü Elektrik Motorları Projesi, *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*, 337:9-11
- Dinçer, F. , Asenkron Motorlarda Enerji Verimliliği Çalışmaları ve Pratik Yaklaşımlar, *3E Electrotech*.
- Habetler, B.L. ve Harley R.G. (2006), A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors, *Georgia Inst. Technol.*, IEEE Trans. Ind. Appl., 42(4):924-933.
- Fathizadeh, M., *Induction Motors*, Purdue University, Indiana, 35s.
- Junkim, D., Choi, J., Chun, D., Koo, D. (2013), The Study of the Stray Load Loss and Mechanical Loss of Three Phase Induction Motor considering Experimental Results, *J Electr. Eng. Technol.*, 8: 742-747
- Kabukçuoğlu, M.S.(2005), *Herkes İçin Fizibilite*, Ankara, 173s.
- Kavak, K. (2005), *Dünyada ve Türkiye’de Enerji Verimliliği ve Türk Sanayinde Enerji Verimliliğinin İncelenmesi*, Uzmanlık Tezi, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara, 193s.
- Koca, Y.B. ve Ünsal, A. (2017), Asenkron Motorların Elektriksel ve Mekaniksel Arızalarının Değerlendirilmesi, *SDU Tek. Bil.*, 7(2): 37-46
- Mete, M.H., (2017), Sanayide Düşük Verimli Elektrik Motorların Dönüşümü Programı, *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*, 337:4-8

- Nautiyal, A.S., Thakur, B. P., Chauhan, C. A., Govind D. K. (2013), Estimating Torque-Speed Characteristic of Three-Phase Induction Motor Operating under Unbalance Supply, *2013 Nirma Uni. Int. Conf. on Eng. (NUICONE)*
- Öney, E.(1987), *İktisadi Planlama*, 5.Baskı, Savaş Yayınları
- Saçkan A.H. (1994), *Asenkron Motorlar*, 2003, Birsen Yayınevi, 142 s.
- Prais, S.(2016), AC Induction Motors with Squirrel Cage Rotors, *Bodine Electric Gearmotor Blog*.
- Saravan, V., Arumugapandi, P.M. ve Ananth, V. (2013), A Field Test to Estimate Efficiency of Rewound Induction Motor, *Glob. Jou. of Res. in Eng. Elec. and Electron. Eng.*, 13(15).
- Sarioğlu, M.K., Boğosyan, S. Ve Gökaşan, M. (2003), *Asenkron Makinalar ve Kontrolü*, Birsen Yayınevi, 392 s.
- Topak, T., (2017), Süttaş'ta Motorlarda Verimlilik Projesi, *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*, 337:17
- Türkyılmaz, O. (2015), Ocak 2015 İtibarıyla Türkiye'nin Enerji Görünümü, Enerji Politikaları Artan Bağımlılık Çıkarmazında, *Makine Mühendisler Odası Bülteni*, Şubat 2015 Eki, 200. Sayı
- Zhang, H., Zanchetta P. (2011), Performance Evaluation of Induction Motor Efficiency and In-service Losses Measurement Using Standard Test Methods, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference(IEMDC)*, 913-917



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Yasin KARTAL 1984 yılında Muğla'nın Fethiye ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Muğla'nın Menteşe ilçesinde tamamladı. Isparta Süleyman Demirel Fen Lisesi'nde 1,5 yıl boyunca eğitim aldıktan sonra Muğla Turgut Reis Lisesinden mezun oldu. 2002 yılında İTÜ Telekomünikasyon Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2009 yılında mezun oldu. 2012 yılında MSKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Anabilim dalında başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2010 yılında T.C. Güney Ege Kalkınma Ajansında başladığı çalışma hayatına devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres(İş) : T.C. GEKA Muğla Yatırım Destek Ofisi Şeyh Mahallesi Turgutreis Caddesi Belediye Katlı Otoparkı Kat:1 Menteşe/MUĞLA

Cep Tel : 0505 203 9345

e-posta : mehmet.kartal.yasin@gmail.com