

ASENKRON MAKİNALARIN MATLAB'DA  
TASARIMI ve ANALİZİ  
Fatih KAYGISIZ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Ocak-2008

ASENKRON MAKİNALARIN MATLAB'DA  
TASARIMI ve ANALİZİ

Fatih KAYGISIZ

DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. A. İhsan ÇANAKOĞLU

Ocak - 2008

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Fatih KAYGISIZ'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı ASENKRON MAKİNALARIN MATLAB'DA TASARIMI ve ANALİZİ başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir

...../...../.....

(Sınav Tarihi)

Üye : Yrd.Doç.Dr. Ali İhsan ÇANAKOĞLU

Üye : Yrd.Doç.Dr. Yılmaz ASLAN

Üye : Yrd.Doç.Dr. Eyyüp GÜLBANDILAR

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

Prof.Dr.M.Sabri ÖZYURT  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ASENKRON MAKİNALARIN MATLAB'DA TASARIMI ve ANALİZİ

FATİH KAYGISIZ

Elektrik – Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2008

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Ali İhsan ÇANAKOĞLU

### ÖZET

Bu çalışmada, asenkron motorların tasarımını yapan, eşdeğer devre parametrelerini hesaplayan, performans analizi ve nominal çalışma büyüklüklerini hesaplayan bir altprogramla, Eşdeğer devre parametrelerini hesaplayan, Eşdeğer devre parametrelerine göre performans analizi yapan ve yüklenme analizini yapan üç alt programdan oluşan bir bilgisayar programı yazılmıştır. Tasarım altprogramından elde edilen sonuçlar ile katalog değerleri karşılaştırmalı olarak sonuçlar kısmında verilmiştir. Performans analizi ve yüklenme analizi kısımlarında ise sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir.

Bu tez 4 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, asenkron motorun yapısı, asenkron motorların çalışması, asenkron motorların eşdeğer devresi, asenkron motorda oluşan güç, moment, güç faktörü ve verim değerlerinin hesaplanması hakkında detaylı bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, asenkron motorun tasarım aşamalarından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ise, asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması ve performans analizi ile yüklenme analizleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise, yazılan bilgisayar programı tanıtılmış olup, programda yer alan bölümlerin nasıl kullanıldığı anlatılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Asenkron Motor, MATLAB, Eşdeğer Devre

## DESIGN AND ANALYSIS OF INDUCTION MACHINE BY MATLAB

Fatih KAYGISIZ

Electric & Electronic Engineering, M.S. Thesis, 2008

Thesis Supervisor : Asst.Prof.Dr. A. İhsan ÇANAKOĞLU

### SUMMARY

In this study, a software is implemented that occurs from a subprogram that makes induction motors design, computes equivalent circuit parameters, performance analyses and nominal working size of induction motors and three sub program, which computes equivalent circuit parameters, makes performance and loading analyses with using these parameters. The results of design subprogram are compared with catalog values and they are given in conclusion chapter. Performance analyses and loading analyze solution is to show on the graphics.

This thesis consists of four chapters. In first chapter, detail informations are given about the structure of induction motors, working of induction motors, equivalent circuit of induction motors, power and moment on induction motors, power factor and computing yield values. In the second section, the stage of the induction motor design is mentioned. The estimate of equivalent circuit parameters and also its performance analysis with loading analysis of induction motor are given in third section. In the Final section, the computer program is introduced and explained how the program's parts are used.

**Keywords:** Equivalent Circuit Parameters, Induction Motor, MATLAB

**TEŐEKKÜR**

Çalıőmalarım sırasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Yrd.Doç.Dr. A. İhsan ÇANAKOĞLU' na, her zaman maddi ve manevi destek sağlayan aileme sonsuz teőekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Asenkron Motorun Yapısı.....	2
1.1.1. Stator.....	2
1.1.2. Rotor.....	2
1.1.2.1 Sincap Kafesli Rotor (Kısa Devre Rotor).....	2
1.1.2.2 Sargılı Rotor (Bilezikli Rotor) .....	3
1.2. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi.....	3
1.3. Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi .....	4
1.4. Asenkron Motorda Oluşan Güç, Moment ve Güç Faktörü Değerleri.....	8
2. ASENKRON MOTOR TASARIMI .....	14
2.1. Tasarım Özellikleri .....	14
2.1.1. Elektriksel tasarım.....	14
2.1.2. Manyetik tasarım .....	14
2.1.3. İzolasyon tasarımı.....	14
2.1.4. Isı (Soğutma) tasarımı.....	14
2.1.5. Mekanik tasarım.....	15
2.2. Çıkış Katsayısının Genel Kavramı .....	15
2.3. Programda Kullanılan Algoritma .....	20
2.4. Stator Ana Boyutlarının Hesabı.....	21
2.4.1. Stator sargılarının hesabı.....	22
2.4.2. Stator oluk boyutlarının hesabı .....	24
2.5. Rotor Oluklarının Hesabı .....	28
2.6. Mıknatıslanma akımı .....	32

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.7. Direnç ve endüktans değerlerinin hesabı.....	34
2.8. Kayıplar ve verim.....	38
3. ASENKRON MOTORUN KARARLI HAL ANALİZİ.....	40
3.1. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması.....	40
3.1.1. Boşta Çalışma Deneyi.....	40
3.1.2. Kısa Devre Çalışma Deneyi.....	41
3.1.3. Asenkron Motorun Stator Etkin Faz Direncinin Bulunması.....	42
3.1.4. Boşta Çalışma Ve Kısa Devre Deneylerinden Faydalanarak Asenkron Motorun Eşdeğer Devre Parametrelerinin Bulunması.....	42
3.2. Asenkron Motorun Performans Analizi.....	44
3.3. Asenkron Motorun Yüklenme Analizi.....	46
4. YAZILAN PROGRAMIN TANITILMASI ve ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	49
4.1. Programın Tanıtılması.....	49
4.1.1. Asenkron motor tasarımı alt programı.....	49
4.1.2 Eşdeğer devre parametreleri hesaplama programı.....	53
4.1.3 Performans analizi programı.....	54
4.1.4 Yüklenme analizi programı.....	59
4.2. Programdan Elde Edilen Sonuçlar.....	60
5. SONUÇLAR .....	66
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	67

EK 1. Asenkron Motorun Stator Sargılarında Kullanılan Tel Kesitleri



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Ferrari'nin asenkron motoru ve Tesla'nın asenkron motoru.....	1
1.2. Üç fazlı ve kısa devre rotorlu bir asenkron motor yapısı.....	2
1.3. Üç fazlı asenkron motorun bir faz eşdeğer devresi.....	4
1.4. Rotor Eşdeğer Devresi .....	6
1.5. Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Yaklaşık Eşdeğer Devresi.....	7
1.6. Stator ve Rotor Akımı.....	8
1.7. Güç akış diyagramı.....	9
1.8. Verimin Kayma ve Hız İle Değişimi.....	11
1.9. Bir Faz Eşdeğer Devre Üzerinde Elektromekanik Güç Dönüşümü.....	11
1.10. Moment Hız Grafiği.....	12
1.11. Güç Faktörünün Kayma İle Değişimi.....	13
2.1. Fazör Diyagramı.....	15
2.2. Diş Doyma Faktörüne Göre $k_f$ ve $\alpha_i$ Değerleri.....	17
2.3. $C_o$ Esson Sabiti.....	18
2.4. Tasarım Algoritması.....	21
2.5. Trapezoidal ve Yuvarlak Stator Oluk Geometrileri.....	25
2.6. Stator Oluk Geometrisi.....	25
2.7. Nüve için kullanılan malzeme mıknatıslanma (B-H) Karakteristiği.....	27
2.8. Tipik Rotor Olukları.....	29
2.9. Rotor Oluk Geometrisi.....	30
2.10. Kısa Devre Halkası Kesiti.....	32
2.11. Asenkron Motora Ait Bir Faz Eşdeğer Devresi.....	34
3.1. Asenkron motorun boşa çalışma deneyi bağlantı şeması.....	40
3.2. Asenkron motorun kısa devre çalışma deneyi bağlantı şeması.....	41
3.3. Stator direncinin ölçülme devresi.....	42
3.4. Asenkron Motorun Yaklaşık Eşdeğer Devresi ve Kısa Devre Eşdeğer Devresi....	43
3.5. Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi.....	44
3.6. Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi.....	46
3.7. Asenkron motorun Thevenin eşdeğer teoremine göre bir faz eşdeğer devresi.....	47
4.1. Bilgisayar Programının Ana Giriş Sayfası.....	49

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2. Makina Etiket Değerleri Giriş Sayfası.....	50
4.3. Malzemenin Mıknatıslanma Karakteristik Eğrisi.....	50
4.4. Tasarım Sonucu Elde Edilen Stator Boyutlarını Gösteren Arayüz.....	51
4.5. Tasarım Sonucu Elde Edilen Rotor Boyutlarını Gösteren Arayüz.....	52
4.6. Tasarım Sonucu Elde Edilen Eşdeğer Devre Parametrelerini Gösteren Arayüz.....	52
4.7. Tasarım Sonucu Elde Edilen Performans Analiz Grafiklerini Gösteren Arayüz.....	53
4.8. Asenkron Motor Eşdeğer Devre Parametrelerini Hesaplama Arayüzü.....	54
4.9. Asenkron Motor Performans Analizi Veri Giriş Arayüzü.....	55
4.10. Hesaplanan Performans Grafiklerinin Gösterildiği Arayüz.....	55
4.11. Moment – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz.....	56
4.12. Çıkış Gücü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz.....	56
4.13. Stator Akımı – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz.....	57
4.14. 14 Verim – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz.....	57
4.15. Giriş Gücü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz.....	58
4.16. Giriş Güç Faktörü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz.....	58
4.17. Yüklenme Analizi Veri Giriş Arayüzü.....	59
4.18. Yüklenme Analizi Sonuçlarının Gösterildiği Arayüzü.....	60

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1. İç/Dış Stator Çap Oranları.....	20
2.2. $\lambda$ Paket Oranları.....	21
2.3. Laminasyon Mıknatıslanma Eğrisi $B_m(H_m)$ .....	27
2.4. Stator ve Rotor Oluk Sayıları.....	29
4.1. Motor Etiket Değerleri.....	61
4.2. 3 kW' lık Motor İçin Konstrüksiyon Değerleri.....	62
4.3. 5.5 kW' lık Motor İçin Konstrüksiyon Değerleri.....	63
4.4. Motorların Nominal İşletme Karakteristik Değerleri.....	64

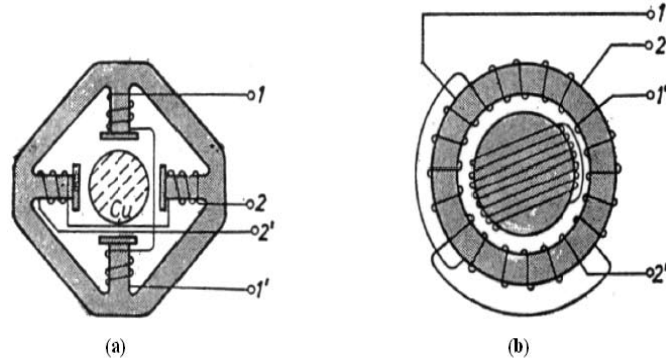
**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$V_1$	Stator gerilimi
$R_1$	Stator sargısı bir faz direnci
$X_1$	Stator sargısı bir faz kaçak reaktansı
$I_1$	Stator akımı
$I_0$	Boşta çalışma akımı
$R_c$	Demir, sürtünme ve vantilasyon direnci
$X_m$	Mıknatıslanma reaktansı
$I_m$	Mıknatıslanma akımı
$I_w$	Demir kayıp akımı
$R_2$	Statora indirgenmiş rotor direnci
$X_2$	Statora indirgenmiş rotor kaçak reaktansı
$I_2$	Statora indirgenmiş rotor akımı
$X_k$	Motor eşdeğer devre faz reaktansı
$Z_k$	Motor eşdeğer devre faz empedansı
$R_k$	Motor eşdeğer devre faz direnci
$\omega_r$	Rotor akımlarının açısal frekansı
$L_2$	Rotor endüktansı
$Z_2$	Rotor empedansı
$s$	Kayma

## 1. GİRİŞ

Günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan asenkron makineler genellikle motor çalışma durumunda bir ve üç fazlı olarak imal edilirler. İcadından itibaren günümüze kadar teknolojiye gelişmeler ile birlikte aynı güç değeri için boyutları ve fiyatı oldukça düşmüştür. Bugün birkaç watttan 35MW'a kadar güçlerde imal edilebilen asenkron motorların gerilim seviyeleri ise 110V ile 27 kV arasında değişmektedir [1]. Asenkron motorlar; doğrudan bir fazlı ya da üç fazlı alternatif akım şebekesinden beslenebilmesi, çalışmaları sırasında elektrik arki meydana gelmemesi, dayanıklı, bakım gerektirmeyen yapısı ve düşük maliyetleri nedeniyle, hem sanayide hem de ev aletlerinde en çok kullanılan motor türü haline gelmiştir. Bu çalışma için, motor seçiminde, yukarıda bahsedilen özellikler göz önünde tutularak asenkron motor tercih edilmiştir.

Asenkron motorların icadı 1885'lere dayanır. Galileo Ferrari ve Nicola Tesla bu motoru ilk olarak üreten ve patentini alan bilim adamlarıdır. Ferrari'nin ürettiği makine doğru akım makinesine benzer şekilde, iki çift kutuplu bir stator sargısına sahip ve rotoru bakır bir silindirden meydana gelmiştir. Teslanın makinesinde ise stator sargısı, karkas boyunca yayılmış ve bununla birlikte rotorda da kısa devre edilmiş bir sargı daha bulunmaktadır. Her iki makinenin kesiti şekil 1.1'de verilmiştir[2].

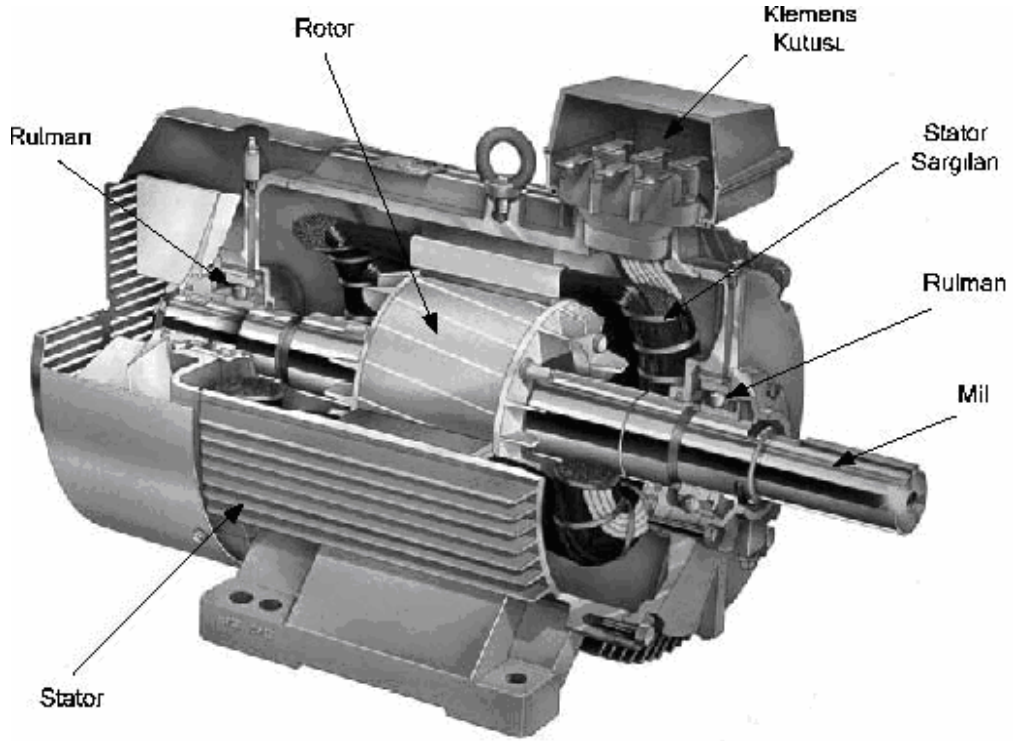


**Şekil 1.1. (a) Ferrari'nin asenkron motoru, (b) Tesla'nın asenkron motoru**

Günümüzde ise asenkron motorlar; yine aynı temel prensiplere dayanan fakat daha modern yapılarda teşkil edilmektedir.

### 1.1 Asenkron Motorun Yapısı

Asenkron motorlar, genel olarak stator ve rotor olmak üzere başlıca iki kısımdan meydana gelir.



Şekil 1.2. Üç fazlı ve kısa devre rotorlu bir asenkron motor yapısı

### 1.1.1 Stator

Stator, asenkron motorun duran kısmıdır ve 0.4 – 0.5 mm kalınlığındaki silisyumlu sacların özel kalıplarda preslenmesiyle imal edilir. Daha sonra dışarıda sarılmış ve paketlenmiş üç fazlı sargılar, statorda açılmış oluklara yerleştirilir. Sargı uçları klemens kutusundaki ilgili noktalara bağlanır. Gövdeye motor kapakları takılır ve motor kapaklarının ortasındaki rulmanlar ise statorun ortasında dönecek olan rotora yataklık eder.

### 1.1.2 Rotor

Asenkron motorun dönen kısmına rotor adı verilir. Sincap kafesli (kısa devre rotor) ve sargılı tip (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşit rotor yapısı vardır.

#### **1.1.2.1 Sincap kafesli rotor (Kısa devre rotor)**

Rotor, silisyumlu sacların kalıp preste kesilerek paketlenmesinden sonra, kanalların içine eritilmiş alüminyum dökülmesi ile elde edilir. Rotorun her iki tarafında, rotor çubuklarını kısa devre eden halkalar bulunur, bu halkaların uçlarındaki küçük kanatçıklar pervane görevi

görerek motorun soğumasını sağlar. Bazı büyük motorlarda kanallara bakır çubuklar yerleştirilir.

### **1.1.2.2 Sargılı rotor (Bilezikli rotor)**

Sacları paketlenerek silindir haline getirilen rotorun üzerindeki oluklara 3 fazlı alternatif akım sargısı yerleştirilir. Aralarında  $120^\circ$  faz farkı bulunan üç fazlı sargılar yıldız ya da üçgen bağlandıktan sonra elde edilen üç sargı ucu, mile yalıtılarak yerleştirilen üç adet bileziğe bağlanır ve böylece bilezikli rotor elde edilir[2].

### **1.2. Asenkron Motorun Çalışma Prensibi**

3 fazlı, 2 kutuplu bir asenkron motora şebeke gerilimi uygulanır. Statordaki sargılardan geçen alternatif akımlar, 3 fazlı döner alanları meydana getirirler. Stator sabit olduğu halde, döner alanlar ortada bulunan kısa devreli rotorun çubuklarını kestiğinden, rotorun çubuklarından endüksiyon akımlarının geçmesine neden olurlar. Bu endüksiyon akımları rotorun kutup alanlarını meydana getirirler. Döner stator kutup alanları rotorun kutuplarını etkileyerek (benzer kutuplar birbirini iter, zıt kutuplar birbirini çeker prensibinden hareket ile) N kutbunun altındaki rotor çubukları bir yöne, S kutbunun altındaki rotor çubukları diğer yöne doğru iterler. Bu itme kuvvetlerinin meydana getirdiği döndürme momenti rotorun döner alan yönünde dönmesini sağlar.

Rotorun devri sayısı arttıkça, döner alanın rotor çubuklarını kesmesi azalacağından, rotor çubuklarında endüklenen emk'ler ve kısa devre çubuklarından geçen endüksiyon akımları azalır. Dolayısıyla, rotoru döndüren moment azalır. Böylece rotorun devir sayısında artış olmaz. Motor boşta çalışırken rotorun devir sayısı senkron devir sayısına (döner alanın devrine) yaklaşır ama hiçbir zaman eşit olamaz. Çünkü bu iki devir sayısı eşit olursa, stator döner alanı rotor çubuklarını kesmez. Bu da rotorda döndürme momentini oluşturan endüksiyon akımının geçmemesine neden olur. Böylece rotorun kutup alanları oluşmaz ve rotor dönmemiş olur. Bu yüzden motorun momentini belirlemede etkili olan kayma kavramı ortaya çıkmıştır. Döner alanın devir sayısı ile rotor devir sayısı arasındaki farka "Rotorun Kayması" denmektedir. Diğer bir ifade ile, rotor devrinin senkron devirden geri kalmasına "Kayma" denilmektedir. Kayma,

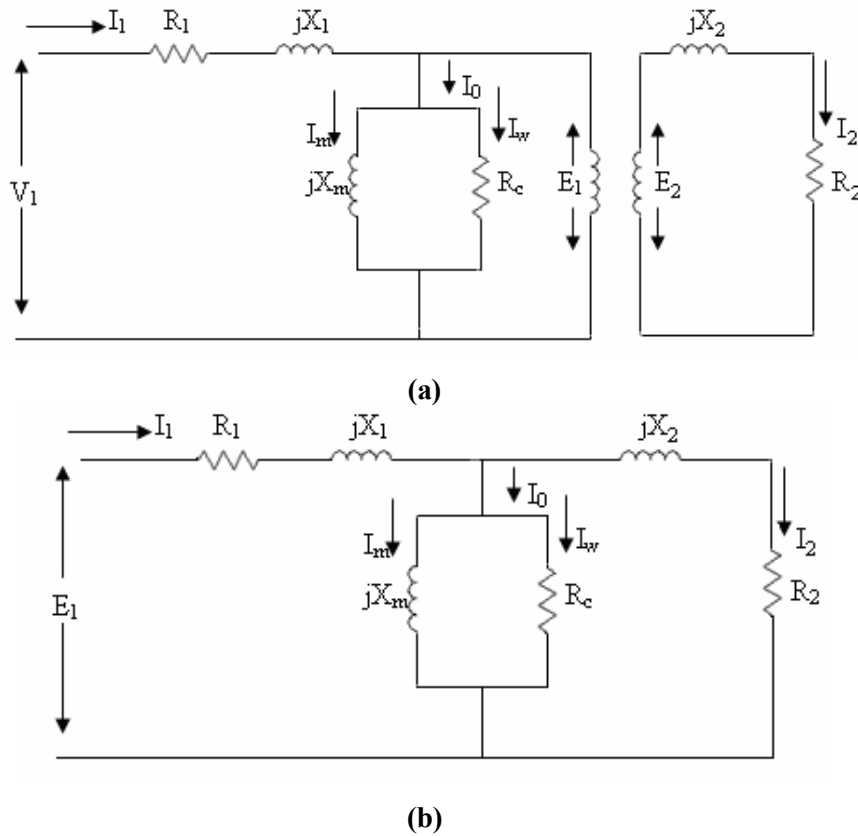
$$n_r = (1 - s)n_s \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Eşitlik (1.1)'den de görüleceği gibi rotorun devir sayısı hiçbir zaman döner alanın devir sayısına yani senkron devire eşit olmaz. Bu da rotorun senkron devirden daha az bir devirle döndüğünün ve kaymanın sıfır olamayacağını göstermektedir. Rotor hızı senkron hıza yaklaştığında kayma azalacak ve buna bağlı olarak da rotor iletkenlerinde döndürme momentini üreten endüksiyon akımı azalacaktır. Böylece rotorun dönmesi yavaşlamaya başlayacaktır. Rotor yavaşlamaya başlayınca iletkenlerinde endüklenen gerilim artarak motorun tekrar hızlanması sağlanmaktadır

### 1.3. Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi

Bir asenkron motorun çalışabilmesi için stator sargısının rotor sargısında gerilimler indüklemesi ve bu sargılardan akım geçmesi gerekir. Transformatörün çalışabilmesi ise birincil sargının ikincil sargıda gerilim indüklemesine ve bu sargıdan akım geçmesine dayanır. Çalışma ilkesindeki bu benzerlik nedeniyle asenkron makinanın eşdeğer devresi de transformatörün eşdeğer devresine çok benzer. Üç fazlı bir asenkron motor için bir faz eşdeğer devresi Şekil 1.3' de gösterilmiştir



**Şekil 1.3.** Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi **a)** Transformatör Devresi **b)** Primere İndirgenmiş Tam Eşdeğer Devresi



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

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad (1.2)$$

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

Rotor büyüklüklerinin bulunması stator büyüklüklerine göre daha zordur. Çünkü rotor döner alana göre  $n_2$  değişken hızı ile döner. Bunun sonucunda birçok büyüklük kaymanın fonksiyonu olur. Motor hızının etkisi eşdeğer devredeki  $\frac{R_2}{s}$  parametresi ile belirlenir. Rotor dururken  $s=1$  olduğu için bu gerilim de  $f_1$  frekansında olur. Rotor dururken indüklenen gerilimi ve durmadaki diğer büyüklükleri "0" alt indisi ile gösterirsek, rotorda indüklenen gerilim ve rotor frekansı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$E_2 = 4.44 f_1 N_2 \Phi k_{w2} \quad (1.3)$$

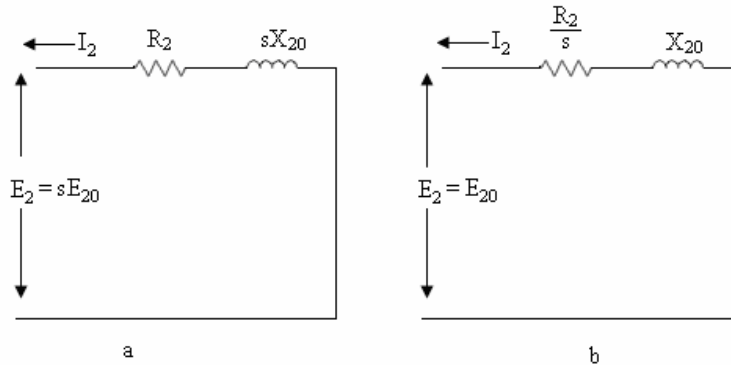
$$E_2 = sE_{20} \quad (1.4)$$

$$n_r = n_s \rightarrow s=0 \text{ ve } E_2=0$$

$$n_r = 0 \rightarrow s=1 \text{ ve } E_2=E_{20}$$

$$f_2 = sf_1 \quad (1.5)$$

Motorun herhangi bir kayma anındaki ve motorun durma anındaki rotor eşdeğer devresi ise Şekil 1.4' da verilmiştir[3].



Şekil 1.4. Rotor Eşdeğer Devresi a)Herhangi Bir  $s$  Kaymasında b)Durma Anında

O halde hem rotorda indüklenen gerilim hem de rotor frekansı kayma ile orantılıdır. Normal işletmede özellikle nominal yüklerde kayma küç ve yüzde birkaç değerinde olduğundan, rotorda indüklenen gerilim birkaç volt ve frekans birkaç herztir[3]. Bu yüzden kısa devre çubukları rotor saç paketinden yalıtılmaz. Rotorda yalıtkan malzeme kullanılmadığı için sincap kafesli asenkron motorlarda birim hacme düşen güç, bilezikli asenkron motorlardakinden daha fazladır.

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

Şekil 1.3' deki eşdeğer devreden de görüleceği gibi  $s = 0$  iken  $I_2 = 0$  olur (sekonder açık devre). Genel olarak  $I_2$ ;

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{E}_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (1.6)$$

olarak hesaplanabilir. İndirgenmiş rotor akımının genliği,

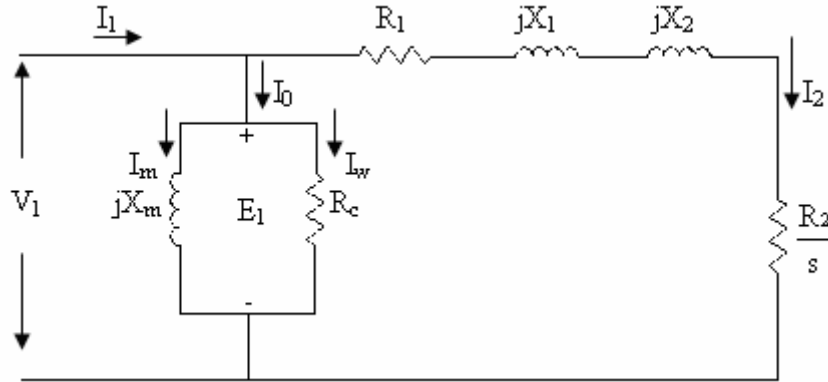
$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (1.7)$$

formülüyle hesaplanabilir.

Şekil 1.3' teki eşdeğer devreden stator sargılarında indüklenen  $E_1$  gerilimi stator gerilimi cinsinden yazılacak olursa;

$$\vec{E}_1 = \vec{V}_1 - \vec{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (1.8)$$

Pratikte  $(R_1 + jX_1)$ ' deki gerilim düşümü oldukça küçüktür ve  $E_1 = V_1$  alınabilir. Böylece Şekil 1.3' deki devre Şekil 1.6' daki devreye indirgenebilir.



Şekil 1.5. Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Yaklaşık Eşdeğer Devresi

Şekil 1.5' ya göre motora uygulanan  $V_1$  gerilimi, boşa çalışma bileşenlerinin üzerinde düşer. Mıknatıslanma ve demir kayıpları akımı;

$$I_m \cong \frac{V_1}{jX_m} \quad (1.9)$$

$$I_w \cong \frac{V_1}{R_c} \quad (1.10)$$

olur. Stator akımı  $I_1$ ;

$$I_1 = \frac{V_1}{((R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2)) // (jX_m // R_c)} \quad (1.11)$$

Bu durumda rotor akımı  $I_2$  ;

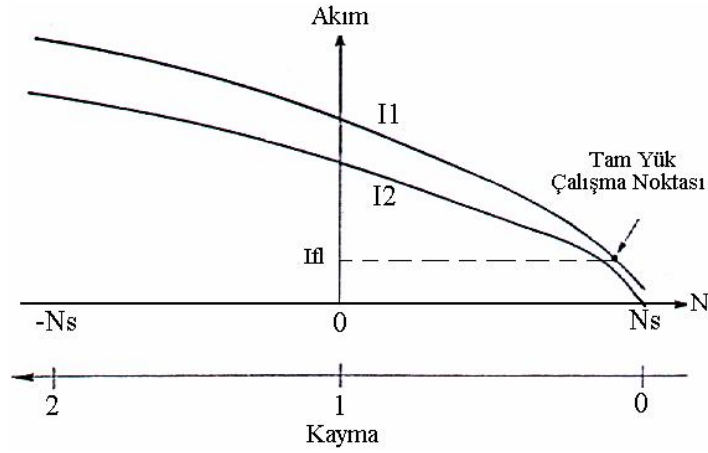
$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_1}{(R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2)} \quad (1.12)$$

olarak hesaplanır. Akımın genliği ise,

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2/s)^2 + j(X_1 + X_2)^2}} \quad (1.13)$$

olur. Herhangi bir sabit kaymada, (1.7) ve (1.13) eşitliklerindeki  $I_2$ ' ler arasındaki fark tam yük akımında bile küçüktür.  $I_1$  ve  $I_2$ ' nin sabit  $V_1$  geriliminde kaymayla değişimi, Şekil 1.6' de gösterilmiştir.

$I_{f,1}$  noktası, tipik tam yük nominal hızda çalışma noktasını göstermektedir. Hızın azalmasıyla akım değerleri artmaktadır. Motorun durması durumunda akım, nominal akımın üç hatta daha fazla katına ulaşır[4].



Şekil 1.6. Stator ve Rotor Akımı

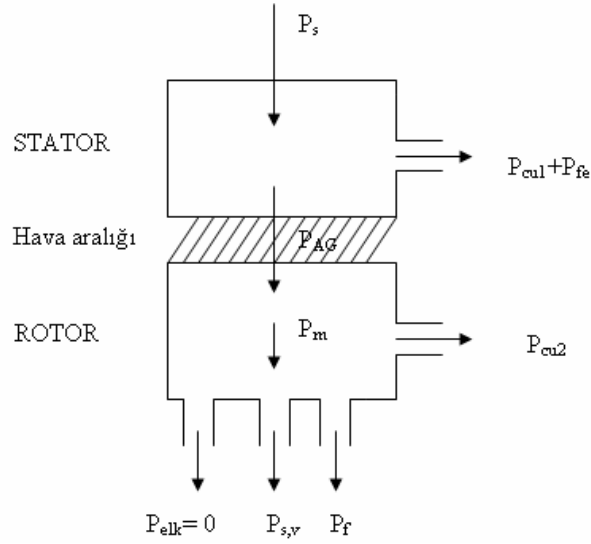
Kaçak reaktans ve empedansın kaymaya bağlı ifadeleri ise şöyledir.

$$\begin{aligned}
 X_2 &= \omega_r L_2 \\
 X_2 &= 2\pi f_r L_2 \\
 X_2 &= 2\pi s f_s L_2 \\
 X_2 &= s(2\pi f_s L_2) \\
 X_2 &= sX_{20}
 \end{aligned}
 \tag{1.14}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}
 \tag{1.15}$$

#### 1.4. Asenkron Motorlarda Güç, Moment ve Güç Faktörü

Motor çalışırken şebekeden  $P_s$  giriş gücünü çeker. Bu giriş gücü, stator bakır ve demir kayıplarına uğradıktan sonra stator-rotor arasındaki hava boşluğundan rotora aktarılır. Rotor devresinde de bakır kayıpları, demir kayıpları, rüzgâr kayıpları, sürtünme kayıpları ve kaçak yük kayıplarına uğrayan güç, mekanik güç veya mekanik güç olarak aktarılır. Ancak rotor demir kayıpları diğer kayıplar yanında çok küçük olduğundan, rotor devresinde gösterilmez. Motorun toplam demir kayıpları stator tarafında stator demir kaybı olarak gösterilir. Bu açıklamalar ışığında bir asenkron motorun güç akış diyagramı Şekil 1.7 de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Güç akış diyagramı

Stator, şebekeden  $P_s$  birincil aktif gücünü alır. Asenkron makinanın etiketinde belirtilen gerilim, akım ve güç katsayısı değerleri ile bu güç kolayca hesaplanabilir. Hat gerilimi  $U_1$  ve hat akımını  $I_1$  kullanıldığında, güç formülü, motorun bağlantı şekline bağımlı olmaz.

Şebekeden çekilen aktif güç ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$P_s = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1.16)$$

Giriş gücü ( $P_s$ )

$$P_s = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1.17)$$

formülüyle hesaplanır. Bu güçten Stator bakır kayıpları( $P_{cu1}$ ) ve Demir Kayıpları( $P_{FE}$ ) çıkarılarak Hava aralığı gücü

$$\begin{aligned} P_{cu1} &= 3 \times I_1^2 \times R_1 \\ P_{FE} &\equiv \frac{3 \times (V_1)^2}{R_C} \\ P_{AG} &= P_s - P_{cu1} - P_{FE} \end{aligned} \quad (1.18)$$

formülüyle bulunur. Milden alına güç ise Hava aralığı ( $P_{AG}$ ) gücünden rotor bakır kayıpları ( $P_{cu2}$ ) ve sürtünme ve vantilasyon kayıpları ( $P_{s,v}$ ) çıkarılarak

$$\begin{aligned}
P_{cu2} &= 3 \times I_2^2 \times R_2 \\
P_m &\equiv P_{AG} - P_{cu2} \\
P_f &= P_m - P_{s,v}
\end{aligned} \tag{1.19}$$

şeklinde hesaplanır. Eşitlik (1.18) ve Eşitlik (1.19)'dan aşağıdaki hesaplamalar elde edilir.

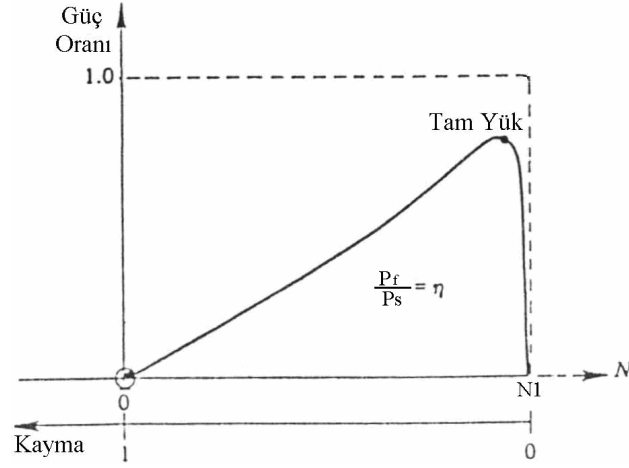
$$\begin{aligned}
P_{AG} &= 3 \times I_2^2 \times \frac{R_2}{s} \\
P_m &\equiv 3 \times I_2^2 \times \frac{R_2}{s} - 3 \times I_2^2 \times R_2 \Rightarrow P_m \equiv 3 \times I_2^2 \times R_2 \frac{(1-s)}{s} \\
P_{cu2} &= s \times P_{AG} \\
P_m &= (1-s) \times P_{AG}
\end{aligned} \tag{1.20}$$

Asenkron motorun şebekeden çektiği gücün yüzde kaçının motorun milinden mekanik güç olarak alındığını verim gösterir. Verilen güç ile alınan güç arasındaki fark toplam kayıplardır. Asenkron motorlarda kayıplar, stator demir kaybı, stator ve rotor bakır kayıpları ile rotorun sürtünme ve rüzgâr kaybından ibarettir. Motorun kayıpları deneyle ve hesaplamalarla bulunabilir.

Asenkron motorun şebekeden çektiği güç hassas olarak vatmetrelerle ölçülebildiği halde, motorun milinden alınan mekanik güç aynı hassasiyetle ölçülemez. Bu yüzden bir motorun verimini bulmak için kayıpların hesaplanması yolu tercih edilir.

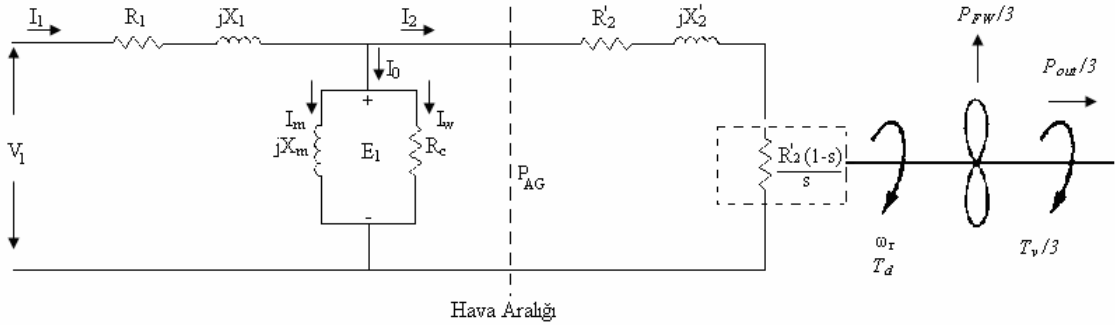
$$\eta = \frac{P_f}{P_s} \tag{1.21}$$

olarak verilebilir. Şekil 1.8' de ise bir asenkron motorun genel olarak devir sayısına ve kaymaya bağlı olarak verim değişimini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 1.8. Verimin Kayma ve Hız İle Değişimi

Asenkron motorlarda meydana gelen güç dağılımı, motorun bir faz eşdeğer devresinde aşağıdaki gibi gösterilebilir[5].



Şekil 1.9. Bir Faz Eşdeğer Devre Üzerinde Elektromekanik Güç Dönüşümü

Eşdeğer devreye göre devrilme momenti  $T_d$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_d = \frac{P_{mek}}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{ag}}{\omega_r} = \frac{(1-s)}{\omega_r} (I_2')^2 \frac{R_2'}{s} \quad (1.22)$$

Burada  $\omega_r$  rotorun açısal hızıdır. Devrilme momenti senkron açısal hız cinsinden ifade edilirse;

$$T_d = \frac{(I_2')^2 R_2'}{\omega_s} \quad (1.23)$$

$I_2'$  akımının değeri Formül (1.7)' de verilmişti. Bu ifade yukarıda yerine yazılırsa genel moment ifadesi elde edilmiş olur.

$$T_d = \frac{60}{2\pi n_s} 3 \frac{1}{s} R_2 \frac{V_1^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (1.24)$$

Yol alma anındaki momentin bulunması için kayma değerinin  $s=1$  olması gerekir. Bu durumda yol alma momentini  $T_{yol}$  ise şu şekilde olur.

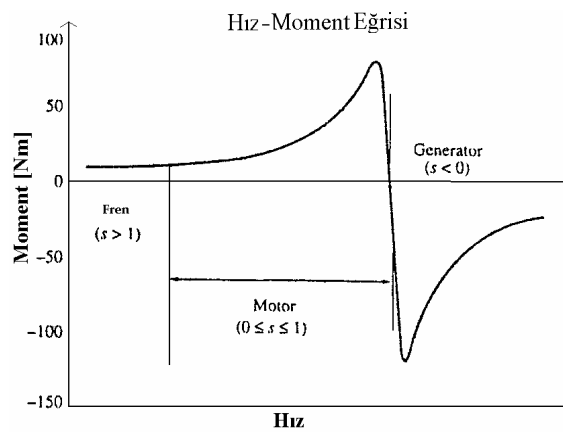
$$T_{yol} = \frac{60}{2\pi n_s} 3 R_2 \frac{V_1^2}{R_2^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (1.25)$$

Maksimum devrilme momentini  $\frac{R_2}{s}$  direncinin  $\sqrt{R_1^2 + X_k^2}$  reaktansına eşit olduğu durumda elde edilir.

$$\frac{R_2^2}{s^2} = R_1^2 + X_k^2 \quad (1.26)$$

$$T_{d max} = \frac{60}{2\pi n_s} 3 \frac{V_1^2}{2 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right]} \quad (1.27)$$

Denklemden de görüleceği üzere rotor direncinin ve frekansının maksimum momente herhangi bir etkisi yoktur. Asenkron motorun moment-hız grafiği Şekil 1.10' da gösterilmiştir[5].

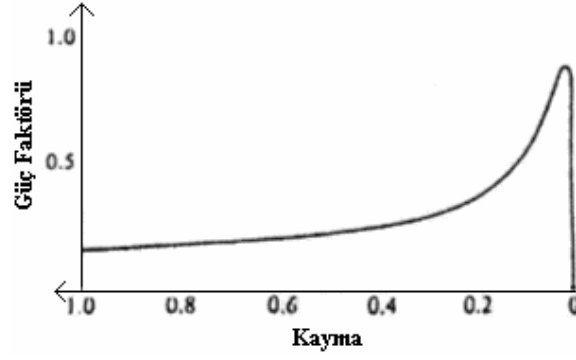


Şekil 1.10. Moment Hız Grafiği



Motor üç fazlı dengeli bir yük olduğundan ve motora sinüzoidal bir gerilim uygulandığından güç faktörü, besleme gerilimi ile akımı arasındaki açının kosinüsü olur. Şekil 1.13' de ise tipik Kayma-Güç faktörü grafiği görülmektedir.

$$PF = \cos \varphi_1 \quad (1.28)$$



Şekil 1.11. Güç Faktörünün Kayma İle Değişimi

## 2. ASENKRON MOTOR TASARIMI

Asenkron motorları incelenirken, manyetik, elektrik ve ısıl modeller kullanılarak temel motor değişkenlerinin motor performansına etkileri bulunur. İndüksiyon motorlarının tasarımında ise, istenen performansta etkili olan motor geometrisi ve sargı düzeni belirlenir. Tasarımda elde edilen model manyetik ve elektriki modelleri kapsar[6].

### 2.1. Tasarım Özellikleri

Bir asenkron motorun tasarım aşaması 5 ana alana ayrılabilir. Bunlar elektrik, izolasyon, manyetik, ısı ve mekanik tasarım alanlarıdır[7].

#### 2.1.1. Elektriksel tasarım

Asenkron motorun besleme gerilimi, frekansı ve faz sayısı belirlenir. Bu değerlerden ve minimum güç katsayısı ile hedeflenen verim için, sargı bağlantısı (Yıldız-Üçgen), sargı tipi, kutup sayısı, oluk sayıları ve sargı faktörü hesaplanır. Akım yoğunlukları da bu aşamada belirlenir.

#### 1.1.2. Manyetik tasarım

Çıkış büyüklükleri temel alınarak, güç, hız, kutup sayısı, soğutma tipi ve rotor çapı hesaplanır daha sonra belirlenen bir akım yükleme ve hava aralığı akı yoğunluğu değerleri temel alınarak paket boyu belirlenir. Bu aşamada alınan akım yoğunluğu ve oluk magnetomotor kuvvetlerine bağlı olarak manyetik devrenin değişik bölgelerindeki akı yoğunlukları sabitlenerek, olukların boyutlandırılması, nüve yüksekliği ve stator dış çapı hesaplanır. Dış çap belirlendikten sonra paket boyu, oluktaki akım yoğunluğu değeri seçilmiş olan değerine uygun olacak şekilde tekrar belirlenir. Stator ve rotor nüvesinin boyutlandırılması çok değişik kriterler göz önüne alınarak yapılabilir.

#### 2.1.3. İzolasyon tasarımı

İzolasyon malzemeleri ve bunların kalınlıkları makinanın gerilim izolasyon sınıfına ve motorun çalışacağı ortama bağlıdır. Asenkron makinanın oluk/nüve, iletken, bobin başı ve şebeke bağlantı noktalarında kullanılan izolasyon malzemeleri birbirlerinden farklıdır.

#### 2.1.4. Isı (Soğutma) tasarımı

Asenkron motorda kayıplar sebebiyle ortaya çıkan ısının sargı, nüve ve gövde sıcaklıklarının güvenli sınırlar içinde tutulması bakımından dışarı atılması gereklidir. Uygulamaya veya güç seviyesine bağlı olarak değişik soğutma şekilleri kullanılmaktadır. Hava

ile soğutma en çok tercih edilendir fakat yüksek hızlı asenkron motorlarda (10000 d/d üzeri) stator içinde su ile soğutma (su kanalları ile) sıkça kullanılır. Tasarımın bu aşamasında kayıpların hesaplanması, sıcaklık dağılımı ve soğutma sisteminin seçimi yapılır.

### 2.1.5. Mekanik tasarım

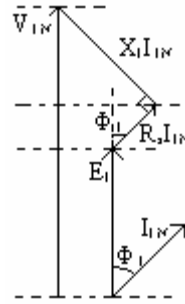
Mekanik tasarım aşamasında kritik rotor hızı, gürültü ve vibrasyon modu, mildeki mekanik gerilmeler, yataklar, eylemsizlik hesapları ile akımdaki geçici rejimler sebebiyle oluşan değişimlerin neticesiyle bobin başlarına etkiyen kuvvetlerin hesabı yapılır. Asenkron motorun tasarımında ilk adım geçmiş tecrübelerle dayanarak, motorun stator çapını belirleyecek çıkış katsayısının hesaplanmasıdır. Bu döner makinalarda  $D_{is}$  stator çapı ve  $L$  paket boyunu göstermek üzere, standart çıkış katsayısı  $D_{is}^2 L$  dir.

### 2.2. Çıkış Katsayısının Genel Kavramı

$D_{is}^2 L$  ile makine gücü ve performansı arasındaki ilişkiyi hesaplayabilmek için ilk önce hava aralığı görünür güç değerini hesaplamalıyız.

$$S_g = 3E_1 I_{1N} \quad (2.1)$$

Burada  $E_1$  faz başına hava aralığı elektromotor kuvvetini,  $I_{1N}$  nominal akımı göstermektedir.  $E_1$  ile  $V_{1N}$  stator sargılarına uygulanan gerilim arasındaki ilişkiyi gösteren fazör diyagramı ise Şekil 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Fazör Diyagramı

$$V_{1N} = E_1 + R_s I_{1N} \cos \phi_1 + X_s I_{1N} \sin \phi_1 \quad (2.2)$$

Stator direnci 0 alınarak  $E_1$  ile  $V_{1N}$  arasındaki bağıntıyı bulmak daha kolaylaşmaktadır.

$$V_{1N} = E_1 + X_s I_{1N} \sin \phi_1 \quad (2.3)$$

Her iki tarafı  $V_{1N}$ ' e böldüğümüz zaman aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$1 = \frac{E_1}{V_{1N}} + \frac{X_1 I_{1N} \sin \varphi_1}{V_{1N}} \quad (2.4)$$

$$K_e = \frac{E_1}{V_{1N}} = 1 - x_1 \sin \varphi_1 \quad (2.5)$$

olarak elde edilir.

Stator kaçak reaktansının p.u. değeri ve  $\sin \varphi_1$ , kutup çifti  $p$  değeri ile artar ( $\cos \varphi_1$  değeri azaldığı için güç faktörü değeri azalır). Bu durumda  $K_e$  sabiti aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak ifade edilebilir.

$$K_e \approx 0.98 - 0.005p \quad (2.6)$$

aynı zamanda motora giriş gücünü görünür güç olarak ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$S_{1N} = 3V_{1N}I_{1N} = \frac{P_n}{\eta \cos \varphi_1} \quad (2.7)$$

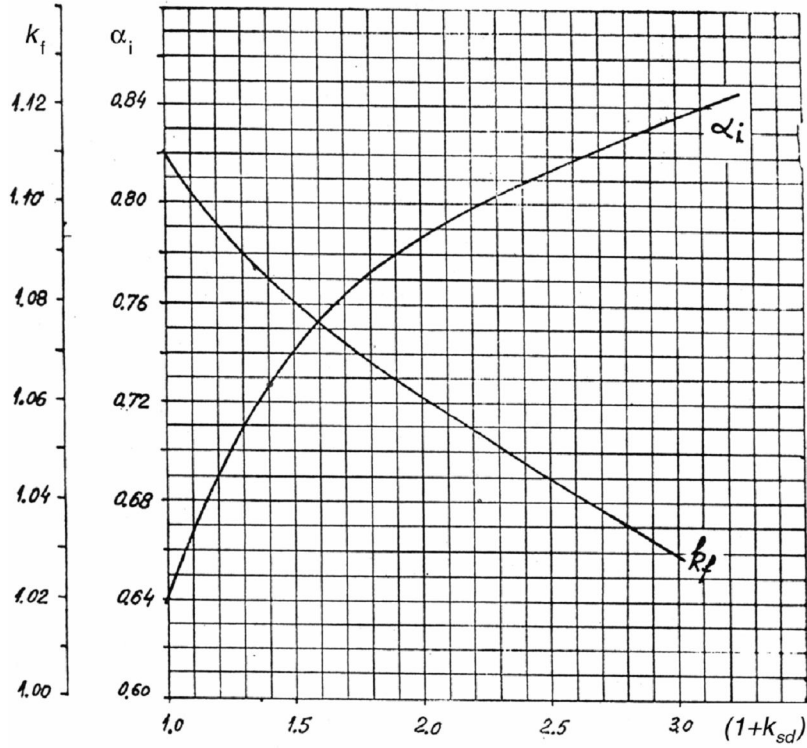
Yazılan son ifadede  $P_n$  nominal mil gücü,  $\eta_n$  nominal verimi,  $\cos \varphi_1$  nominal güç katsayısını göstermektedir.

Verim, güç ile artar, kutup sayısı ile azalır. Rotoru sargılı asenkron motorların rotor sargılarının bakırdan imal edilmiş olması sebebiyle verimleri sincap kafesli asenkron motorlara göre biraz daha büyüktür[7].

Verimin alınan ilk değeri tasarım için sadece bir başlangıç noktasıdır. En iyi performans elde edilene kadar iterasyonla verim değeri iyileştirilir. Güç katsayısı, güç değeri ile atarken, kutup sayısı değeri arttıkça düşer. İmal edilmiş motorlara bakıldığında güç faktörleri verimin yanında biraz küçüktür. Tasarıma başlarken verim ve güç katsayısı için alınacak ilk değerler ileriki bölümlerde verilecektir.  $E_1$  elektromotor kuvveti, hava aralığındaki kutup başına akı değerinin fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$E_1 = 4.44 f_1 K_f W_1 K_{w1} \phi \quad (2.8)$$

İfadede  $f_1$  frekans,  $K_f$  1.11 ile 1.02 arasında değişen şekil faktörü,  $W_1$  faz başına sarım sayısı,  $K_{w1}$  sargı katsayısı,  $\Phi$  kutup başına akıyı gösterir.  $K_f$ ' nin değişimi Şekil 2.2' de verilmiştir[7].



Şekil 2.2. Diş Doyma Faktörüne Göre  $k_f$  ve  $\alpha_i$  Değerleri

Kutup başına akı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\phi = \alpha_i \tau L B_g \quad (2.9)$$

İfadede  $\alpha_i$  dişlerdeki manyetik doyma katsayısına bağlı şekil faktörüdür (Şekil 2.2).  $B_g$  ise hava aralığı akı yoğunluğu değeridir. Kutup adımı  $\tau$ ' nun ifadesi;

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2p} \quad (2.10)$$

şeklinde olup, senkron devir sayısı  $n_s = \frac{f_1 60}{p}$  ile hava aralığı görünür gücü ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$S_g = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 D_{is}^2 L \frac{n_s}{60} A_1 B_g \quad (2.11)$$

Son ifadedeki  $A_1$  değeri spesifik stator akım yükleme değeridir ve aşağıdaki değere eşittir. Ayrıca hacim kullanma faktörü olarak adlandıracağımız  $C_o$ ' ı (Esson Sabiti) tanımlayacağız.

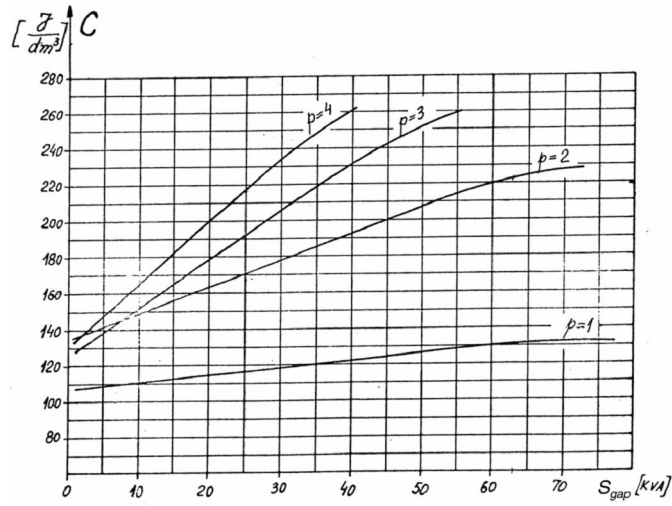
$$A_1 = \frac{6W_1 I_{1N}}{\pi D_{is}} \quad (2.12)$$

$$C_o = k_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 a_1 B_g = \frac{60 S_g}{D_{is}^2 L n_s} \quad (2.13)$$

Bununla birlikte  $C_o$  sabiti her makine için farklıdır. Çünkü  $A_1$  akım yüklemesi değeri ve hava aralığı akı yoğunluğu değerleri, makinanın momenti ve çift kutup sayısı değeri ile artar. Çıkış katsayısı değerimiz olan  $D_{is}^2 L$  Formül (2.1), (2.7) ve (2.13)' den aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$D_{is}^2 L = \frac{1}{C_o} \frac{60}{n_s} \frac{K_e P_n}{\eta \cos \varphi_1} \quad (2.14)$$

$S_g$ ' nin ve çift kutup sayısı  $p$ ' nin fonksiyonu olarak  $C_o$ ' ın tipik değerleri düşük güçlü asenkron motorlar için Şekil 2.3' de verilmiştir[7].



Şekil 2.3.  $C_o$  Esson Sabiti

$D_{is}^2 L$  çıkış sabiti aynı zamanda makinanın mil momenti ile doğru orantılıdır. Üretilen moment değeri çift kutup sayısı  $p$ ' nin artmasıyla daha küçük hacimden alınabileceğinden  $C_o$  sabiti kutup sayısı değeriyle artar (Şekil 2.3). Paket boyunun kutup adımına oranı standart bir aralığa oturtulmuştur ve bu oranı  $\lambda$  ile gösterirsek aşağıdaki değerler arasındadır.

$$\lambda = \frac{L}{\tau} = \frac{2Lp}{\pi D_{is}} \quad 0.6 < \lambda < 3.0 \quad (2.15)$$

Genel olarak uzun paket boyları küçük stator iç çaplarının kullanılmasına izin verir ve böylece bobin başı uzunluklarının kısalması sebebiyle bakır kayıplarında bir azalmaya sebebiyet verir. Bununla birlikte eylemsizlik momenti azalır.  $\lambda'$  nın optimal değeri motorun tasarım özelliklerine yüksek oranda bağlıdır ve seçimi tasarımı oldukça fazla etkiler. Stator iç çapı (2.14) ve (2.15) denklemlerinden hesaplanabilir.

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2p}{\pi \lambda} \frac{1}{C_o} \frac{p}{f_1} \frac{K_e P_n}{\eta \cos \varphi_1}} \quad (2.16)$$

Bu bir standart tasarım formülüdür. Bununla birlikte bu değer makinanın toplam hacmini elde etmek için yeterli değildir. Bunun için çoğu tasarımda stator dış çap değeri standartlaştırılmıştır.

$D_{is}^2 L$  çıkış sabitine benzer olarak stator dış çapı ile ilgili bir çıkış sabiti değeri hesaplanabilir. Bunun için bir akım yoğunluğu değeri  $J_{con}$  ( $A/m^2$ ) ve oluk doldurma faktörü  $K_d$  değeri ile birlikte stator dişlerindeki ve stator sırtındaki akı yoğunluğu değerleri  $B_{cs}$  ve  $B_{ts}$  kullanılır. Hava aralığı akı yoğunluğu değeri  $B_g$  ve diş akı yoğunluğu değeri  $B_{ts}$  biliniyor kabul edilerek stator oluk yüksekliği  $h_s$  aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak hesaplanır.

$$h_s = \frac{6W_1 I_{1N}}{\frac{B_g}{B_{ts}} J_{con} K_d} \frac{1}{\pi D_{is}} = \frac{A_1}{\frac{B_g}{B_{ts}} j_{con} K_d} \quad (2.17)$$

Stator sırt yüksekliği değeri  $h_{cs}$ :

$$h_{cs} = \frac{\phi}{2LB_{cs}} = \frac{\alpha_i}{2} \left( \frac{\pi D_{is}}{2p} \right) \frac{B_g}{B_{cs}} \quad (2.18)$$

olarak yazılabilir. Bu ifadelerle stator dış çapı  $D_{out}$  kolayca hesaplanabilir.

$$D_{out} = D_{is} + 2(h_s + h_{cs}) \quad (2.19)$$

(2.19) ifadesindeki  $D_{is}$  değeri (2.17) ve (2.18) ifadelerinden  $h_{cs}$  ve  $h_s$  değerleriyle  $D_{is}^2 L$  olarak yerine yazılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$D_{is}^2 L = D_{out}^2 L f_o(D_{is}) \quad (2.20)$$

$$f_o(D_{is}) = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{2(h_s + h_{cs})}{D_{is}} \right]^2} \quad (2.21)$$

(2.20) ifadesinden  $L = \lambda \frac{\pi D_{is}}{2p}$  alınarak stator dış çapı için aşağıdaki sonuç ifadesi elde edilir.

$$D_{out} = \sqrt{\frac{2p^2}{\pi \lambda C_o f_1} \frac{K_e P_n}{\eta \cos \varphi_1} \frac{1}{D_{is} f_o (D_{is})}} \quad (2.22)$$

Bu ifade ile hesaplanan stator dış çap değeri standart bir değere karşılık gelmiyorsa  $\lambda$  değeri modifiye edilerek standart bir değere ulaşılmaya çalışılır. Bununla birlikte çift kutup sayısının fonksiyonu olarak dış çapın, iç çapa oranı standartlaştırılmıştır ve bu değerler Çizelge 2.1’ de verilmiştir[7].

**Çizelge 2.1** İç/Dış Stator Çap Oranları

2p <sub>1</sub>	2	4	6	8
D <sub>is</sub> /D <sub>out</sub>	0.54-0.58	0.61-0.63	0.68-0.71	0.72-0.74

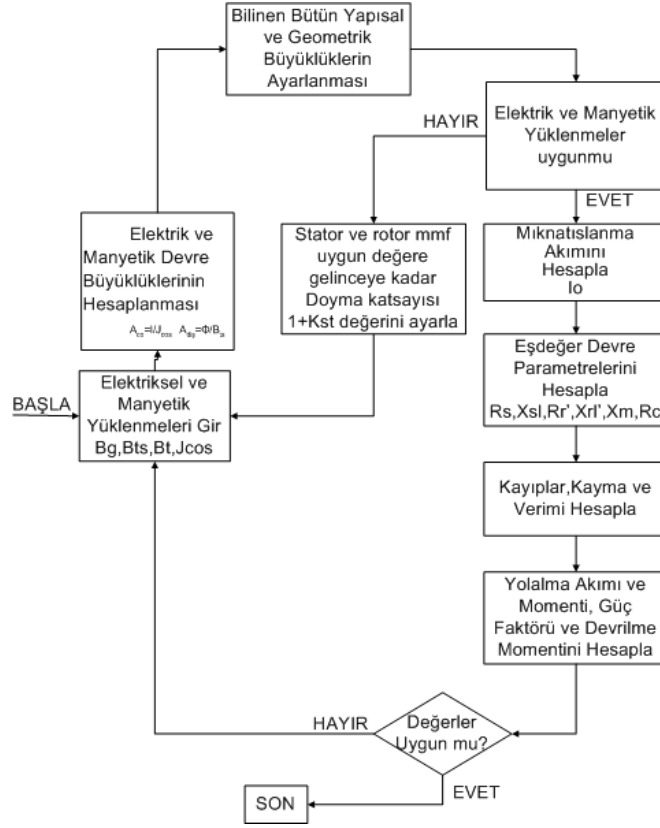
Yukarıda genel hatları anlatılan asenkron motor tasarımı ayrıntılı bir şekilde aşağıda anlatılmıştır.

### 2.3. Programda Kullanılan Algoritma

Asenkron motor tasarım aşamasının ana hatları, akış diyagramı Şekil 2.4’ de gösterilmiştir. İlk adımda tasarımın ana hatlarının belirlenir ve seçilen akı yoğunlukları ile akım değerleri kullanılarak D<sub>is</sub>, stator iç çapı, paket boyu, stator oluklarının boyutları ve stator dış çapı D<sub>out</sub> hesaplanır. Bunları rotor oluklarının boyutları, rotor sırt yüksekliği ve sincap kafesin diğer büyüklükleri hesaplanır. Bütün boyutlar standart değerlere göre hesaplanır (Stator dış çap, stator iletkenlerinin kesitleri vb). Daha sonra gerçek manyetik ve elektrik yüklenmeleri (Akım ve akı yoğunlukları) kontrol edilir. Eğer stator ve rotor dişlerinin manyetik doyma katsayısı ( $1+K_{st}$ ) seçilmiş değere eşit değilse tasarım  $1+K_{st}$  değerine yakınsayana kadar dış akı yoğunluğu değerleri tekrar ayarlanır. Bütün bu adımlar başarıyla uygulandığında mıknatıslanma akımı  $I_o$  değeri hesaplanır. Aynı şekilde eşdeğer devre parametreleri ( $R_1, R_2, X_1, X_2, X_m, R_c$ ), kayıplar, kayma oranı ve verim değerleri belirlenir. Güç faktörü, kısa devre akımı, nominal moment ve devrilme momentleri hesaplanır. Bu adımdan sonra bütün performans değerleri kontrol edilir ve yetersiz bulunursa bütün işlem birinci adımdan itibaren yeni akı yoğunluğu değerleri ve/veya akım yoğunlukları ile yeni paket oranı  $\lambda$  ayarlanarak tekrar hesaplanır. Bu işlem uygun değerler



elde edilene kadar iteratif şekilde devam eder. Bütün değerler uygun ise motorun işletme karakteristik eğrileri çizdirilir ve nominal işletme noktasındaki değerler hesaplanır.



Şekil 2.4. Tasarım Algoritması

#### 2.4. Stator Ana Boyutlarının Hesabı

Bir motor tasarımı yapılırken her zaman  $D_{is}^2 L$  çıkış sabitinden yola çıkılarak hesaplamalar yapılır. Stator iç çapı  $D_{is}$ ;

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2p_1 p_1 S_{gap}}{\pi \lambda f_1 C_0}} \quad (2.23)$$

olarak bulunur. Burada,  $\lambda$  paket oranı olup tecrübeler sonucu elde edilen katsayılarıdır ve Çizelge 2.2' de değerleri verilmiştir[7].

Çizelge 2.2  $\lambda$  Paket Oranları

$2p_1$	2	4	6	8
$\lambda$	0.6-1.0	1.2-1.8	1.6-2.2	2.0-3.0

Formüldeki  $S_g$  değeri Formül (2.11)' de,  $\lambda$  değeri Formül (2.15)' de ve  $C_o$  Esson sabitinin grafiği Şekil 2.3' de verilmişti. Stator paket boyu  $L$  ve kutup adımı  $\tau$  Formül (2.15)' e göre aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$L = \frac{\lambda \pi D_{is}}{2 p_1} \quad (2.24)$$

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2 p_1} \quad (2.25)$$

Bir kutup bölgesi altında bir faza düşen oluk sayısı  $q$  ile gösterilirse;

$$q = \frac{n_s}{2 p_1 m} \quad (2.26)$$

ile ifade edilir. Burada  $m$  faz sayısıdır. Bu durumda oluk adımı  $\tau_s$  şu şekilde yazılır.

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} \quad (2.27)$$

Hava aralığı boyu 2 kutuplu ve daha büyük kutuplu motorlar için ayrı ayrı hesaplanmaktadır ve bu formüller aşağıda verilmiştir.

$$g = (0.1 + 0.02 \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \rightarrow 2 p_1 = 2 \quad (2.28)$$

$$g = (0.1 + 0.012 \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \rightarrow 2 p_1 \geq 2$$

Bilindiği gibi, çok küçük hava aralığı boyu, hava aralığında büyük alan harmonikleri ve ilave kayıplar oluştururken, çok geniş hava aralığı boyu da güç katsayısını ve verimi azaltır[7].

#### 2.4.1. Stator sargılarının hesabı

Statorda kullanılacak oluk sayısı  $N_s$  aşağıdaki şekilde kolayca hesaplanabilir.

$$N_s = 2 p_1 q m \quad (2.29)$$

İki tabakalı sargının  $y/\tau$  değeri (bobin adım kısalması) temel stator mmf yüzey harmoniğini azaltacak şekilde seçilmelidir. İki komşu oluk arasındaki elektriki açı  $\alpha_{ec}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\alpha_{ec} = \frac{2\pi p_1}{N_s} \quad (2.30)$$

Sargı dağıtım katsayısı  $K_{q1}$ ;

$$K_{q1} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin\left(\frac{\pi}{6q}\right)} \quad (2.31)$$

Bobin adım katsayısı  $K_{y1}$ ;

$$K_{y1} = \sin\left(\frac{\pi y}{2\tau}\right) \quad (2.32)$$

Stator sargı faktörü  $K_{w1}$ ;

$$K_{w1} = K_{q1} K_{y1} \quad (2.33)$$

şeklinde hesaplanır.  $B_g$  hava aralığı akı yoğunluğunun farklı kutuplara sahip motorlar için aşağıda verilen aralıklarda seçilmesi tavsiye edilmektedir[7].

$$\begin{aligned} B_g &= (0.5 - 0.75)T & \rightarrow & 2p_1 = 2 \\ B_g &= (0.65 - 0.78)T & \rightarrow & 2p_1 = 4 \\ B_g &= (0.7 - 0.82)T & \rightarrow & 2p_1 = 6 \\ B_g &= (0.75 - 0.85)T & \rightarrow & 2p_1 = 8 \end{aligned} \quad (2.34)$$

Her fazdaki sarım sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$W_1 = \frac{K_e V_1}{4K_f K_{w1} f_1 \phi} \quad (2.35)$$

Her oluktaki iletken sayısı;

$$n_1 = \frac{a_1 W_1}{p_1 q} \quad (2.36)$$

olarak hesaplanır. Burada  $a_1$  paralel kol sayısıdır. Çift tabakalı sargılarda oluk başına iki farklı bobin varmış gibi  $n_1$  çift sayı olmalıdır. Bunun yeni değeri ile faz başına sarım sayısı tekrar hesaplanıp hava aralığı akı yoğunluğu değeri  $B_g = B_{geski} \frac{W_{1eski}}{W_{1yeni}}$  orantısı ile tekrar hesaplanır.

Motorun nominal akımı  $I_{In}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}\eta_n \cos \varphi_n V_1} \quad (2.37)$$

100 kW' ın altındaki güçler ve belirli hızlar için seçilecek akım yoğunluğu değerleri aşağıdaki aralıklarda seçilebilir[7].

$$\begin{aligned} J_{\cos} &= (4...7)A/mm^2 & 2p_1 &= 2,4 \\ J_{\cos} &= (5...8)A/mm^2 & 2p_1 &= 6,8 \end{aligned} \quad (2.38)$$

$J_{\cos}$  seçilerek tel kesit alanı  $A_{co}$  hesaplanır.

$$A_{co} = \frac{I_{1n}}{J_{\cos} a_1} \quad (2.39)$$

Buradan tel çapı  $d_{co}$  aşağıdaki hesaplanır.

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi}} \quad (2.40)$$

Genel olarak, düşük güçlü asenkron motorlarda  $d_{co} > 1.3$  mm ise birkaç paralel iletken ( $a_p$ ) kullanılabiliriz. Yeni tel kesiti  $d'_{co}$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$d'_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi a_p}} \quad (2.41)$$

Ek 1' den standartlaştırılmış çıplak tel kesiti seçilir. Eğer paralel iletkenlerin sayısı 4' den büyükse, paralel kol sayısı artırılmalıdır. Eğer bu durumda çözüm bulunamazsa, dikdörtgen kesitli manyetik tel kullanılır[7].

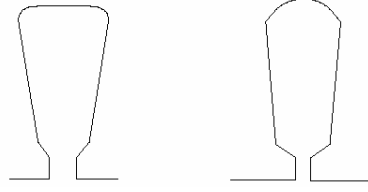
#### 2.4.2. Stator oluk boyutlarının hesabı

Her oluktaki sarım sayısı  $n_l$ , her paralel iletken sayısı  $a_p$  ve tel çapı  $d'_{co}$  bilindiğine göre kullanılabilir oluk alanı  $A_{su}$ ,  $K_d$  doldurma faktörü de kullanılarak hesaplanır. Yuvarlak teller için  $K_d$  doldurma oranı, 10 kW' ın altındaki motorlar için 0.35...0.4, 10 kW' ın üstündeki motorlar için 0.4...0.44 arasında alınır[7].

Kullanılabilir oluk alanı  $A_{su}$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}'^2 a_p n_l}{4K_d} \quad (2.42)$$

Trapezoidal ve yuvarlak yarı kapalı oluk şekilleri, stator için önerilen oluk tipleridir.



**Şekil 2.5** Trapezoidal ve Yuvarlak Stator Oluk Geometrileri

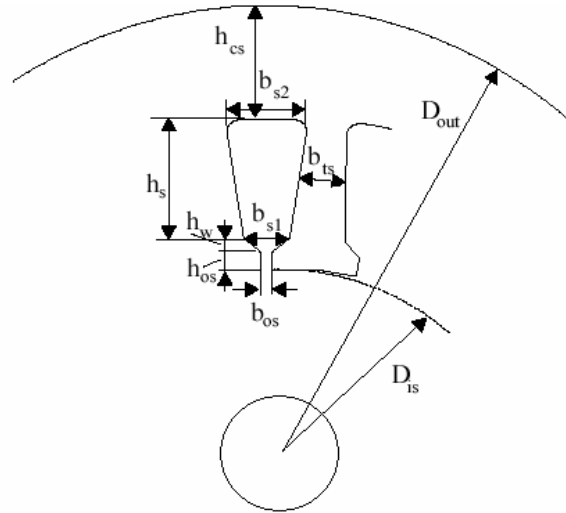
Böyle tip şekiller için stator dişleri dikdörtgendir (Şekil 2.5).  $b_{os}$ ,  $h_{os}$ ,  $h_w$  değerleri deneyimler sonucu elde edilmiş değerlerdir ve aralıkları şu şekildedir(Şekil 2.6).

$$\begin{aligned} b_{os} &= 2...3 \leq 8 \text{ g mm} \\ h_{os} &= 0.5...1 \text{ mm} \\ h_w &= 1...4 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Hava aralığı akısının tamamının stator dişlerinden geçtiği kabul edilirse aşağıdaki eşitliği yazabiliriz.

$$B_g \tau_s L \approx B_{ts} b_{ts} L K_{fe} \quad (2.44)$$

Burada  $K_{fe} = 0.96$ , 0.5 mm kalınlığındaki sac levha için yalıtım malzemesinin kalınlığının dikkate alınmasıyla kabul edilen paketleme faktörüdür.



**Şekil 2.6.** Stator Oluk Geometrisi

(2.44) ifadesinden diş genişliği  $b_{ts}$  aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$b_{ts} = \frac{B_g \tau_s}{B_{ts} K_{fe}} \quad (2.45)$$

Teknolojik sınırlamalardan dolayı stator dış genişliği 3.5 mm' nin altında olmaması tavsiye edilir[7]. tator oluşunun alt genişliği  $b_{s1}$  aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{is} + 2h_{os} + h_w)}{N_s} - b_{ts} \quad (2.46)$$

Kullanılabilir oluk alanı aşağıdaki şekilde ifade edilirse;

$$A_{su} = h_s \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \quad (2.47)$$

yazılır ve stator oluşunun üst genişliği  $b_{s2}$ ;

$$b_{s2} \approx b_{s1} + 2h_s \tan \frac{\pi}{N_s} \quad (2.48)$$

olarak ifade edilir. Bu iki eşitlikten bilinmeyenler  $b_{s2}$  ve  $h_s$  bulunur.

$$b_{s2}^2 - b_{s1}^2 = 4A_{su} \tan \frac{\pi}{N_s} \quad (2.49)$$

$$b_{s2} = \sqrt{4A_{su} \tan \frac{\pi}{N_s} + b_{s1}^2} \quad (2.50)$$

$$h_s = \frac{2A_{su}}{b_{s1} + b_{s2}} \quad (2.51)$$

$(1+K_{st})$  dış doyma faktörünün stator ve rotor dişlerinde aynı magnetomotor kuvvetini ürettiği varsayılarak hesaplamalara devam edilir.

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}} \quad (2.52)$$

Hava aralığı magnetomotor kuvveti bu durumda aşağıdaki gibi olur.

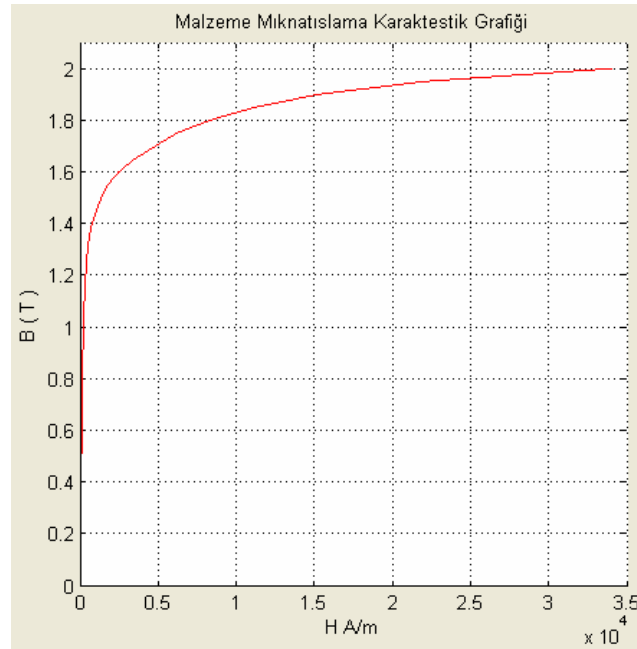
$$F_{mg} \approx 1.2g \frac{B_g}{\mu_0} \quad (2.53)$$

Seçilen  $B_{ts}$  stator dış akı yoğunluğu değerine karşılık gelen manyetik alan şiddeti  $H_{ts}$ , mıknatıslanma eğrisi çizelgesinden (Çizelge 2.3) bulunur ve stator dış magnetomotor kuvveti değeri  $F_{mts}$  hesaplanır. Hesaplamalarda kullanılan mıknatıslama karakteristiği Şekil 2.7' de verilmiştir.

$$F_{mts} = H_{ts} (h_s + h_{os} + h_w) \quad (2.54)$$

**Çizelge 2.3** Laminasyon Mıknatıslanma Eğrisi  $B_m(H_m)$

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0.05	22.8	0.55	98	1.05	237	1.55	1760
0.1	35	0.6	106	1.1	273	1.6	2460
0.15	45	0.65	115	1.15	310	1.65	3460
0.2	49	0.7	124	1.2	356	1.7	4800
0.25	57	0.75	135	1.25	417	1.75	6160
0.3	65	0.8	148	1.3	482	1.8	8270
0.35	70	0.85	162	1.35	585	1.85	11170
0.4	76	0.9	177	1.4	760	1.9	15220
0.45	83	0.95	198	1.45	1050	1.95	22000
0.5	90	1.0	220	1.5	1340	2.0	34000



**Şekil 2.7.** Nüve İçin Kullanılan Malzeme Mıknatıslanma (B-H) Karakteristiği

Uygun  $(1+K_{st})$  değeri için rotor dış magnetomotor kuvveti  $F_{mtr}$  hesaplanır.

$$F_{mtr} = K_{st} F_{mg} - F_{mts} \quad (2.55)$$

Eğer rotor dış magnetomotor kuvveti değeri stator dış magnetomotor kuvveti değerinden çok küçük olursa veya sıfırdan küçük çıkar ise  $1+K_{st}$  için seçilen  $B_g$  hava aralığı akı yoğunluğu değerini biraz küçültmemiz gerekir. Bu durumda tasarım işlemi (2.9) eşitliğine geri dönülerek yeniden başlar ve iteratif işlemler  $F_{mts} \cong F_{mtr}$  olana kadar tekrarlanır. (2.22) vasıtasıyla hesaplanan stator dış çapı bilindiğine göre stator sırt yüksekliği  $h_{cs}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + 2(h_{os} + h_w + h_s))}{2} \quad (2.56)$$

Stator sırtındaki akı değeri bilindiğinden buradaki akı yoğunluğu  $B_{cs}$  aşağıdaki ifade ile kontrol edilir.

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2Lh_{cs}} \quad (2.57)$$

Eğer  $B_{cs}$  çok büyük çıkarsa; bu problemi çözümlerin üç yolu vardır. Birinci ve basit çözüm olarak  $B_{cs}$ , 1.4...1.7 arasında çıkıncaya kadar stator dış çapını büyültmektir. İkinci çözüm, Denklem (2.16)' ya geri dönülerek stator iç çapını küçültecek şekilde  $\lambda$  paket oranı değeri daha büyük değerde seçilir. Dolayısıyla daha büyük  $b_{cs}$  değeri ve buna bağlı olarak da küçük  $B_{cs}$  değeri elde edilmiş olur. Son çözüm ise, akım yoğunluğu değeri artırılır böylece stator oluk yüksekliği  $h_s$  azalır[7].

## 2.5. Rotor Oluklarının Hesabı

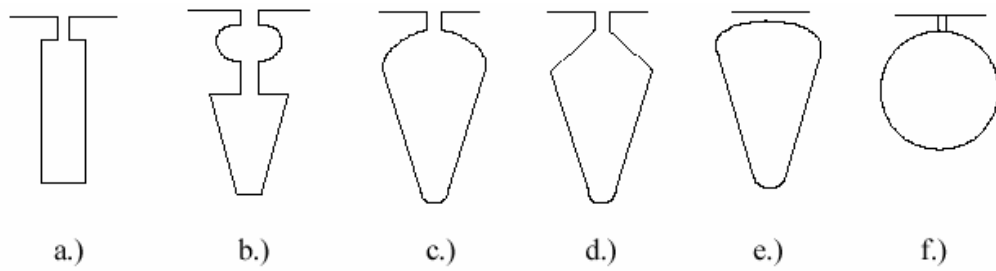
Vuruntu harmonikleri, ilave kayıpları, merkez kaç kuvvetlerini, gürültü ve titreşimi azaltmak için stator ve rotor oluk sayıları uygun değerlerde seçilmelidir. Kullanılabilir stator ve rotor oluk geometrilerinin uygun değerleri Çizelge 2.4' de verilmiştir.



**Çizelge 2.4.** Stator ve Rotor Oluk Sayıları

$2p_1$	$N_s$	$N_r$
2	24	18,20,22,28,30,33,34
	36	25,27,28,29,30,43
	48	30,37,39,40,41
4	24	16,18,20,30,33,34,35,36
	36	28,30,32,34,45,48
	48	36,40,44,57,59
	72	42,48,54,56,60,61,62,68,76
6	36	20,22,28,44,47,49
	54	34,36,38,40,44,46
	72	44,46,50,60,61,62,82,83
8	48	26,30,34,35,36,38,58
	72	42,46,48,50,52,56,60
12	72	69,75,80
	90	86,87,93,94

Yüksek verim hedeflendiği için, yol alma akımının büyük olması deri etkisi olayı göz önüne alınmaz. Aynı zamanda yol alma momentinin büyük olması sebebiyle kaçak endüktanslarda çok büyük olamayacaktır. Asenkron motorların rotorlarında kullanılan oluk geometri tipleri Şekil 2.8' de görülmektedir. Bu rotor tipleri içinde en az kaçak reaktans ve en iyi moment değerini veren Şekil 2.8.c' deki oluk tipi tercih edilir[8].

**Şekil 2.8.** Tipik Rotor Olukları

Öncelikle nominal rotor akımına ihtiyacımız var ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$I_b = K_t \frac{2mW_1 K_{wl}}{N_r} I_{1n} \quad (2.58)$$

Yukarıdaki ifadede  $K_i=I$  alınırsa rotor ve stator magnetomotor kuvvet değerleri eşit olacaktır. Gerçek stator magnetomotor kuvveti daha büyüktür ve aşağıdaki ifadeyle  $K_i$  değeri hesaplanır.

$$K_i \approx 0.8 \cos \varphi_1 + 0.2 \quad (2.59)$$

Rotor oluk alanı  $A_b$  hesaplanan nominal rotor akımı ve rotor iletkenleri için seçilen akım yoğunluğu değerleri ile basitçe hesaplanabilir.

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} \quad (2.60)$$

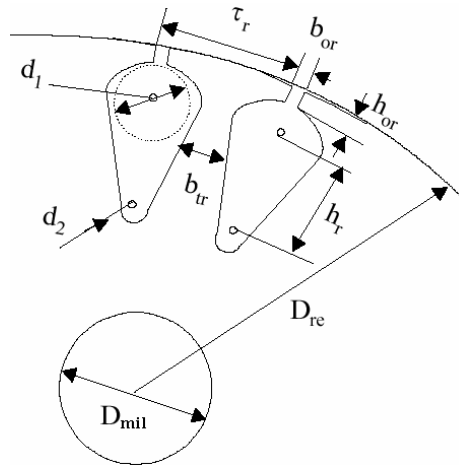
Kısa devre halkası akımı  $I_{er}$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \sin \frac{\pi p_1}{N_r}} \quad (2.61)$$

Kısa devre halkasındaki akım yoğunluğu  $J_{er}=(0.75...0.8)J_b$  olacak şekilde seçilmelidir[7]. Büyük değerler kısa devre halkasındaki ısının direkt olarak rotor nüvesine geçmesine sebep olur. Kısa devre halkasının kesit alanı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} \quad (2.62)$$

Şekil 2.9' daki tanımlanmış parametreler temel alınarak rotor oluk boyutlandırması aşağıdaki gibi yapılır.



Şekil 2.9. Rotor Oluk Geometrisi

Rotor oluk adımı  $\tau_r$  şu şekildedir.

$$\tau_r = \frac{\pi(D_{is} - 2g)}{N_r} \quad (2.63)$$

Rotor dış akı yoğunluğu  $B_{tr}$  bilindiğine göre rotor dış genişliği  $b_{tr}$  bulunabilir.

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{fe} B_{tr}} \quad (2.64)$$

Rotor oluğu üst çap değeri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$d_1 + b_{tr} = \frac{\pi(D_{is} - 2h_{or} - d_1)}{N_r} \quad (2.65)$$

$$d_1 = \frac{\pi(D_{is} - 2h_{or}) - N_r b_{tr}}{\pi + N_r}$$

Rotor oluk geometrisini tamamlamak üzere oluk alan eşitliklerini kullanırız.

$$A_b = \frac{\pi}{8}(d_1^2 + d_2^2) + \frac{(d_1 + d_2)h_r}{2} \quad (2.66)$$

$$d_1 - d_2 = 2h_r \tan \frac{\pi}{N_r}$$

Yukarıdaki iki denklem çözüldüğünde  $d_2$  ve  $h_r$  elde edilir. Seçilen  $B_{tr}$  değeri için (2.55) formülünden bulunan  $F_{mtr}$  değeri kontrol edilir. Eğer  $F_{mtr}$  çok büyük çıkarsa, akı yoğunluğu değerini düşürerek  $b_{tr}$  ve akım yoğunluğu değerleri artırılmak suretiyle akı yoğunluğu değeri düşürülmelidir. Çubuk akım yoğunluğunun artması, hedeflenen verim değerini azaltır. Bu yüzden (2.9) formülünden itibaren işlemler tekrar yapılır. Aynı verim değerini sağlamak için stator iç çapı yükseltilmelidir. Bu yüzden eşitlik (2.16)' dan itibaren tasarım tekrar başlatılır.  $F_{mtr}$  uygun sınırlar içinde olduğu zaman işlem sona erer.  $F_{mtr}$  küçük çıktığında,  $B_{tr}$  değerini artırmalıyız ve yeterli yakınsamayı elde edene kadar Denklem (2.64)' e geri dönmeliyiz.

$B_{cr}$  biliniyor olduğuna göre rotor sırt yüksekliği değeri  $h_{cr}$  şu şekilde hesaplanır.

$$h_{cr} = \frac{\phi}{2LB_{cr}} \quad (2.67)$$

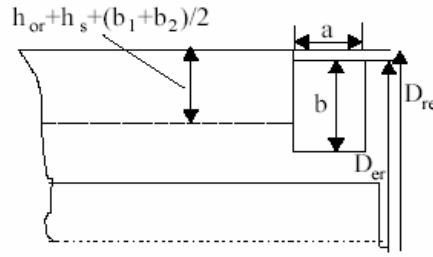
Maksimum mil çapı  $D_{mil}$ ;

$$(D_{mil})_{\max} \leq D_{is} - 2g - 2(h_{or} + h_r + h_{cr} + \frac{d_1 + d_2}{2}) \quad (2.68)$$

Mil çapı nominal moment ile ilişkili olduğundan mekanik dizayn çizelgelerinde bunların standartları verilmiştir. Nominal moment yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanabilir.

$$T_{en} = \frac{P_n}{2\pi \frac{f_1}{p_1} (1 - S_n)} \quad (2.69)$$

Kısa devre halkasının kesiti Şekil 2.10' de verilmiştir.



Şekil 2.10. Kısa Devre Halkası Kesiti

Genel olarak  $D_{re} - D_{er} = (3 - 4)mm$  dir. Kısa devre halkası boyu ve eni aşağıdaki gibi bulunur.

$$b = (1.0 \dots 1.2)(h_r + h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2}) \quad (2.70)$$

$$a = \frac{A_{er}}{b} \quad (2.71)$$

## 2.6. Mıknatıslanma Akımı

Makinaya ait mıknatıslama magnetomotor kuvveti, çeşitli noktalarda oluşan magnetomotor kuvvetleri ve Carter sabiti ile hesaplanabilir.

$$F_{lm} = 2(K_c g \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr}) \quad (2.72)$$

Bu değerın hesaplanmasında (2.53) nolu formüldeki Carter sabitinden farklı bir değer kullanılması gerekir ve bunun hesabı aşağıdaki şekilde yapılır.

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5g + b_{os}} \quad (2.73)$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5g + b_{rs}} \quad (2.74)$$

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} \quad (2.75)$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} \quad (2.76)$$

Bu durumda toplam Carter sabiti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$K_c = K_{c1} K_{c2} \quad (2.77)$$

Rotor ve stator dış magnetomotor kuvvet değerlerini (2.54) ve (2.55) nolu denklemlerden daha önce hesaplamıştık.  $F_{mcs}$  ve  $F_{mcr}$  stator ve rotor sırt magnetomotor kuvveti değerleri hesaplanmalıdır[3].

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi(D_{out} - h_{cs})}{2.p_1} H_{cs}(B_{cs}) \quad (2.78)$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi(D_{mil} + h_{cr})}{2.p_1} H_{cr}(B_{cr})$$

$C_{cs}$  ve  $C_{cr}$  sırttaki akı yolunun ortalama uzunluğunu tanımlayan ampirik katsayılardır. Bunların değeri yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir.

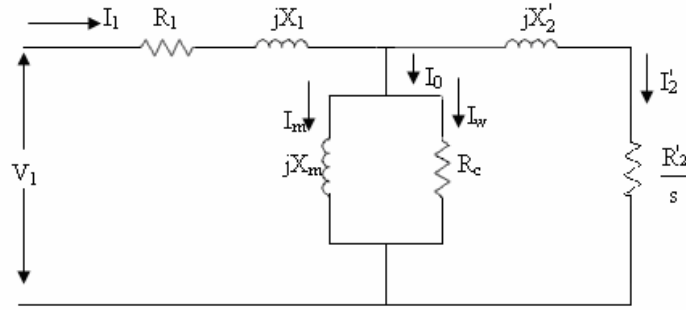
$$C_{cs,r} \approx 0.88.e^{-0.4B_{cs,r}^2} \quad (2.79)$$

Stator ve rotor sırt akı yoğunlukları değerlerine karşılık gelen manyetik alan şiddetleri Çizelge 2.4' den alınarak  $F_{mcs}$  ve  $F_{mcr}$  hesaplanır. Sonuçta  $F_{lm}$  değeri bilindiğine göre mıknatıslanma akımı  $I_m$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$I_m = \frac{\pi p_1 \left(\frac{F_{lm}}{2}\right)}{3\sqrt{2}W_1 K_{w1}} \quad (2.80)$$

## 2.7. Direnç Ve Endüktans Değerlerinin Hesabı

Asenkron motora ait bir faz eşdeğer devre Şekil 2.11' de verilmiştir.



Şekil 2.11. Asenkron Motora Ait Bir Faz Eşdeğer Devresi

Stator bir faz direnci  $R_s$ ;

$$R_s = \rho_{co} \frac{l_c W_1}{A_{co} a_1} \quad (2.81)$$

$l_c$  bobin uzunluğu, aktif kısım  $2L$  ve bobin başı ucu  $2l_{end}$ ' i hesaba katılarak bulunur.

$$l_c = 2(L + l_{end}) \quad (2.82)$$

Bobin başı uzunluğu, bobin açıklığı  $y$ ' ye, kutup sayısına, bobinlerin biçimine ve sargı tabaka sayısına göre değişir. Genel olarak üretici firmalar ampirik formüller geliştirmiştir.

$$\begin{aligned} l_{end} &= 2y - 0.04 && \rightarrow && 2p_1 = 2 \\ l_{end} &= 2y - 0.02 && \rightarrow && 2p_1 = 4 \\ l_{end} &= \frac{\pi}{2}y - 0.018 && \rightarrow && 2p_1 = 6 \\ l_{end} &= 2.2y - 0.012 && \rightarrow && 2p_1 = 8 \end{aligned} \quad (2.83)$$

$\beta$  bobin kısaltma faktörü olup;

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (2.84)$$

ile verilir ve genelde  $2/3 \leq \beta \leq 1$  arasındadır. Bakırın  $20^\circ\text{C}$  ve  $115^\circ\text{C}$ ' deki özdirenci  $(\rho_{co})_{20} = 1.78 \cdot 10^{-8}$  ve  $(\rho_{co})_{115} = 1.37 (\rho_{co})_{20}$  dir. Yüksek verim hedefi için sargı sıcaklığı, yalıtım için çok yüksek olmamalıdır.  $80^\circ\text{C}$ ' deki özdirencin kullanılması uygundur.  $t_2$   $80^\circ\text{C}$  ve  $t_1$  normal oda sıcaklığıdır.

$$(\rho_{co})_{80^\circ\text{C}} = (\rho_{co})_{20^\circ\text{C}} \left( 1 + \frac{1}{273} (t_2 - t_1) \right) \quad (2.85)$$

Bütün değerler yerine konarak  $R_s$  stator tek faz direnci hesaplanır. Kısa devre halkasının eşdeğer direnci  $R_{be}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R_{be} = \rho_{AL} \left[ \frac{L}{A_b} K_r + \frac{l_{er}}{2A_{er} \sin^2\left(\frac{\pi p_1}{N_r}\right)} \right] \quad (2.86)$$

Döküm alüminyumun  $20^0 C$ ' deki öz direnci  $\rho_{Al}=3.1 \cdot 10^{-8} \Omega m$  dir ve kısa devre halkası uzunluğu  $l_{er}$ ;

$$l_{er} = \frac{\pi(D_{is} - b)}{N_r} \quad (2.87)$$

şeklindedir.  $K_r$  deri etkisi direnç katsayısıdır ve yaklaşık olarak;

$$K_r = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \approx \xi \quad (2.88)$$

hesaplanır. Kullanılan  $\zeta$  ve  $\beta_s$  değerleri şu şekildedir[7].

$$\xi = \beta_s h_r \sqrt{S} \quad (2.89)$$

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega_{10}}{2\rho_{al}}} \quad (2.90)$$

Bilinenler yardımıyla  $R_{be}$  hesaplanır. Statora indirgenmiş rotor direnci  $R_r$  aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$R_r = \frac{4m}{N_r} (W_1 K_{w1})^2 R_{be} \quad (2.91)$$

Stator kaçak reaktansı  $X_{s1}$  ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$X_{s1} = 2\mu_0 \omega_1 L \frac{W_1^2}{p_1 q} (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{ec}) \quad (2.92)$$

$\lambda_s$ ,  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{ec}$  farklı oluk ve kısa devre halka bağlantı katsayılarıdır[7].

$$\lambda_s = \left[ \frac{2}{3} \frac{h_s}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{2h_w}{b_{os} + b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \left( \frac{1 + 3\beta}{4} \right) \quad (2.93)$$

$\lambda_{ds}$  oluk geometrisine bağlı olup yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9\tau_s q^2 K_{w1} C_s \gamma_{dc}}{K_c g (1 + K_{st})} \quad (2.94)$$

$$C_s = 1 - 0.033 \frac{b_{os}^2}{g\tau_s} \quad (2.95)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{dc} &= (0.11 \sin \varphi_1 + 0.28) \cdot 10^{-2} \rightarrow q = 8 \\ \gamma_{dc} &= (0.11 \sin \varphi_1 + 0.41) \cdot 10^{-2} \rightarrow q = 6 \\ \gamma_{dc} &= (0.14 \sin \varphi_1 + 0.76) \cdot 10^{-2} \rightarrow q = 4 \\ \gamma_{dc} &= (0.18 \sin \varphi_1 + 1.24) \cdot 10^{-2} \rightarrow q = 3 \\ \gamma_{dc} &= (0.25 \sin \varphi_1 + 2.6) \cdot 10^{-2} \rightarrow q = 2 \end{aligned} \quad (2.96)$$

Bilinenler yardımıyla  $\lambda_{ds}$  bulunur. İki tabakalı sargı için bobin başı özel geometrik permeans katsayısı  $\lambda_{ec}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\lambda_{ec} = 0.34 \frac{q}{L} (l_{end} - 0.64 \beta \tau) \quad (2.97)$$

Eşdeğer rotor çubuk kaçak reaktansı  $X_{be}$ :

$$X_{be} = 2\pi f_1 \mu_0 L (\lambda_r K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \quad (2.98)$$

olarak hesaplanır. Burada  $\lambda_r$  farklı rotor olukları ve kısa devre halkası permeans katsayısıdır. Şekil 2.9' daki yuvarlak oluk için  $\lambda_r$  ve  $\lambda_{dr}$  değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\lambda_r \approx 0.66 + \frac{2h_r}{3(d_1 + d_2)} + \frac{h_{or}}{b_{or}} \quad (2.99)$$

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9\tau_r \gamma_{dr}}{K_c g} \left( \frac{N_r}{6p_1} \right)^2 \quad (2.100)$$

$$\gamma_{dr} = 9 \left( \frac{6p_1}{N_r} \right)^2 \quad (2.101)$$

Kaçak reaktans için deri etkisi katsayısı  $K_x$ ;



$$K_x \approx \frac{3}{2.\xi} \frac{(\sinh(2.\xi) - \sin(2.\xi))}{(\cosh(2.\xi) - \cos(2.\xi))} \approx \frac{3}{2.\xi} \quad (2.102)$$

$\lambda_{er}$  değeri aşağıdaki gibidir.

$$\lambda_{er} = \frac{23(D_{is} - b)}{N_r L 4 \sin^2\left(\frac{\pi p_1}{N_r}\right)} \quad (2.103)$$

Bilinenler yardımıyla  $X_{be}$  hesaplanabilir. Rotor kaçak reaktansı  $X_{r1}$ ;

$$X_{r1} = 4m \frac{(W_1 K_{w1})^2}{N_r} X_{be} \quad (2.104)$$

Sıfır hız ( $s=1$ ) için hem stator hem de rotor kaçak reaktansı, kaçak akı yolu doyma etkisinden dolayı azaltılmalıdır.

$$\begin{aligned} (X_{s1})_{sat}^{S=1} &= X_{s1} (0.7 - 0.8) \\ (X_{r1})_{sat}^{S=1} &= X_{r1} (0.6 - 0.7) \end{aligned} \quad (2.105)$$

Nominal kayma için; deri etkisi ve kaçak akı doyma etkisi elimine edilebilir.

$$K_R = K_X = 1; \quad (2.106)$$

Bilinenler yardımıyla  $(R_{be})_{Sn}$  hesaplanır. Rotor direnci  $(R_r)_{Sn}$ ;

$$(R_r)_{Sn} = (R_r)_{S=1} \frac{R_{be}^{S=Sn}}{R_{be}^{S=1}} \quad (2.107)$$

Benzer yolla, eşdeğer rotor kaçak reaktansı nominal kaymada  $X_{r1}^{S=Sn}$  bulunur. Miknatıslanma reaktansı  $X_m$ ;

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_1}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{s1} \quad (2.108)$$

Demir direnci  $R_c$  değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_{10} = \frac{p_{iron} + p_{mv} + (3I_m^2 R_s)}{3V_1} \quad (2.109)$$

$$R_c = \frac{V_1}{I_{10}} \quad (2.110)$$

## 2.8. Kayıplar Ve Verim

Verim, çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum losses} \quad (2.111)$$

Kayıp bileşenleri 5 kısımdan meydana gelir.

$$\sum losses = P_{co} + P_{al} + P_{iron} + P_{mv} + P_{stray} \quad (2.112)$$

$P_{co}$  stator sargı kayıplarını gösterir.

$$P_{co} = 3R_s I_{1n}^2 \quad (2.113)$$

$P_{al}$  rotor kafes kayıplarını verir.

$$P_{al} = 3(R_r)_{Sn} I_m^2 = 3R_r K_t^2 I_{1n}^2 \quad (2.114)$$

Mekanik yüke bağlı olan kayıplar  $P_{stray}=0.01.P_n$  ile bulunur. Nüve kayıpları  $P_{iron}^l$ ;  $P_{iron}^h$  temel nüve kayıpları ve ilave  $P_{iron}^h$  harmonik kayıplardan oluşur. Temel nüve kayıpları sadece dişte ve stator boyunduruğunda oluşur ( $p_{tl}, p_{ty}$ ). Rotorda ise frekansın düşük olması sebebiyle dikkate alınmaz. Stator diş kayıpları  $p_{t1}$ ;

$$p_{t1} \approx K_t p_{10} \left( \frac{f_1}{50} \right)^{1.3} B_{ts}^{1.7} G_{t1} \quad (2.115)$$

olarak ifade edilir.

Burada  $p_{10}$ , 50Hz ve 1T' deki W/kg cinsinden değeridir ( $p_{10}=2....3$  W/kg). Üretici firmanın verdiği katalog değeridir.  $K_t=1.6....1.8$  arasında olup makine konstrüksiyonu için katsayıdır.

Stator diş ağırlığı  $G_{t1}$  ise aşağıdaki gibi verilebilir.

$$G_{t1} = \gamma_{iron} N_s b_{ts} (h_s + h_w + h_{os}) L K_{fe} \quad (2.116)$$

Benzer yolla stator boyunduruk temel kayıpları  $p_{y1}$  bulunur.

$$p_{y1} = K_y p_{10} \left( \frac{f_1}{50} \right)^{1.3} B_{cs}^{1.7} G_{y1} \quad (2.117)$$

$K_y=1.6 \dots 1.9$  arasında olup makine konstrüksiyonu için katsayıdır. Stator boyunduruk ağırlığı  $G_{y1}$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{y1} = \gamma_{iron} \frac{\pi}{4} [D_{out}^2 - (D_{out} - 2h_{cs})^2] L K_{fe} \quad (2.118)$$

Temel nüve kayıpları  $P_{iron}^1$  ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$P_{iron}^1 = p_{t1} + p_{y1} \quad (2.119)$$

Diş akı titreşim nüve kaybı, mekanik kayıpların ana bileşenini oluşturur.

$$p_{iron}^s \approx 0.510^{-4} \left[ \left( N_r \frac{f_1}{p_1} K_{ps} B_{ps} \right)^2 G_{ts} + \left( N_s \frac{f_1}{p_1} K_{pr} B_{pr} \right)^2 G_{tr} \right] \quad (2.120)$$

$$K_{ps} \approx \frac{1}{2.2 - B_{ts}} \quad (2.121)$$

$$K_{pr} = \frac{1}{2.2 - B_{tr}} \quad (2.122)$$

$$\begin{aligned} B_{ps} &\approx (K_{c2} - 1) Bg \\ B_{pr} &\approx (K_{c1} - 1) Bg \end{aligned} \quad (2.123)$$

Rotor diş ağırlığı  $G_{tr}$ ;

$$G_{tr} = \gamma_{iron} K_{fe} N_r \left( h_r + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \quad (2.124)$$

şeklinde verilir. Toplam nüve kayıpları  $p_{iron}^s$ ;

$$P_{iron} = P_{iron}^1 + P_{iron}^s \quad (2.125)$$

olarak hesaplanır. Bütün kayıp değerlerinin hesaplanmasından sonra toplam kayıplar bulunur ve değeri hesaplanır. Eğer verim hedeflenen verimden daha küçük olursa, stator iç çapı  $D_{is}$  daha büyük değer alınarak tasarım yeniden gözden geçirilir.

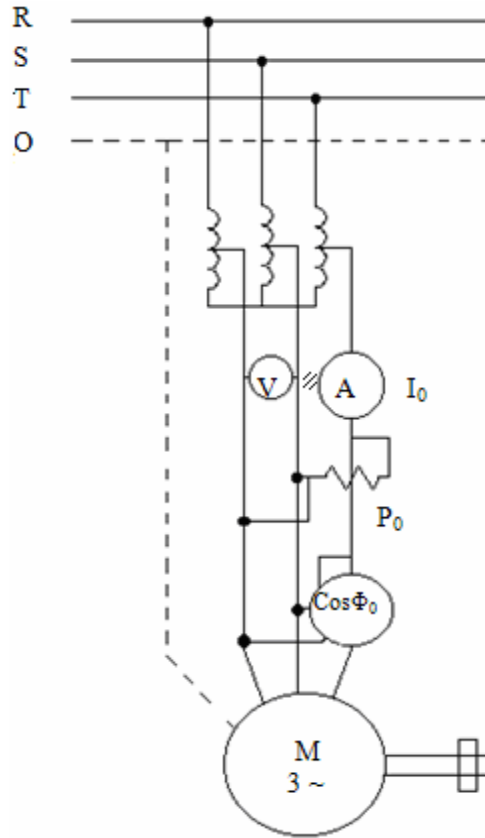
### 3. ASENKRON MOTORUN KARARLI HAL ANALİZİ

#### 3.1. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması

Şekil 1,3'de verilen eşdeğer devredeki üç fazlı asenkron motorun parametreleri oldukça iyi bilinen boşa çalışma ve kısa devre deneyleri kullanılarak hesaplanır. Bu metot ile hesaplanan parametreler sabittir[6].

##### 3.1.1. Boşa çalışma deneyi:

Normal frekanslı, şebeke gerilimi altında çalışan asenkron motorun şebekeden çektiği güç, stator demir kayıpları ile sürtünme ve rüzgar kayıplarının toplamını verir. Boşa çalışan motorun devir sayısı döner alanın devrine yakın (kayma çok küçük) olduğundan, rotorun demir ve bakır kayıpları oldukça küçüktür. Normal şebeke gerilimi altında boşa çalışan asenkron motorun stator sargılarından geçen akımlar bu sargılarda ( $I_0^2 R_l$ ) watt bakır kayıplarına neden olur. Bu kayıplar bulunduktan sonra motorun şebekeden çektiği güçten çıkarılırsa, geriye kalan güç stator demir kayıpları ile sürtünme ve rüzgar kayıplarının toplamını verir. Şekil 3.1'de Asenkron motorun boşa çalışma deneyi bağlantı şeması gösterilmiştir.



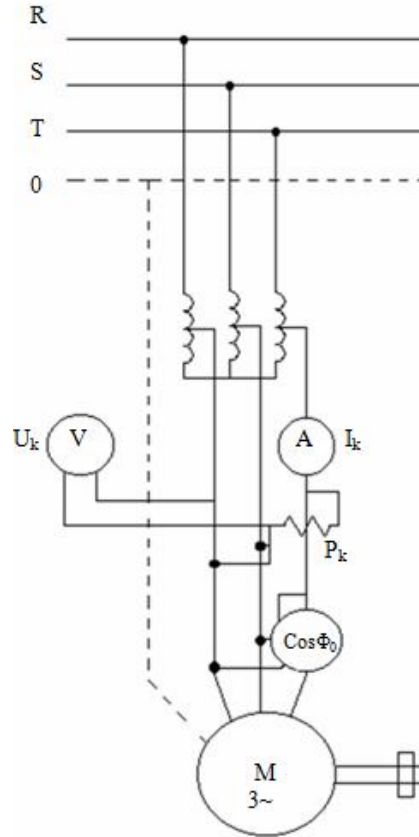
Şekil 3.1. Asenkron motorun boşa çalışma deneyi bağlantı şeması

### 3.1.2. Kısa devre çalışma deneyi:

Asenkron motorun kısa devre deneyi, transformatörün kısa devre deneyine benzer. Çünkü rotoru kilitli bir asenkron motor sekonderi kısa devre edilmiş bir transformatör gibidir. ( $s=1$ )

Şekil 3.2'deki gibi bir motor bağlantısı yapılır. Oto transformatör ile motora uygulanan gerilim sıfırdan başlanarak kademe kademe artırılır. Motorun çektiği akım, motorun etiketinde yazılan normal akım değerine ulaşıncaya kadar geriliminim artırılmasına devam edilir.

Motorun normal akımına eşit kısa devre akımının geçmesine sebep olan  $U_k$  kısa devre gerilim, normal gerilimin %20-%35 i civarındadır. Bu arada motorun çektiği güç  $P_k$ , kısa devre gücü bakır kayıplarını verir. Kilitli rotorda sürtünme ve rüzgâr kayıpları, rotor dönmediği için sıfırdır. Motora uygulanan gerilimin düşük olması ve rotor manyetik alanın hava aralığındaki manyetik akıyı zayıflatması gibi sebeplerden dolayı motordaki demir kayıpları ihmal edilebilir. Şekil 3.2'de Asenkron motorun kısa devre çalışma deneyi bağlantı şeması gösterilmiştir.

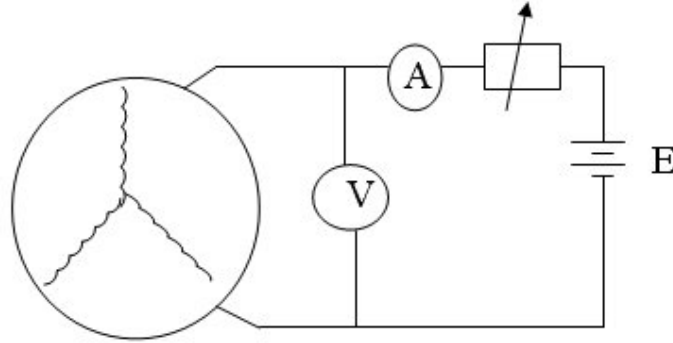


Şekil 3.2. Asenkron motorun kısa devre çalışma deneyi bağlantı şeması

### 3.1.3. Asenkron motorun stator etkin faz direncinin bulunması

Şekil 3.3' de görüldüğü gibi, bir doğru akım kaynağı (akü bataryası) ampermetre ve voltmetre ile stator faz sargılarının doğru akım dirençleri ölçülür. Stator sargılarının etkin dirençleri (alternatif akımdaki omik dirençleri) doğru akımda ölçülen omik dirençlerinin 1,1 ile 1,2 katı kadardır.

Üç fazlı stator sargılarının doğru akımla ölçülen faz dirençlerinin birbirine eşit olması gereklidir. Çünkü statora yerleştirilen faz sargılarının sarım sayıları, tel çapları ve bobinlerin adımları birbirinin aynıdır.



Şekil 3.3. Stator direncinin ölçülme devresi

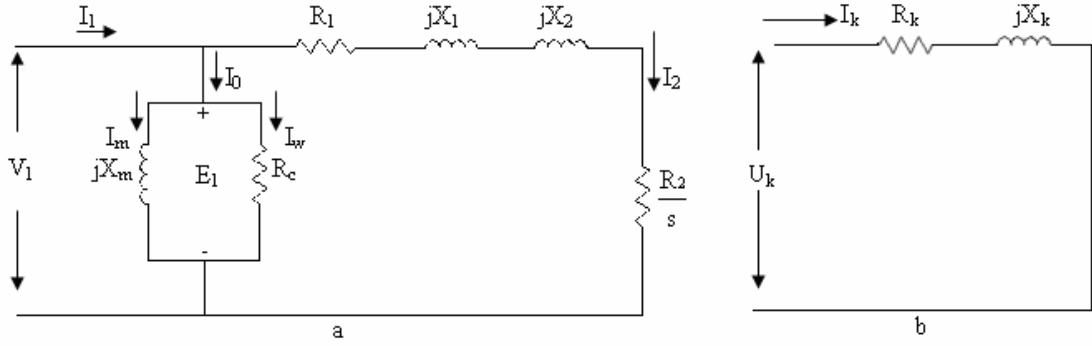
$$2 \times R_{1dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$$

$$R_{1dc} = \frac{V_{dc}}{2 \times I_{dc}} \quad (3.1)$$

$$R_s = (1.1 \sim 1.2) \times R_{1dc}$$

### 3.1.4. Boşta çalışma ve kısa devre deneylerinden faydalanarak asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin bulunması

Boşta çalışma ve kısa devre deneyleri yapılan bir asenkron motorda, aşağıda formülleri ile verilen parametreler yaklaşık olarak bulunabilir. Şekil 3.4' de bir faz yaklaşık eşdeğer devre ve kısa devre çalışma durumundaki eşdeğer devreler gösterilmiştir.



**Şekil 3.4. a) Asenkron Motorun Yaklaşık Eşdeğer Devresi b) Kısa Devre Eşdeğer Devresi**

Motora ait bir takım büyüklüklerin hesabı aşağıdaki formüllerle yapılır.

Stator demir, sürtünme ve vantilasyon kaybı;

$$P_{fe} = \frac{P_o}{3} - I_{10}^2 R_1 \quad (3.2)$$

Motorun boşta çektiği wattlı akım değeri;

$$I_w = \frac{P_{fe}}{V_1} \quad (3.3)$$

Motorun mıknatıslanma akımı;

$$I_m = \sqrt{I_{10}^2 - I_w^2} \quad (3.4)$$

Mıknatıslanma reaktansı;

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad (3.5)$$

Demir direnci;

$$R_c = \frac{V_1}{I_w} \quad (3.6)$$

Motor eşdeğer devre faz empedansı;

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (3.7)$$

Motor eşdeğer devre faz direnci;

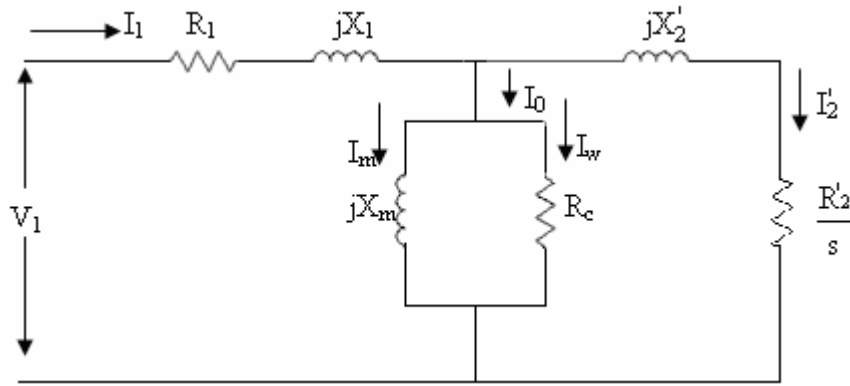
$$R_k = \frac{P_k / 3}{I_k^2} \quad (3.8)$$

Motor eşdeğer devre faz reaktansı;

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (3.9)$$

### 3.2 Asenkron Motorun Performans Analizi

Üç fazlı asenkron motorunun kararlı hal analizinin yapılmasında eşdeğer devre parametreleri, şebeke gerilimi ve frekansı ile motorun kutup sayısı ve vantilasyon kayıpları bilinirse performans karakteristikleri elde edilebilir. Şekil 4.1'de Asenkron motorun bir faz eşdeğer devresi görülmektedir[5].



Şekil 3.5. Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi

Şekil 3.5'deki eşdeğer devreye göre giriş empedansı

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_2 &= \frac{R_2'}{s} + jX_2' \\ Z_m &= \frac{jX_m * R_c}{R_c + jX_m} \\ Z_{in} &= Z_1 + \frac{Z_2 * Z_m}{Z_2 + Z_m} \end{aligned} \quad (3.10)$$

formülüyle hesaplanır. . Stator Akımı ise;

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_1}{Z_{in}} \quad (3.11)$$



formülüyle bulunur. Hesaplamalarımızda kullanılacak olan senkron hız ve açısal hız ise

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{120 \times f}{2p} \\ \omega_s &= \frac{2\pi \times n_s}{60} \end{aligned} \quad (3.12)$$

formülüyle hesaplanır. Stator akımı

$$\bar{I}'_2 = \frac{Z_m}{Z_m + \frac{R'_2}{s} + jX_2} \bar{I}_1 \quad (3.13)$$

formülüyle hesaplanır. Giriş Gücü ise

$$P_{in} = 3 * V_1 \times I_1 \times [\angle V_1 - \angle I_1] \quad (3.14)$$

formülüyle hesaplanır. Üretilen Moment ise

$$3T_d = \frac{3(I'_2)^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_s} \quad (3.15)$$

Şeklinde bulunur. Rotor hızı ise

$$\begin{aligned} n_m &= (1 - s) \times n_s \\ \omega_m &= \frac{2\pi \times n_m}{60} \end{aligned} \quad (3.16)$$

formülüyle hesaplanır. Sürtünme ve Vantilasyon kaybı

$$P_{fw} = P_{fw} \times \left( \frac{n_m}{n_s} \right)^n \quad n = 2.5 - 3 \quad (3.17)$$

formülüyle hesaplanır. Çıkış Gücü

$$P_o = 3T_d \omega_m - P_{fw} \quad (3.18)$$

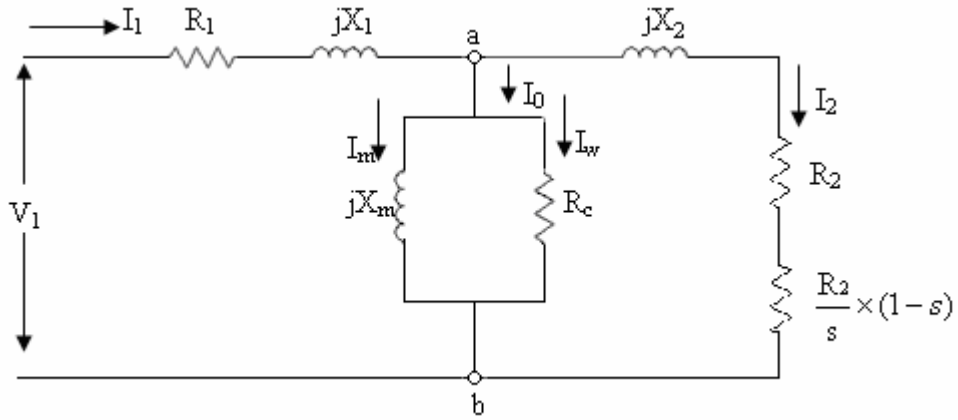
formülüyle hesaplanır. Verim

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (3.19)$$

şeklinde bulunur.

### 3.3. Asenkron Motorun Yüklenme Analizi

Üç fazlı asenkron motorunun kararlı hal analizinin önemli özellikleri arasında, akım değişimi, ve çeşitli çalışma şartlarına bağlı tork yer alır. Eşdeğer devre parametreleri, şebeke gerilimi ve frekansı ile motorun kutup sayısı ve vantilasyon kayıpları bilinirse Thevenin eşdeğer devresinin yardımıyla özel kayma değeri için performans karakteristikleri elde edilebilir. Şekil 3.6'de Asenkron motorun bir faz eşdeğer devresi görülmektedir. Burada a-b arasında Thevenin eşdeğer devresini hesaplayacak olursak;



Şekil 3.6. Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi

Şekil 3.6'deki eşdeğer devrenin Thevenin eşdeğer empedansı;

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1 + jX_1 \\
 Z_{sh} &= \frac{jX_m * R_c}{R_c + jX_m} \\
 Z_{th} &= Z_1 + Z_{sh}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

formülüyle hesaplanır. Thevenin Eşdeğer Gerilimi ise;

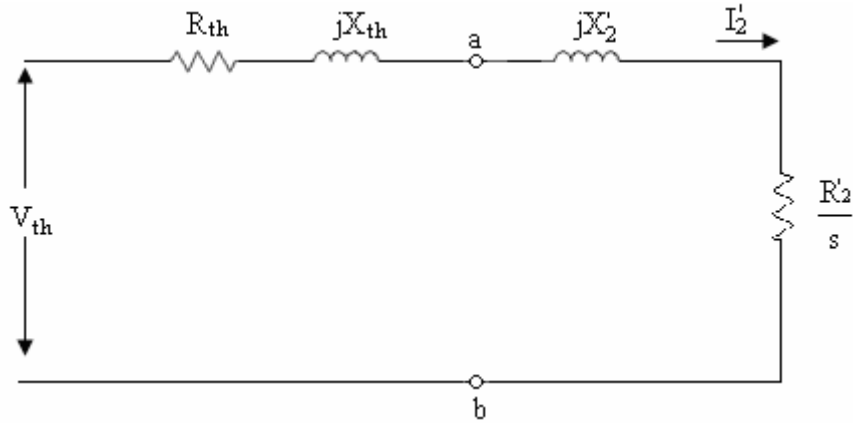
$$V_{th} = V_1 * \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_1} \tag{3.21}$$

formülüyle hesaplanır. Hesaplamalarımızda kullanılacak olan açısal hız ise;

$$N_s = \frac{120 \times f}{2p}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60}$$
(3.22)

formülüyle hesaplanır. Şekil 3.7 de Asenkron motorun Thevenin eşdeğer teoremine göre bir faz eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 3.7. Asenkron motorun Thevenin eşdeğer teoremine göre bir faz eşdeğer devresi.

Rotor akımı;

$$I_2' = \frac{V_{th}}{R_{th} + \frac{R_2'}{s} + j(Z_{th} + Z_2')}$$
(3.23)

formülüyle hesaplanır. Stator akımı ve boşta çalışma akımı ise;

$$I_1 = I_2' \frac{(Z_{sh} + Z_2)}{Z_{sh}}$$
(3.24)

$$I_0 = I_1 - I_2'$$

formülüyle hesaplanır. Hava aralığı gücü ise;

$$P_{AG} = 3R_2' |I_2'|^2$$
(3.25)

formülüyle hesaplanır. Üretilen Moment;

$$T_d = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$
(3.26)

formülüyle hesaplanır. Mil gücü;

$$P_m = (1 - s) \times P_{AG} \quad (3.27)$$

formülüyle hesaplanır. Rotor Bakır kaybı;

$$P_{cu(rotor)} = s \times P_{AG} \quad (3.28)$$

formülüyle hesaplanır. Stator Bakır kaybı;

$$P_{cu(stator)} = 3R_1 |I_1|^2 \quad (3.29)$$

formülüyle hesaplanır. Stator Nüve kaybı;

$$P_{c(stator)} = 3R_{sh} |I_0|^2 \quad (3.30)$$

formülüyle hesaplanır. Giriş Gücü;

$$P_i = P_{AG} + P_{cu(stator)} + P_{c(stator)} \quad (3.31)$$

formülüyle hesaplanır. Çıkış Gücü;

$$P_o = P_m - P_{rotor} \quad (3.32)$$

formülüyle hesaplanır. Verim;

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (3.33)$$

formülüyle hesaplanır. Devrilme kayması;

$$s_{\max T} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}} \quad (3.34)$$

formülüyle hesaplanır.

## 4. YAZILAN PROGRAMIN TANITILMASI ve ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 4.1. Programın Tanıtılması

Yazılan bilgisayar programı ile Asenkron motor tasarımı, Eşdeğer devre parametrelerini hesaplama, Performans analizi ve Yükleme analizini yapabilmektedir.



Şekil 4.1. Bilgisayar Programının Ana Giriş Sayfası

Programa girildiği zaman tasarım veya analizin kullanılacağını seçileceği bölüm gelir. Kullanıcı buradan tasarım alt programı ile hesaplamaları ve performans analizini yaptırabilir.

#### 4.1.1. Asenkron motor tasarımı alt programı

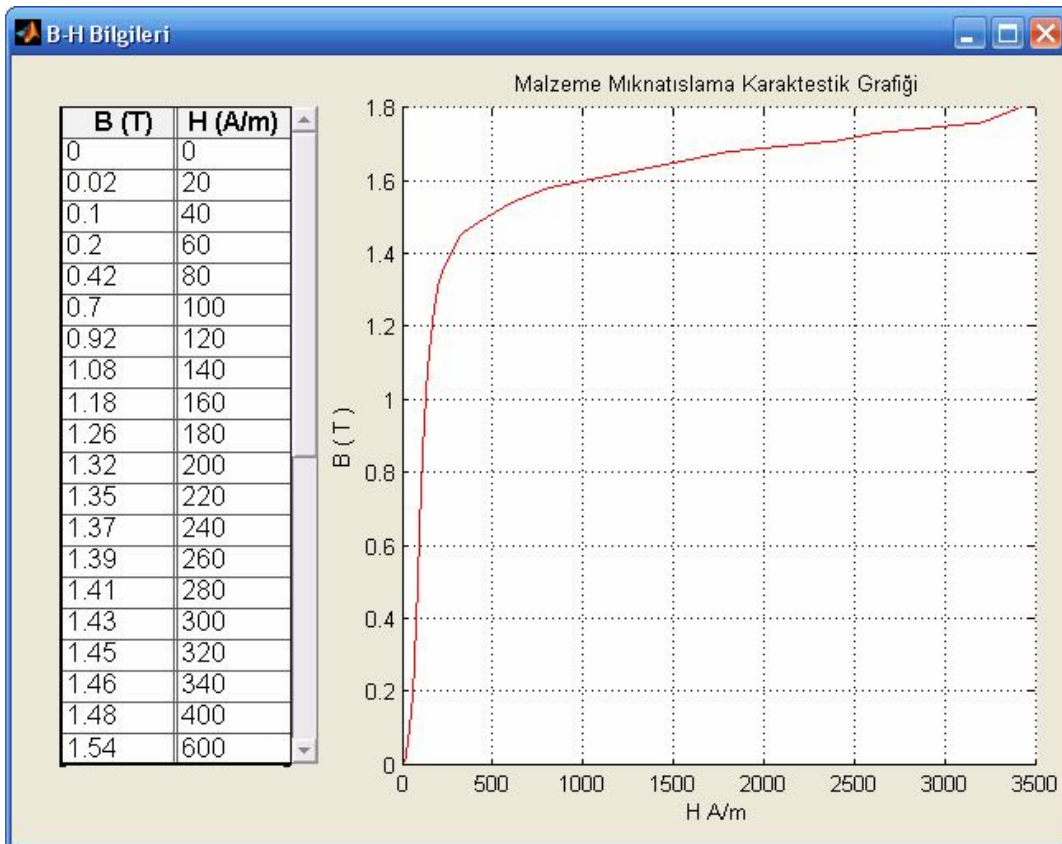
Kullanıcı Asenkron Motor Tasarımı etiketli butona bastığı zaman Şekil 4.2' deki ekran görüntüsü gelir ve burada bulunan veri giriş yerlerine asenkron motora ait etiket değerleri girilir. Bu bölüm üzerinde hesapla, dosyadan yükle, dosyaya kaydet ve temizle, çıkış, B-H dosyası seçme ve gösterme, Stator boyutları, Rotor boyutları, Eşdeğer Devre parametreleri ve Nominal çalışma değerleri ile performans grafiklerini gösterme butonları bulunmaktadır.

**Asenkron Motor Tasarımı**

Nominal Güç (kW)	3	Bobin adımında kısalma	1	Stator Boyutları
Senkron Devir Sayısı (d/d)	3000	Hava aralığı akı yoğunluğu	0.68	Rotor Boyutları
Stator Gerilimi (V)	380	Stator sargısı paralel kol sayısı	1	Eşdeğer Dev. Par.
Stator Bağlantısı	Yıldız	Stator iletkenleri akım yoğunluğu	3.49	Performans Grafikleri
Nominal Frekans (Hz)	50	Stator dış akı yoğunluğu	1.66	
Faz Sayısı	3	Rotor oluk sayısı	18	
Hedeflenen Güç Katsayısı	0.88	Rotor iletkenleri akım yoğunluğu	4	
Hedeflenen Verim	0.78	Rotor dış akı yoğunluğu	1.69	
Lambda	0.95	Rotor devir sayısı (d/d)	2844	
Esson Sabiti (c0)	108000	Mil çapı (mm)	28	
Renk Sayısı (q)	4	B-H dosyası	bh.xls	Seç Göster
Dis/Dout	0.53			

Dosyadan Yükle Hesapla Dosyaya Kaydet Temizle ÇIKIŞ

Şekil 4.2. Makina Etiket Değerleri Giriş Sayfası



Şekil 4.3. Malzemenin Miknatıslanma Karakteristik Eğrisi

Şekil 4.3 ' de asenkron motor tasarımında kullanılacak malzemeye ait mıknatıslanma eğrisi verilmiştir. Burada gösterilen değerler program içinde kullanılmaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5' deki arayüzler de ise, asenkron motorun hesaplanan stator ve rotor oluklarına ait parametre değerleri gösterilmektedir.

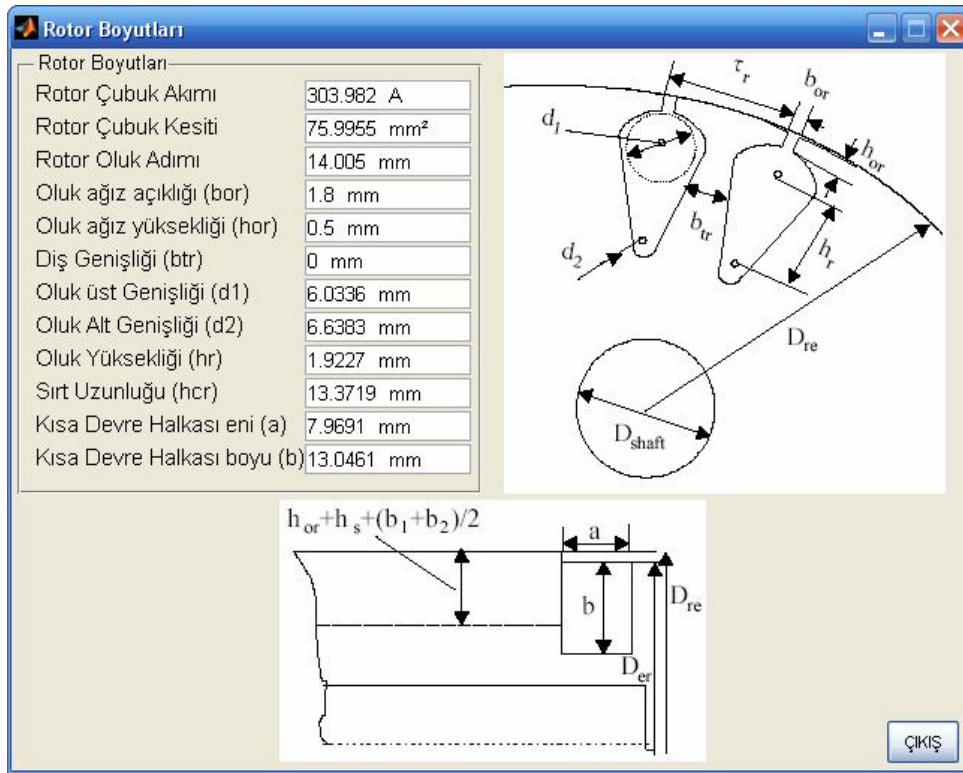
**Stator Boyutları**

Stator Ana Boyutları	
Hava Aralığı Gücü	4261.3636 VA
Stator İç Çapı	80.8668 mm
Stator Boyu	120.6741 mm
Stator Kutup Adımı	127.0253 mm
Stator Oluk Adımı	10.5854 mm
Stator Dış Çapı	152.5789 mm
Hava Aralığı Uzunluğu	0.31191 mm
Stator Oluk Sayısı	24
Oluk Adımı	15 derece
Sargı Dağıtım Katsayısı	0.95766
Bobin Adım Katsayısı	0.99144
Sargı Katsayısı	0.94947
Stator Akı Yoğunluğu	0.0077134 Wb
Faz Başına Sarım Sayısı	164.4594
Her Oluktaki İletken Sayısı	40
Yeni Sarım Sayısı	160
Stator Akımı	6.6405 A
Stator İletkeni Kesit Alanı	1.9027 mm <sup>2</sup>
Stator İletken Çapı	0 X 1.35

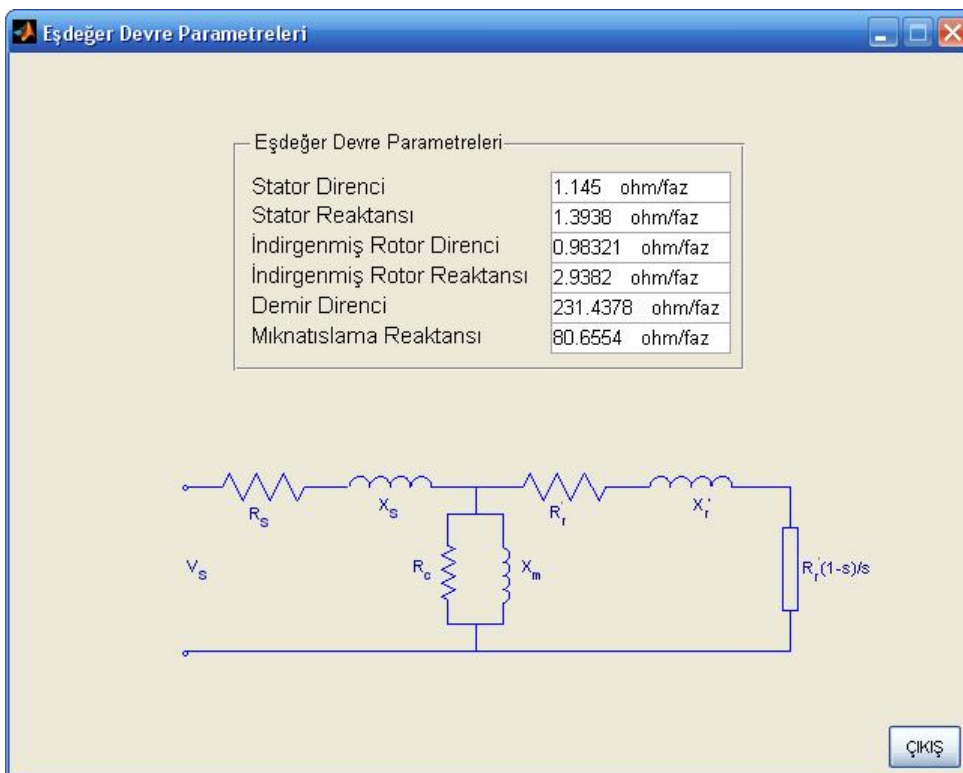
Oluk Boyutları	
Stator Oluğu Kesit Alanı	143.1388 mm <sup>2</sup>
Oluk Ağız Açıklığı (bos)	2.5 mm
Oluk Ağız Yüksekliği (hos)	1 mm
Oluk Kama Yüksekliği (hw)	1 mm
Dış Genişliği (bts)	4.6428 mm
Oluk Alt Genişliği (bs1)	6.4663 mm
Oluk Üst Genişliği (bs2)	10.8255 mm
Oluk Yüksekliği (hs)	15.6209 mm
Sırt Uzunluğu (hcs)	18.2352 mm

ÇIKIŞ

**Şekil 4.4.** Tasarım Sonucu Elde Edilen Stator Boyutlarını Gösteren Arayüz



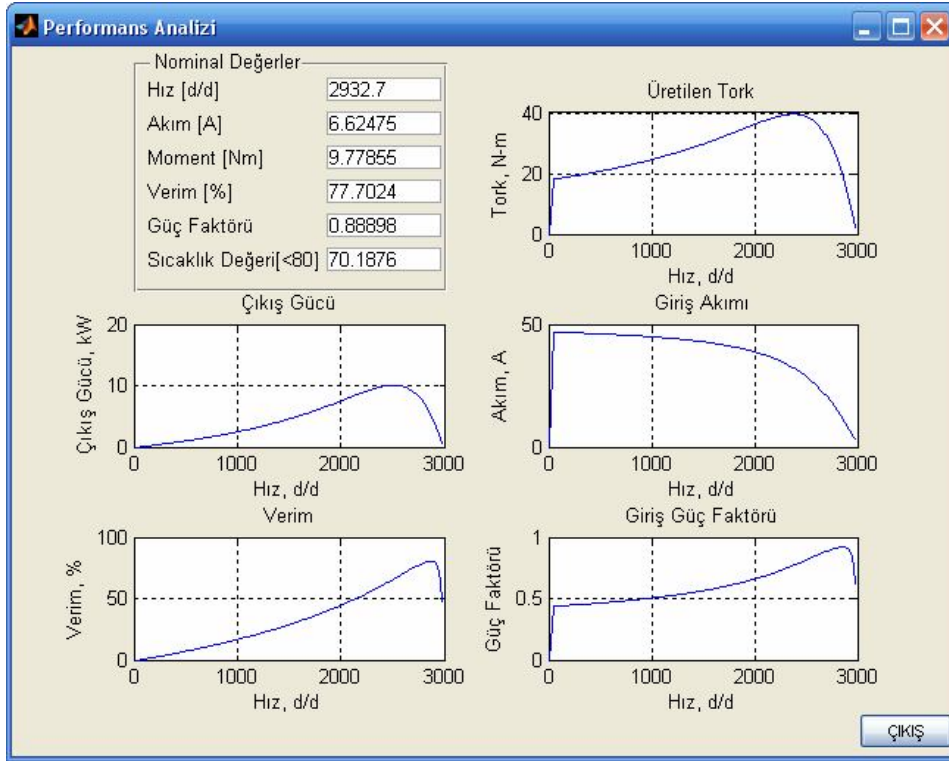
Şekil 4.5. Tasarım Sonucu Elde Edilen Rotor Boyutlarını Gösteren Arayüz



Şekil 4.6. Tasarım Sonucu Elde Edilen Eşdeğer Devre Parametrelerini Gösteren Arayüz



Şekil 4.6' da tasarımı yapılan motora ait hesaplanan eşdeğer devre parametrelerini gösteren arayüzdür. Bu sayfada  $R_s$ ,  $R'_r$ ,  $X_s$ ,  $X'_r$ ,  $X_m$ ,  $R_c$  parametre değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.7' de ise elde edilmiş olan performans grafikleri ve nominal işletme noktalarının bulunduğu arayüz görünmektedir.



Şekil 4.7. Tasarım sonucu Elde Edilen Performans Analiz Grafiklerini Gösteren Arayüz

#### 4.1.2 Eşdeğer devre parametreleri hesaplama programı

Şekil 4.8' de ise kararlı hal analizi ile Asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerini hesaplamasının yapıldığı arayüz gösterilmektedir. Buradaki veri giriş kısmına asenkron motorun boşa çalışma ve kısa devre deneylerinden elde edilen veriler girilerek hesaplama yapılır.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Frekans (Hz)	60	Stator Direnci	0.2268 ohm/faz
Kutup Sayısı	4	İndirgenmiş Rotor Direnci	0.12528 ohm/faz
Motor Sınıfı	B	Stator Reaktansı	0.51252 ohm/faz
DC Gerilim (V)	10.8	İndirgenmiş Rotor Reaktansı	0.76878 ohm/faz
DC Akım (A)	25	Demir Direnci	185.1017 ohm/faz
Kısa Devre Gerilimi (V)	22.26	Miknatıslama Reaktansı	9.8554 ohm/faz
Kısa Devre Akımı (A)	27		
Kısa Devre Gücü (W)	770		
Kısa Devre Frekansı (Hz)	15		
Boşta Çalışma Gerilimi (V)	230		
Boşta Çalışma Akımı (A)	12.9		
Boşta Çalışma Gücü (W)	791		
Boşta Çalışma Devir Sayısı (d/d)	1798		

Şekil 4.8. Asenkron Motor Eşdeğer Devre Parametrelerini Hesaplama Arayüzü

#### 4.1.3 Performans analizi programı

Şekil 4.9'daki veri giriş arayüzüne gerekli veriler girilip hesapla butonuna basıldığında şekil 4.10 da görülen Giriş gücü, Giriş güç faktörü, Üretilen moment, Çıkış gücü, Verim ve Stator akımının hıza bağlı grafiklerinin olduğu arayüz açılır. Bu arayüzde bulunan herhangi bir grafiğin üzerine tıklandığında yeni sayfada bu grafiği açar. Açılan bu sayfada grafikler daha ayrıntılı incelenebilir ve istenirse Dosyaya Kaydet butonu kullanılarak grafikler jpeg dosyası olarak kaydedilebilir. Şekil 4.11'de Moment – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz, Şekil 4.12'de Çıkış Gücü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz, Şekil 4.13'de Stator Akımı – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz, Şekil 4.14'de Verim – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz, Şekil 4.15'e Giriş Gücü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz ve Şekil 4.16'da Giriş Güç Faktörü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz verilmiştir.

**Asenkron Motor Performans Analiz Programı**

**Asenkron Motor Performans Analizi**

Stator Gerilimi  $V_s1$  (V) =  Frekans,  $f$  (Hz) =  Kutup Sayısı,  $p$  =

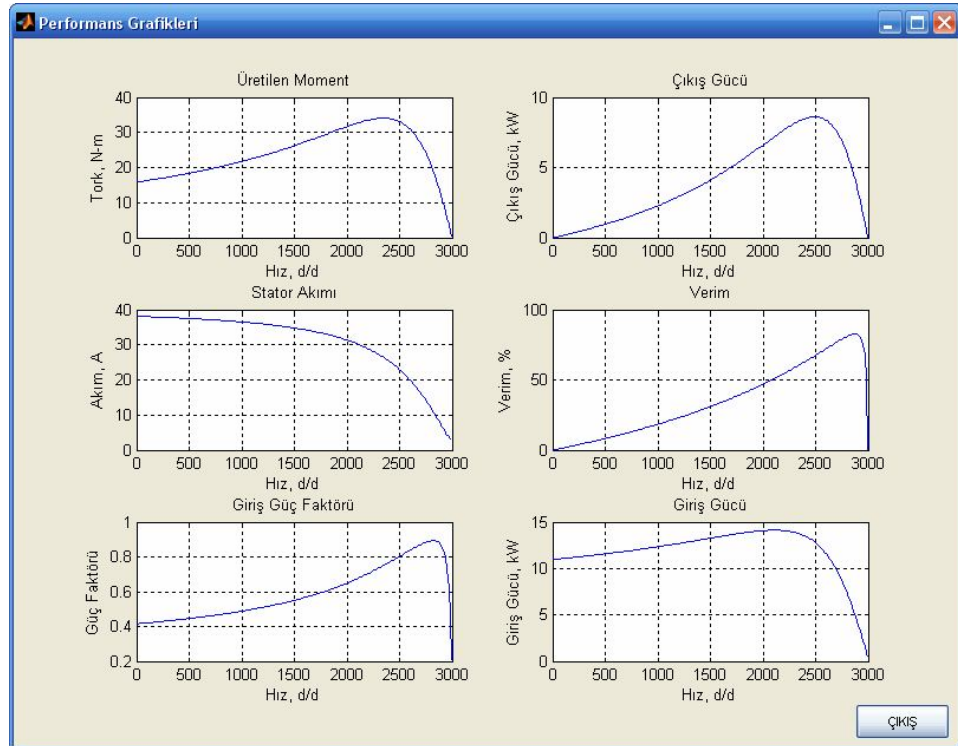
Vantilasyon ve Sürtünme Kaybı, (W) =

$R_1$  =   $X_1$  =   $R_2$  =   $X_2$  =

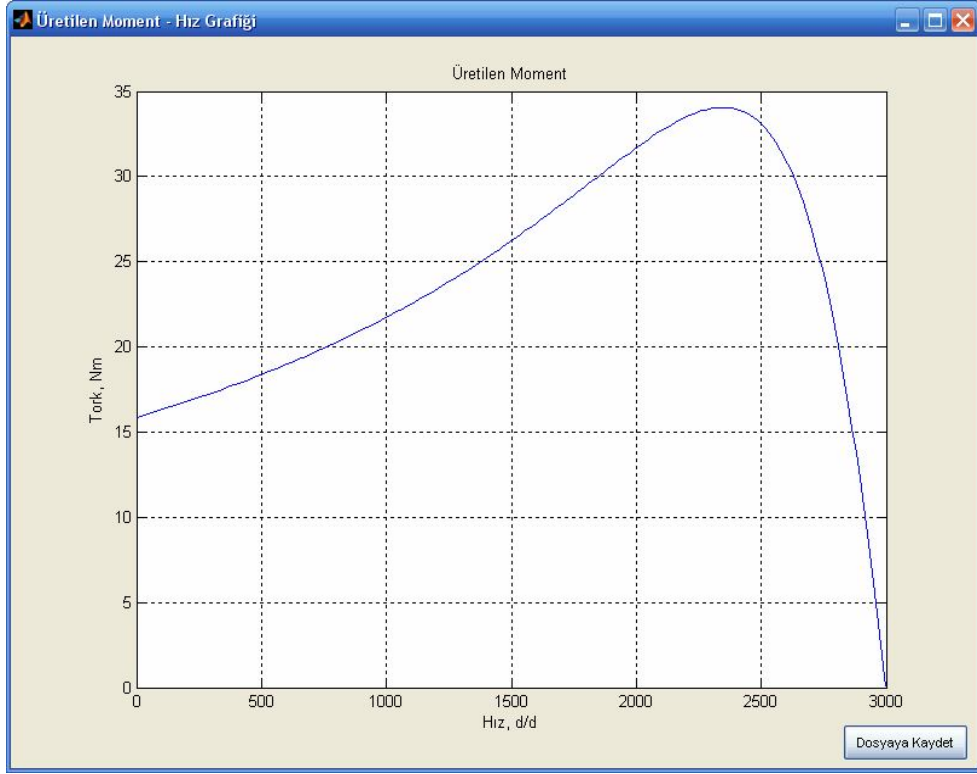
$V_{i\phi}$  =   $R_c$  =   $X_m$  =   $R_2(1-s)/s$

**Dosyadan Yükle** **Hesapla** **Temizle** **Dosyaya Kaydet** **Çıkış**

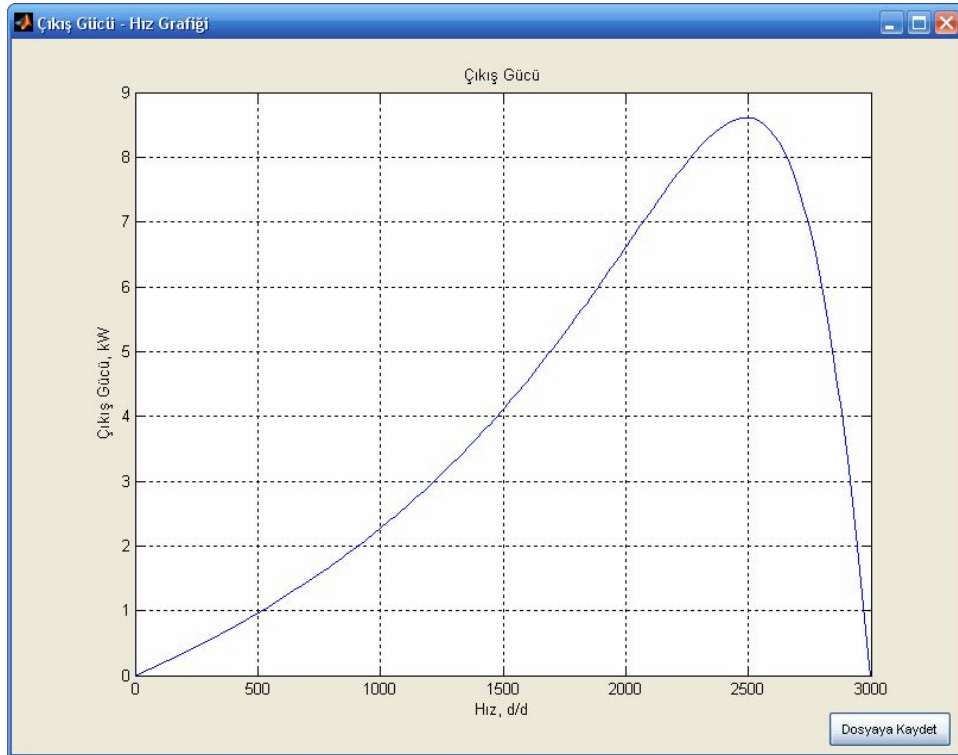
**Şekil 4.9.** Asenkron Motor Performans Analizi Veri Giriş Arayüzü



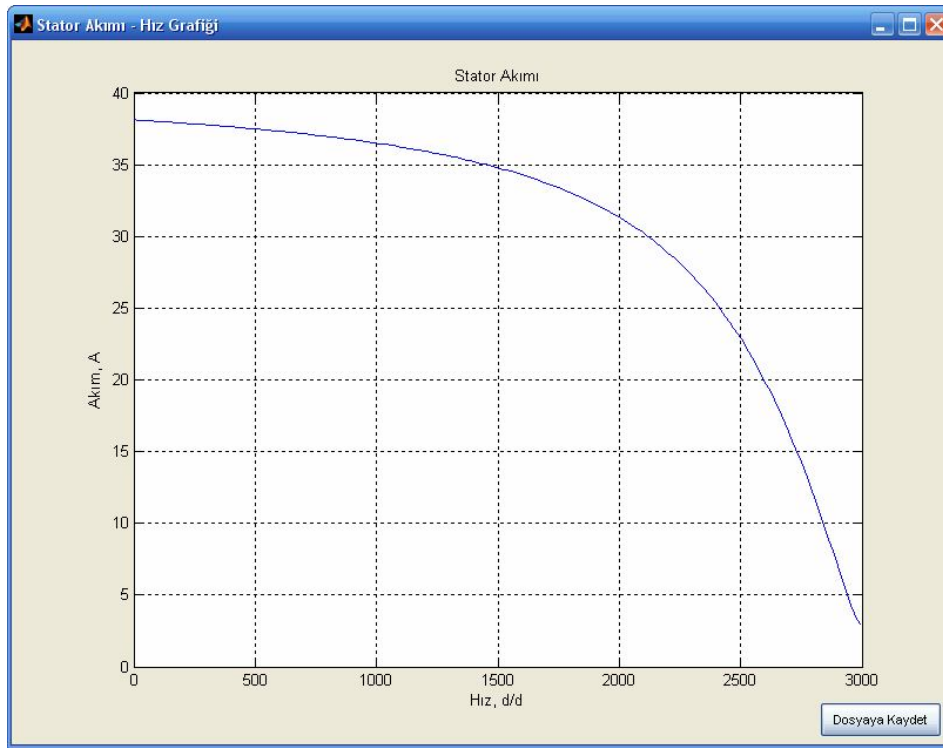
**Şekil 4.10.** Hesaplanan Performans Grafiklerinin Gösterildiği Arayüz



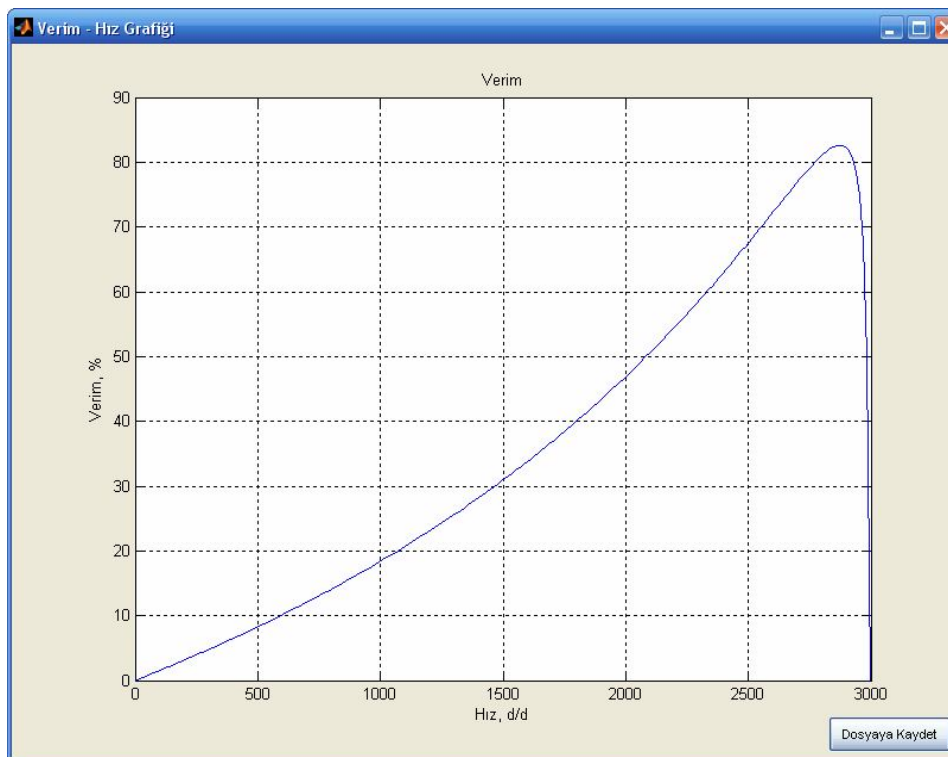
Şekil 4.11. Moment – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz



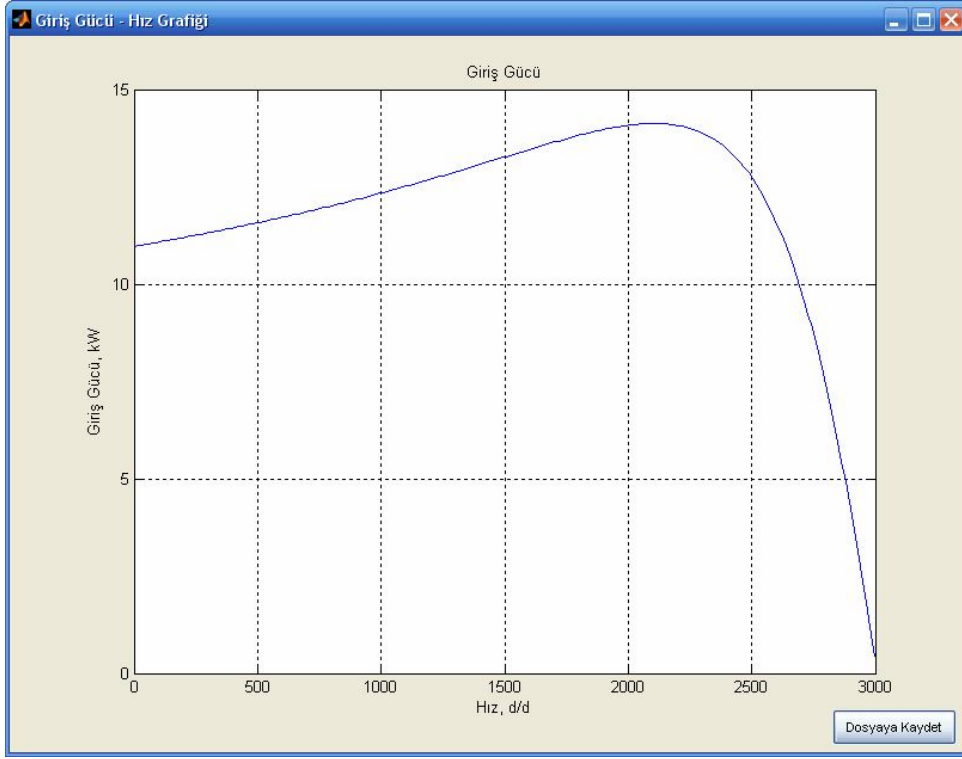
Şekil 4.12. Çıkış Gücü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz



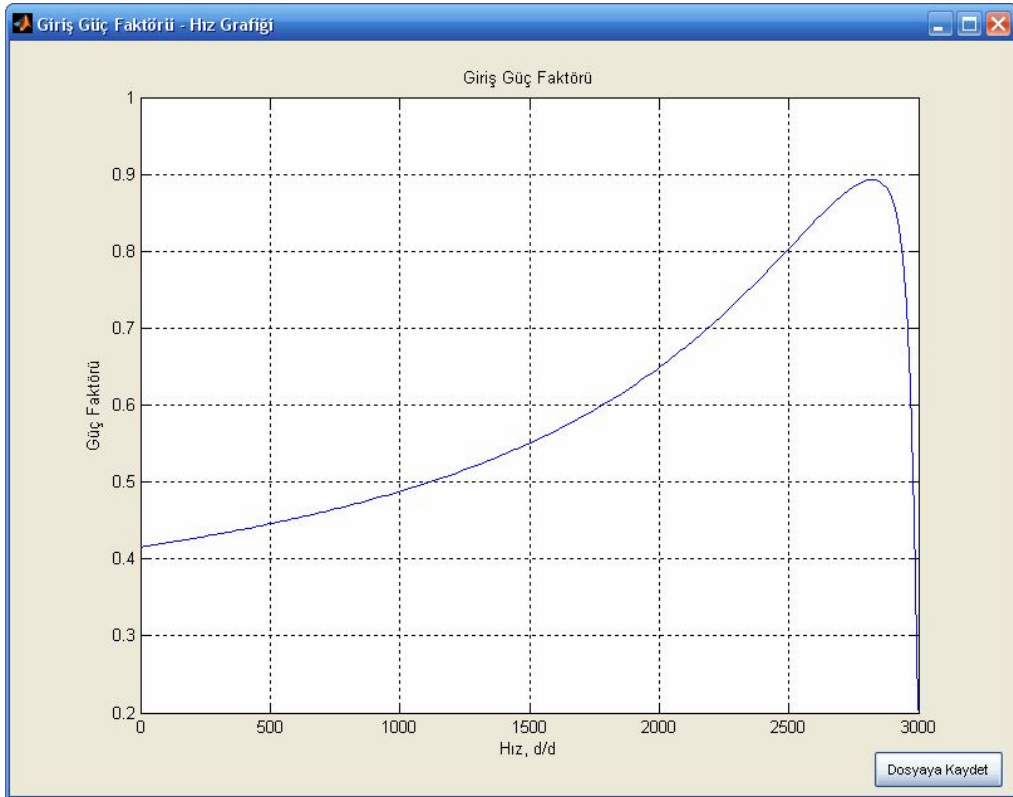
Şekil 4.13. Stator Akımı – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz



Şekil 4.14. Verim – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz



Şekil 4.15. Giriş Gücü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz



Şekil 4.16. Giriş Güç Faktörü – Hız Grafiğinin Gösterildiği Arayüz

#### 4.1.4 Yükleme analizi programı

Şekil 4.17'deki veri giriş arayüzüne gerekli veriler girilip hesaplama butonuna basıldığında şekil 4.18'de görülen Thevenin eşdeğer devresini kullanarak Giriş gücü, Üretilen moment, Çıkış gücü, Verim vb. büyüklüklerin gösterildiği ve Thevenin Eşdeğer devresi ile Üretilen Moment-Hız grafiğinin olduğu arayüz açılır.

**Yükleme Analizi Programı**

**Üç Fazlı Asekron Motor Performans Karakteristiği**

Stator Gerilimi (V) = 400      Frekans (Hz) = 50      Kutup Sayısı = 2

Ventilasyon ve Sürtünme Kaybı (W) = 90      Kayma p.u. = 0.0285

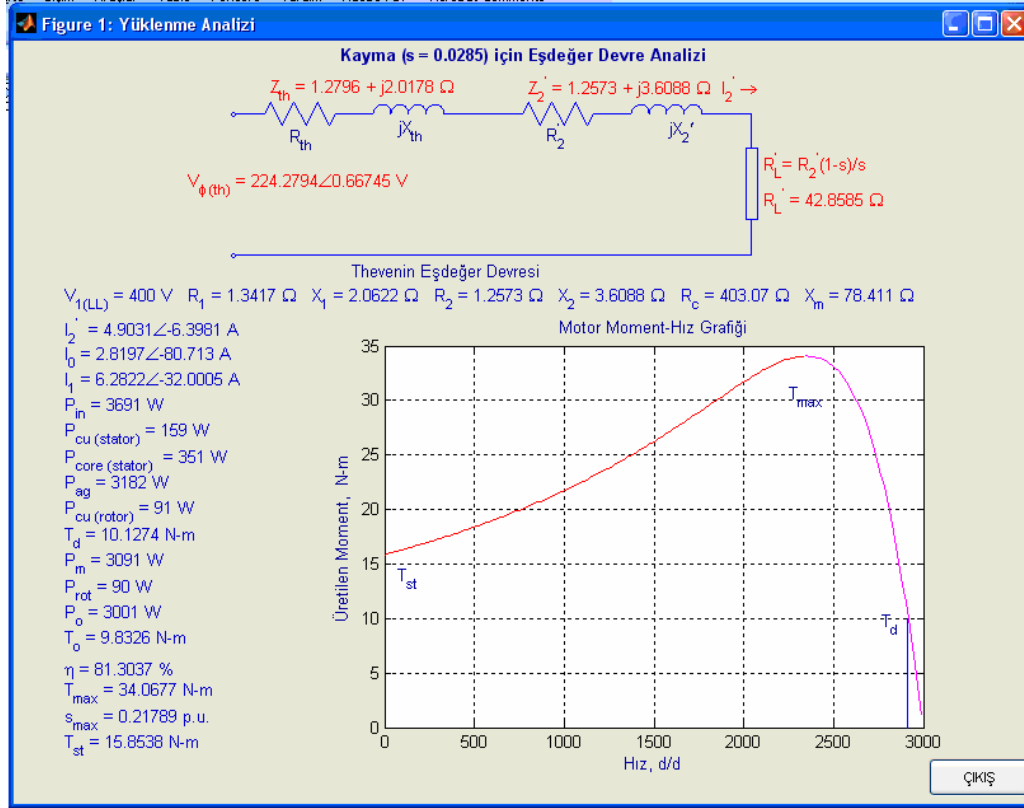
$R_1 = 1.3417$      $X_1 = 2.0622$      $R_2 = 1.2573$      $X_2 = 3.6088$

$V_{1\phi} =$        $R_c = 403.07$        $X_m = 78.411$        $R_2(1-s)/s$

Dosyadan Yükle    Hesapla    Temizle    Dosyaya Kaydet    Bilgi    Çıkış

Şekil 4.17. Yükleme Analizi Veri Giriş Arayüzü





Şekil 4.18. Yükleme Analizi Sonuçlarının Gösterildiği Arayüzü

#### 4.2. Programdan Elde Edilen Sonuçlar

Tasarım altprogramın denenmesi için güçleri 3 ve 5.5 olan 2 adet üç fazlı sincap kafesli asenkron motor seçilmiştir. Asenkron motorların etiket değerleri ve program için gerekli olan veriler Çizelge 4.1' de verilmiştir. İki motorunda stator ve rotor oluk geometrileri için yuvarlak oluk geometrisi kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan bu iki motorun frekans, gerilim ve kutup sayısı değerleri birbirinden farklıdır.



Çizelge 4.1 Motor Etiket Değerleri

Motor Parametreleri		Motor 1	Motor 2
Nominal Güç	[kW]	3	5,5
Stator Gerilimi	[Volt]	380	460
Bağlantı Şekli		Yıldız	Yıldız
Frekans	[Hz]	50	60
Faz Sayısı		3	3
Güç Katsayısı		0.88	0.83
Verim		0.78	0.89
Senkron Devir Sayısı	[d/d]	3000	1800
Rotor Devir Sayısı	[d/d]	2844	1764
Stator Oluk Sayısı		24	36
Rotor Oluk Sayısı		18	28
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	[Tesla]	0.68	0.726
Stator Dış Akı Yoğunluğu	[Tesla]	1.66	1.45
Rotor Dış Akı Yoğunluğu	[Tesla]	1.69	1.6
Stator İletkenleri Akım Yoğunluğu	[A/mm <sup>2</sup> ]	3.49	4.35
Rotor İletkenleri Akım Yoğunluğu	[A/mm <sup>2</sup> ]	4.0	4.0
Mil Çapı	[mm]	28	35
Stator Oluk Geometrisi		<i>Yuvarlak</i>	<i>Yuvarlak</i>
Rotor Oluk Geometrisi		<i>Yuvarlak</i>	<i>Yuvarlak</i>

Çizelge 4.2 3 kW' lık Motor İçin Konstrüksiyon Değerleri

Parametre	Sembol	Motor 1	
		Hesaplanan	Ölçülen
Stator iç çap[mm]	$D_{is}$	<b>80,86</b>	80
Stator dış çap[mm]	$D_{out}$	<b>152,58</b>	150
Hava aralığı uzunluğu[mm]	$g$	<b>0,31</b>	0,3
St. akı yoğunluğu[Weber]	$aki$	<b>0,00771</b>	0,0081
Her olukta iletken sayısı[sipir]	$o_{ss}$	<b>40</b>	42
İletken kesiti[mm <sup>2</sup> ]	$d_{co}$	<b>1,35</b>	0,93
St. oluk alanı[mm <sup>2</sup> ]	$a_{su}$	<b>143,14</b>	120
St. oluk ağız açıklığı[mm]	$b_{os}$	<b>2,5</b>	2,5
St. oluk ağız yüksekliği[mm]	$h_{os}$	<b>0,5</b>	0,52
St. oluk kama yüksekliği[mm]	$h_w$	<b>1</b>	1
St. dış genişliği[mm]	$b_{ts}$	<b>4,64</b>	4,84
St. oluk alt genişliği[mm]	$b_{s1}$	<b>6,46</b>	6,5
St. oluk üst genişliği[mm]	$b_{s2}$	<b>10,82</b>	9,88
St. oluk yüksekliği[mm]	$h_s$	<b>15,62</b>	15
St. sırt uzunluğu[mm]	$h_{cs}$	<b>18,23</b>	20
Rt. Oluk ağız açıklığı[mm]	$b_{or}$	<b>1,8</b>	1,8
Rt. Oluk ağız yüksekliği[mm]	$h_{or}$	<b>0,5</b>	0,5
Rt. dış genişliği[mm]	$b_{tr}$	<b>6,03</b>	6,1
Rt. Oluk üst genişliği[mm]	$d_1$	<b>6,63</b>	6,6
Rt. Oluk alt genişliği[mm]	$d_2$	<b>1,92</b>	2,2
Rt. Oluk yüksekliği[mm]	$h_r$	<b>13,37</b>	13,5
Rt. sırt uzunluğu[mm]	$h_{cr}$	<b>7,96</b>	6,8

**Çizelge 4.3** 5.5 kW'lık Motor İçin Konstrüksiyon Değerleri

Parametre	Sembol	Motor 2	
		Hesap	Ölçülen
Stator iç çap[mm]	$D_{is}$	<b>111,4</b>	111,6
Stator dış çap[mm]	$D_{out}$	<b>179,67</b>	180
Hava aralığı uzunluğu[mm]	$g$	<b>0,34</b>	0,35
St. akı yoğunluğu[Weber]	$aki$	<b>0,00616</b>	0,00587
Her olukta iletken sayısı[sipir]	$o_{ss}$	<b>36</b>	32
İletken kesiti[mm <sup>2</sup> ]	$d_{co}$	<b>1,4</b>	1,6
St. oluk alanı[mm <sup>2</sup> ]	$a_{su}$	<b>138,54</b>	155
St. oluk ağız açıklığı[mm]	$b_{os}$	<b>2,2</b>	2,2
St. oluk ağız yüksekliği[mm]	$h_{os}$	<b>1</b>	1
St. oluk kama yüksekliği[mm]	$h_w$	<b>1</b>	1
St. dış genişliği[mm]	$b_{is}$	<b>5,1</b>	4,75
St. oluk alt genişliği[mm]	$b_{s1}$	<b>4,97</b>	5,42
St. oluk üst genişliği[mm]	$b_{s2}$	<b>8,55</b>	9,16
St. oluk yüksekliği[mm]	$h_s$	<b>19,57</b>	21
St. sırt uzunluğu[mm]	$h_{es}$	<b>12,57</b>	10,35
Rt. oluk ağız açıklığı[mm]	$b_{or}$	<b>1,5</b>	1,5
Rt. oluk ağız yüksekliği[mm]	$h_{or}$	<b>0,5</b>	0,5
Rt. dış genişliği[mm]	$b_{tr}$	<b>1</b>	1
Rt. oluk üst genişliği[mm]	$d_1$	<b>1</b>	1
Rt. oluk alt genişliği[mm]	$d_2$	<b>5,9</b>	5,88
Rt. oluk yüksekliği[mm]	$h_r$	<b>5,76</b>	5,7
Rt. sırt uzunluğu[mm]	$h_{cr}$	<b>1,66</b>	1,3

İki motor için de elde edilmiş olan konstrüksiyon parametreleri Çizelge 4.2, ve Çizelge 4.3' de verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta döner motorlar için büyük önem taşıyan hava aralığı uzunluğu değerinin iki motor için de, ölçülen değerlere çok yakın olmasıdır. Bu sonuç ise motorlarda stator, rotor ve nüve üzerinde düzgün bir manyetik akı dağılımının oluşmasını ve motor tasarımının daha doğru sonuçlar vermesini sağlar. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3' deki motorların diğer boyut parametreleri incelendiğinde de değerlerin birbirini desteklediği görülür. Özellikle motor dış ve iç çap değerleri ile motor kayıplarındaki etkisi büyük olan stator oluklarına yerleştirilecek olan sipir sayılarının ölçülen değerlere oldukça

yakın olduğu görülür. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 3 kW'lık birinci motor için toplam hata oranı % 4.54 ve 5.5 kW'lık ikinci motor için % 5.45 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin komple bir motor tasarımında yapılan hatalar olduğu düşünülürse elde edilen hataların oldukça küçük olduğu görülür.

**Çizelge 4.4.** Motorların Nominal İşletme Karakteristik Değerleri

Motor Gücü [kW]	3		5.5	
	Ölçüm	Hesaplanan	Ölçüm	Hesaplanan
İşletme Karakteristikleri ve Eşdeğer Devre Paramet.				
Nominal Akım[A]	<b>6.64</b>	6.62	<b>9.3</b>	9.68
Nominal Moment[Nm]	<b>10.1</b>	9.47	<b>30.5</b>	30.2
Verim[%]	<b>78</b>	77.7	<b>89.5</b>	87.91
Cosφ	<b>0.88</b>	0.888	<b>0.83</b>	0.838
Devir Sayısı[d/d]	<b>2844</b>	2932	<b>1764</b>	1742
Sıcaklık[°C]	<b>&lt;80</b>	70.18	<b>&lt;80</b>	73.16
Stator Direnci[Ω]	<b>1.352</b>	1.145	<b>0.936</b>	1.086
Rotor Direnci[Ω]	<b>0.983</b>	0.983	<b>1.12</b>	1.56
St. Kaçak Reaktansı[Ω]	<b>2.03</b>	1.4	<b>1.625</b>	1.834
Rt. Kaçak Reaktansı[Ω]	<b>2.61</b>	2.93	<b>3.93</b>	3.27
Mıknatıslanma Reakt. [Ω]	<b>68.26</b>	80.65	<b>67.3</b>	61.5
Demir Direnci [Ω]	<b>240.7</b>	231.4	<b>565</b>	601.7

Her iki motorun da işletme karakteristik değerlerinin ve eşdeğer devre parametrelerinin bulunduğu Çizelge 4.4' deki elde edilen değerler ile deneylerden elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülür. Özellikle motor için önem taşıyan nominal moment ve nominal akım değerlerinin deney yolu ile elde edilenler ile yaklaşık aynı değerde olduğu görülür. Küçük de olsa oluşan bu farklılıklar okuma hatalarından, kullanılan aletlerin % lik hata dilimlerinden, virgülden sonraki rakamların yuvarlanması vb durumlardan meydana gelmektedir.

Eşdeğer Devre Parametreleri altprogramıyla asenkron motorun boştaki çalışma, kısadevre deneyleri ve stator direnci deneyleri ve sürtünme kayıpları bilinen herhangi bir motorun eşdeğer devre parametreleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Performans analizi altprogramı ile eşdeğer devre parametreleri ve şebeke ile ilgili bilgilerin ışığında motor üzerinde oluşan performans değerleri hesaplanarak grafikleri çizdirilmektedir. Yüklenme analizi altprogramı ile eşdeğer

devre parametreleri ve Şebeke ile ilgili bilgilerin ışığında performans analizi altprogramından farklı olarak istenilen herhangi bir kayma değerine göre motor üzerinde oluşan büyüklüklerin hesaplamaları yapılmakta hata olması halinde kullanıcı bilgilendirilmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Asenkron makinaların işletme kolaylığının ve kontrollerinin basit olmasının yanında, stator ve rotor oluk geometrileri bakımından aslında karmaşık yapıya sahip makinalardır. Sanayide yaygın kullanılmaları sebebiyle tasarımlarının maksimum verim ve en iyi güç faktöründe çalışacak şekilde yapılması gerekir.

Yazılan tasarım programında, tasarımı yapılacak motorun nominal çalışma noktasına ait değerlerin (Etiket Değerleri) ve makineye ait belli başlı parametreler ile (Akı ve akım yoğunlukları, istenen rotor oluk geometrisi, paralel kol sayısı vb.) kullanılacak malzemelere ait mıknatıslama bilgilerinin girilmesi ile tasarıma başlanmaktadır. Kullanılan malzemelere ait mıknatıslama eğrilerinden gerçek değerlerin alınması tasarım sonuçlarının uygunluğuna etki eden en önemli faktördür. Çeşitli bölgelerde (stator + rotor dişleri vb.) oluşacak akı yoğunluklarının ve magnetomotor kuvvet değerlerinin sürekli kontrolü yapılarak boyutların istenen değerlere yaklaşması sağlanmıştır.

Elde edilen boyutların sağlanması makineye ait işletme karakteristiklerinin ve nominal çalışma noktasına ait değerlerin hesaplanmasıyla yapılmıştır. Aynı zamanda imal edilmiş motorlara ait değerlerle de karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar gerçek motorların değerleriyle oldukça yakındır.

Analiz programlarında ise boşta çalışma ve kısa devre çalışma deneylerinden motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması ve eşdeğer devre parametreleri bilinen motorların performans analizinin yapılabildiği ve istenilen kayma değerine göre motorun Thevenin eşdeğer devresi yardımıyla performans analizinin yapılabildiği analiz programlarıyla kolay analiz yapılabilmesi sağlanmıştır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Akman O. Ürkmez A.,2005, Asenkron Motor Tasarımının Bilgisayar Programı İle Gerçekleştirilmesi, Makina Tek Dergisi
- [2] Önel İ.Y., 2005,Üç Fazlı Asenkron Motorlarda Rulman Arızalarını Tespit Etmek Üzere X – Y Dönüşümü Ve RTFA Yapay Sinir Ağı Algoritması İçeren Yeni Bir Yöntemin Tasarlanması Ve Uygulanması, Yüksek Lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,98 s
- [3] Çetin İ., 1993, Asenkron Makina Problemleri (Çözümlü), 1. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi, s 192.
- [4] Sarıyıldız, M., 2001, Asenkron motorlar, Lisans tezi Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 43 s, (yayımlanmamış).
- [5] Cathey, J., J., 2001, Electric machines analysis and design applying matlab, Mc Graw-Hill, p 317-420.
- [6] Yetgin A.G., 2004 , Üç fazlı asenkron makina tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, Yüksek Lisans tezi,Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s
- [7] Boldea I., S., A., Nasar, 2002, The İnduction Machine Handbook, CRC Pres LLC, Washington, D.C., pp 133-159
- [8] Çanakoğlu, A., İ., Yetgin, A., G., 2003, Asenkron makinalarda oluk kaçak endüktanslarının hesaplanması, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Eylül, Sayı 4, s175-185, Kütahya.
- [9] Çanakoğlu A. İ., Asenkron motorlar, 2003, Ders notu Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, s 55, (yayımlanmamış)
- [10] Çolak, İ, 2001,"Asenkron Motorlar", *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 141-159
- [11] Chapman, J., 1991, Electric Machinery Fundamentals, Mc Graw-Hill, Second Edition, Singapore, p 384-427.
- [12] Gürdal O., 2001, Elektrik Makinalarının Tasarımı, Atlas Yayın Dağıtım, 1. Baskı, İstanbul,s 97-158
- [13] Saçkan, A., H., 1996, Elektrik Makinaları 3, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, s 246
- [14] Bayraktar U. ,2005, Üç Fazlı Asenkron Motor Deneylerinin Eğitim Amaçlı Benzetimi, Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 122 s
- [15] Uzunoğlu M, Kızıl A , Her Yönü İle MATLAB, 2003, Seçkin Dağıtım
- [16] Boduroğlu T., 1994,.Elektrik Makineleri Dersleri, Cilt 2, Kısım 3, İstanbul

### **KAYNAKLAR DİZİNİ(Devam)**

- [17] P. Marchand, O. T. Holland,2003, Graphics and GUIs with MATLAB, Chapman & Hall/CRC Pres
- [18] Arifođlu U., 2005, Matlab 7.04 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları, Alfa Yayınları,s1088
- [19] [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)



**EK.1 ASENKRON MOTORUN STATOR SARGILARINDA KULLANILAN TEL KESİTLERİ**

<b>Çıplak tel (mm)</b>	<b>Yalıtılmış (mm)</b>	<b>Çıplak tel (mm)</b>	<b>Yalıtılmış (mm)</b>
0,040	0,054	1,250	1,351
0,045	0,061	1,300	1,403
0,050	0,068	1,400	1,506
0,056	0,075	1,500	1,608
0,063	0,085	1,600	1,711
0,071	0,095	1,700	1,813
0,080	0,105	1,800	1,916
0,090	0,117	1,900	2,018
0,100	0,129	2,000	2,120
0,112	0,143	2,100	2,223
0,125	0,159	2,120	2,243
0,140	0,176	2,200	2,326
0,160	0,199	2,240	2,366
0,180	0,22	2,300	2,428
0,200	0,245	2,360	2,488
0,224	0,272	2,400	2,528
0,240	0,288	2,500	2,631
0,250	0,301	2,600	2,734
0,270	0,324	2,650	2,784
0,280	0,334	2,700	2,834
0,315	0,371	2,800	2,938
0,355	0,414	2,900	3,038
0,400	0,462	3,000	3,142
0,450	0,516	3,150	3,294
0,500	0,569	3,200	3,344
0,560	0,632	3,350	3,498
0,630	0,706	3,400	3,584
0,710	0,790	3,550	3,702
0,750	0,832	3,600	3,748
0,800	0,885	3,750	3,905
0,850	0,937	3,800	3,955
0,900	0,990	4,000	4,160
0,950	1,041	4,200	4,364
1,000	1,093	4,250	4,414
1,050	1,143	4,400	4,568
1,100	1,196	4,500	4,668
1,120	1,217	4,600	4,768
1,150	1,247	4,750	4,923
1,180	1,279	4,800	4,973
1,200	1,300	5,000	5,177