

RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

Seyfullah UĞUZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2005

ANKARA

Seyfullah UĞUZ tarafından hazırlanan RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ**(Yüksek Lisans Tezi)****Seyfullah UĞUZ****GAZİ ÜNİVERSİTESİ****FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****Ekim 2005****ÖZET**

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi, çevreyi kirleten fosil kökenli yakıtların tükenme eğilimine girmesi ile daha da önem kazanmış ve bu konudaki çalışmalara da hız verilmiştir. Ayrıca İklim değişikliğine neden olan sera gazlarının 1997 yılı Kyoto Protokolü ile azaltmak için çalışmalara hız verilmiştir. Önemi gittikçe artan rüzgar enerjisi konusunda dünyadaki son 15 yıldaki gelişmeler maliyetleri % 50 oranında azaltmıştır. Ülkemizde de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanununun çıkması ile bu konudaki çalışmalar hız kazanacaktır. Rüzgar enerjisi ile elektrik üretmede avantajlarından dolayı sabit mıknatıslı makinelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada, bir evin ihtiyacını karşılayacak kadar elektrik üretmek amacıyla sabit mıknatıslı bir rüzgar türbini imal edilmesi hedeflenmiştir. Üç kanatlı, yatay eksenli, direk jeneratöre bağlı, eksenel akılı, sabit neodyum mıknatıslı ve çıkışta doğrultucu devresi olan rüzgar türbini tasarlanarak imalatı yapılmıştır. Çıkış güç değerleri kaydedilerek, sabit mıknatıslı makinelerin yapıları araştırılmıştır. İstenilen güç değeri elde edilerek verimin nasıl artırılabilceği görülmüştür.

Bilim Kodu : 608.01.05**Anahtar Kelimeler : Rüzgar Türbini, Yenilenebilir Enerji, Sabit Mıknatıslı Endüksiyon Jeneratör****Sayfa Adedi : 147****Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Fadıl ÇELİKKOL**

GENERATION OF ELECTRICITY USING WIND TURBINES**(M.Sc. Thesis)****Seyfullah UĞUZ****GAZI UNIVERSITY****INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY****October 2005****ABSTRACT**

Wind energy, one of the renewable energy sources is becoming important because of the diminished fossil fuel reserves. In recent years the use and the development of the wind energy has grown up extensively. After 1977 Kyoto protocol, the developed countries reduced the energy obtained through the use of fossil fuels and the gasses produced that caused intense climatic changes all over the earth. The increase of the wind energy studies and researches reduced the manufacturing and installation costs of the wind energy equipment by almost 50 % in the last 15 years. When the Renewable Energy Sources Regulation are completed, in Turkey, the studies in wind energy will further be accelerated. The advantages offered by the wind energy has spread up the use of permanent-magnet generators.

In this thesis, it is aimed that the design and construction of a wind energy system complete with its wind turbine and its generator which will be sufficient for the electrical needs for dwelling. In addition the work of the constructional features, the output power-speed variation and efficiency of a permanent-magnet generator are also investigated.

Science Code : 608.01.05**Key Words : Wind Turbine, Renewable Energy, Permanent Magnet Generator****Page Number: 147****Adviser : Asistant Profesör Fadıl ÇELİKKOL**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Yrd. Doç. Dr. Fadıl ÇELİKKOL'a yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Makine Yüksek Mühendisi Ramazan ŞEVİK'e ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Meryem ANAMUR UĞUZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ.	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ	4
2.1. Dünyada Rüzgar Enerjisinin Tarihi.....	4
2.2. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Tarihi	10
3. KURAMSAL TEMELLER	12
3.1. Rüzgar	12
3.1.1. Rüzgar hızının yükseklikle değişimi	14
3.1.2. Frekans histogramı ve rüzgar hızı (weibull) dağılımı	15
3.2. Hız ve Güç Bağlantıları.....	16
3.2.1. Rüzgardan güç elde edilmesi	18
3.3. Rotor Süpürme Alanı.....	20
3.4. Kanat Uç Hız Oranı (λ).....	21
3.5. Rüzgar Türbinleri	23

	Sayfa
3.5.1. Kanat profili (airfoil)	24
3.5.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	26
3.5.3. Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	27
3.5.4. Üst rüzgarlı(upwind) türbinler	28
3.5.5. Alt rüzgarlı(downwind) türbinler	28
3.6. Rüzgar Jeneratörleri	29
3.6.1. DC jeneratörler.....	31
3.6.2. Senkron jeneratörler veya sabit mıknatıslı senkron jeneratörler.....	31
3.6.3. Asenkron jeneratörler (Endüksiyon jeneratör)	46
3.7. Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri	50
3.7.1. Hız kontrol bölgeleri	51
3.7.2. Adım (pitch) kontrolü	52
3.7.3. Durma (stall) kontrolü.....	54
3.7.4. Jeneratör sürücülerini	55
4. MATERYAL VE METOD	60
4.1. Kanat Tasarımı ve İmalatı	60
4.2. Yönlendirme Kanat Tasarımı ve İmalatı	68
4.3. Sistemin Yataklanma Şekli ve İmalatı	71
4.4. Jeneratör İmalatı	72
4.4.1 Ndfb (Neodium) mıknatıs	72
4.4.2. Rotor tasarımı ve imalatı.....	73
4.4.3. Stator tasarımı ve imalatı	76
4.5. Doğrultucu Devresi Tasarımı ve İmalatı	86

	Sayfa
4.6. Depolama.....	88
4.7. Şönt Regülatör Devresi Tasarımı	89
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	90
5.1. Deney Düzenegi ve Deneyin Yapılışı	90
5.2. Deneysel Sonuçlar	93
5.3. Tartışma	115
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	119
KAYNAKLAR	122
EKLER.	126
EK-1.	127
EK-2.	128
EK-3.	129
ÖZGEÇMİŞ	133

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kanat sayısı – λ değişimi	22
Çizelge 3.2. Kanat tipleri ve özellikleri	23
Çizelge 4.1. Çeşitli sıcaklıklardaki hava yoğunlukları.....	61
Çizelge 4.2. Aralık ölçüleri	64
Çizelge 4.3. Aralık kalınlıkları.....	64
Çizelge 4.4. Sabit mıknatıs verileri	73
Çizelge 5.1. Rezistif yükler için direnç, kesit ve uzunluk değerleri	92
Çizelge 5.2. 100 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	93
Çizelge 5.3. 200 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	93
Çizelge 5.4. 300 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	94
Çizelge 5.5. 400 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	94
Çizelge 5.6. 500 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	94
Çizelge 5.7. 600 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	95
Çizelge 5.8. 700 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	95
Çizelge 5.9. 750 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri.....	95
Çizelge 5.10. 1000 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri	96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Dünya rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi.....	9
Şekil 3.1. Atmosferin genel dönüşümü	12
Şekil 3.2. Rüzgar Gülü	13
Şekil 3.3. Enerji Gülü.....	13
Şekil 3.4. Frekans histogramı ve weibull dağılımı.....	15
Şekil 3.5. $C_p - V_0 / V$ değişimi	20
Şekil 3.6. Rotor süpürme alanı.....	21
Şekil 3.7. Kanat uç hız oranı	21
Şekil 3.8. Farklı kanat yapılarında $C_p - \lambda$ değişimi.....	22
Şekil 3.9. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri	24
Şekil 3.10. Hücüm açısı gösterimi	24
Şekil 3.11. Kanat hava akış (airfoil) profili	25
Şekil 3.12. Alt ve üst rüzgarlı türbinler.....	28
Şekil 3.13. Rüzgar elektrik sisteminin basit bileşenleri	29
Şekil 3.14. Rüzgar türbinlerinde mekanik enerji-elektrik enerjisi dönüşüm şeması.	30
Şekil 3.15. Sabit mıknatıslı alternatör kullanan sistem	34
Şekil 3.16. Eksene dik ve eksenel akılı makine şekilleri	36
Şekil 3.17. Tek rotor ve tek statorlu basit eksenel akılı makine şekli.....	37
Şekil 3.18. Eksenel akılı Torus NS makine şekli	38
Şekil 3.19. Eksenel akılı torus NS makinenin detaylı şekli	38
Şekil 3.20. Eksenel akılı torus NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 3.21. Eksenel akılı torus NS makinenin üç boyutlu akı yolu şekli	39
Şekil 3.22. Eksenel akılı kanallı torus NN, yüzeye yerleşik tip sabit mıknatıslı makinenin şekli	40
Şekil 3.23. (a) Eksenel akı yollu torus NN makinenin iki boyutlu akı yolu şekli (b) Eksenel akı yollu torus NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli....	40
Şekil 3.24. Eksenel akılı torus NS kanallı tip sabit mıknatıslı makine şekli.....	41
Şekil 3.25. Eksenel akılı Afir-NS makine şekli	41
Şekil 3.26. Eksenel akılı kanalsız Afir-NS makine detayı	42
Şekil 3.27. Afir-NS makinede üç boyutlu akı yolu şekli	42
Şekil 3.28. (a) Eksenel akı yollu kanallı Afir-NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli (b) Eksenel akı yollu kanalsız Afir-NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli	43
Şekil 3.29. Çok aşamalı kanalsız tip sabit mıknatıslı makinenin üç boyutlu şekli .	43
Şekil 3.30. (a) Eksenel akı yollu çok aşamalı NN makinenin üç boyutlu akı yolu şekli (b) Eksenel akı yollu çok aşamalı NS makinenin üç boyutlu akı yolu şekli ...	44
Şekil 3.31. Çok aşamalı NS tip (N=3) makine şekli	44
Şekil 3.32. Çok aşamalı statoru nüvesiz sabit mıknatıslı makine şekli.....	45
Şekil 3.33. Alan kontrollü eksenel akılı yüzey mıknatıslı makinenin üç boyutlu şekli .	45
Şekil 3.34. (a) Alan kontrollü eksenel akılı yüzey mıknatıslı makinenin stator şekli (b) Alan kontrollü eksenel akılı yüzey mıknatıslı makinenin rotor şekli...	46
Şekil 3.35. Farklı rüzgar hızlarında çıkış gücü	51
Şekil 3.36. Değişik rüzgar hızlarında sabit Cp eğrisi.....	52
Şekil 3.37. Vestas 1,65 MW rüzgar türbini gerçek ölçümleri.....	53
Şekil 3.38. Durma (stall) ve Adım (pitch) kontrollü türbindeki güç çıkış eğrisi	55
Şekil 3.39. Dişli kullanım oranı	56
Şekil 3.40. Stator sargılarında kutup değişimi	57

Şekil	Sayfa
Şekil 3.41. Bilezikli döner makine şekli	59
Şekil 4.1. Rüzgar türbinin başlıca parçaları	60
Şekil 4.2. Kanat aralıkları ve kanat profili	63
Şekil 4.3. Kanat ölçü aralıkları.....	64
Şekil 4.4. Aralık kalınlıklarının ölçümü.....	65
Şekil 4.5. Kanat profil ölçüsü.....	65
Şekil 4.6. Kanadın tamamının profil şekli	65
Şekil 4.7. Aralıklarda kanat profilleri	66
Şekil 4.8. Yönlendirme kanadı ölçüleri.....	67
Şekil 4.9. Yönlendirme kanat açısı	68
Şekil 4.10. Yönlendirme kanadı bağlantı boru şekli	68
Şekil 4.11. Yönlendirme kanat ölçüleri.....	69
Şekil 4.12. Yönlendirme kanadının normal ve fırtına durumlarında alacağı pozisyonlar	70
Şekil 4.13. Yönlendirme kanadına gelen rüzgarın kaldırma kuvveti yönü.....	70
Şekil 4.14. Porye ve bağlantı şekli	71
Şekil 4.15. Manyetik akı yolu	73
Şekil 4.16. Manyetik akı yolunun üç boyutlu gösterimi	74
Şekil 4.17. Rotor nüvesine mıknatıs bloklarının dizilmesi için hazırlanan yardımcı kalıp autocad çizimi	74
Şekil 4.18. Sarılmış bobin ölçüsü ve şekli	78
Şekil 4.19. Statora bobinlerin yerleştirmek için hazırlanan autocad çizimi.....	79
Şekil 4.20. Stator kalıp için hazırlanan autocad çizimi.....	79
Şekil 4.21. Stator ve rotorların görünüşü	84

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. Stator ve rotorların görünümü a-Yatay görünüm b-Dikey görünüm.....	85
Şekil 4.23 Bobin çıkışlarının doğrultuculara bağlanma şekli	86
Şekil 4.24. Köprü diyot bağlantı uçları	86
Şekil 4.25. Bobinlerin köprü diyotlara bağlanması ve çıkış uçları	87
Şekil 4.26. Şönt regülatör devresi	89
Şekil 5.1. 100 W yükte akım grafiği	99
Şekil 5.2. 100 W yükte gerilim grafiği.....	99
Şekil 5.3. 100 W yükte güç grafiği	100
Şekil 5.4. 200 W yükte akım grafiği	100
Şekil 5.5. 200 W yükte akım grafiği	101
Şekil 5.6. 200 W yükte güç grafiği	101
Şekil 5.7. 300 W yükte akım grafiği	102
Şekil 5.8. 300 W yükte gerilim grafiği.....	102
Şekil 5.9. 300 W yükte güç grafiği	103
Şekil 5.10. 400 W yükte akım grafiği	103
Şekil 5.11. 400 W yükte gerilim grafiği.....	104
Şekil 5.12. 400 W yükte güç grafiği	104
Şekil 5.13. 500 W yükte akım grafiği	105
Şekil 5.14. 500 W yükte gerilim grafiği.....	105
Şekil 5.15. 500 W yükte güç grafiği	106
Şekil 5.16. 600 W yükte akım grafiği	106
Şekil 5.17. 600 W yükte gerilim grafiği.....	107
Şekil 5.18. 600 W yükte güç grafiği	107

Şekil	Sayfa
Şekil 5.19. 700 W yükte akım grafiği	108
Şekil 5.20. 700 W yükte gerilim grafiği.....	108
Şekil 5.21. 700 W yükte güç grafiği	109
Şekil 5.22. 750 W yükte akım grafiği	109
Şekil 5.23. 750 W yükte gerilim grafiği.....	110
Şekil 5.24. 750 W yükte güç grafiği	110
Şekil 5.25. 1000 W yükte akım grafiği	111
Şekil 5.26. 1000 W yükte gerilim grafiği.....	111
Şekil 5.27. 1000 W yükte güç grafiği	112
Şekil 5.28. Jeneratör yük-akım grafiği.....	112
Şekil 5.29. Jeneratör yük-gerilim grafiği	113
Şekil 5.30. Jeneratör güç - gerilim grafiği.....	113
Şekil 5.31. Jeneratör 400 devir yük-akım grafiği.....	114
Şekil 5.32. Jeneratör 400 devir yük-gerilim grafiği	114
Şekil 5.33. Jeneratör 400 devir yük-güç grafiği.....	115

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. 1888 yılında Cleveland’da yapılan türbin görüntüsü.....	5
Resim 2.2. 200kW’lık Gedser türbini (Danimarka).....	6
Resim 2.3. 2 MW’lık General Electric Mod1 türbini	7
Resim 2.4. 100 kW Growian türbini (Almanya).....	8
Resim 3.1. Dikey eksenli darrieus rüzgar türbini.....	27
Resim 3.2. Yatay eksenli rüzgar türbini Enercon E-112 4.5 MW	27
Resim 4.1. Hazırlanan kanat malzemeleri.....	66
Resim 4.2. Kanatların birleştirilmiş hali	67
Resim 4.3. Yönlendirme kanadı.....	71
Resim 4.4. Neodyum mıknatıslar.....	72
Resim 4.5. Rotor nüvesi, yardımcı kalıp ve bobinlerin görünüşü.....	75
Resim 4.6. Rotor nüvesi üzerine yapıştırılan mıknatıs bloklarının görünüşü	75
Resim 4.7. Hazırlanan iki rotorun görüntüsü	75
Resim 4.8. Sarılan bobinlerin görünüşü	78
Resim 4.9. Stator kalıbın içine bobinlerin yıldız bağlanarak yerleştirilmesi	80
Resim 4.10. Kalıpları hazırlanan rotor ve stator	80
Resim 4.11. Karışımın hazırlanması	81
Resim 4.12. Polyester reçinenin kalıplara dökülmesi	81
Resim 4.13. Polyester reçinenin kalıplara dökülmüş hali	82
Resim 4.14. Kalıpların üzerinin kapatılması.....	82
Resim 4.15. Kalıpların mengene ile sıkılması	82

Resim	Sayfa
Resim 4.16. Kalıptan çıkarılan stator	83
Resim 4.17. Stator ve rotorun pürüzsüzleştirilmesi	83
Resim 4.18. Boyanmış rotor ve stator	83
Resim 4.19. Stator ve rotorların birleştirilmiş hali.....	84
Resim 4.20. Stator ve rotorların porye ve kanatlara bağlanmış şekli.....	85
Resim 4.21. Tek faz köprü doğrultucular (35 A, 600V)	86
Resim 4.22. Köprü doğrultucuların alüminyum soğutucu üzerine monte edilmesi....	87
Resim 4.23. Rüzgar türbininin bitmiş görüntüsü	88
Resim 5.1. Torna tezgahına bağlanan jeneratör görüntüsü	90
Resim 5.2. Ölçü aletleri.....	90
Resim 5.3. Rezistif yükler için hazırlanan deneysel platform görüntüsü	91
Resim 5.4. Deneysel veriler alınacak duruma getirilmiş deney düzeneği	92
Resim 5.5. Jeneratörün yüke bağlı 400 devir/dk ile dönmesi ve alınan güç görüntüsü ...	92
Resim 5.6. Türbininin yüksek bir tepede görüntüsü	97
Resim 5.7. Türbininin yüksek bir tepede diğer görüntüsü	97
Resim 5.8. Türbininin yüksek bir tepede arkadan görüntüsü.....	97
Resim 5.9. Türbininin yüksek bir tepede yandan görüntüsü.....	98
Resim 5.10. Türbininin yüksek bir tepede işletmede 21 W'lık ampul bağlı iken görüntüsü.....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Amper
V	Volt
W	Watt
KW	Kilowatt
KVA	Kilo volt amper
PS	Beygir Gücü (Pferde Starke)
RPM	Dakikada devir sayısı (Rev.Per Minute)
TSR	Kanat uç hız oranı (Tip Speed Ratio)
NdFeb	Neodyum (Neodium) mıknatıs
Torus	Simit şeklide geometrik yapı
Afir	Simit şeklindeki yapıya geniş yay parçaları şeklinde yerleşim
Toroidal	Simit şeklinde yapının eksenine dik sarımı
Kısaltmalar	Açıklama
MED	AB'ye üye Akdeniz Ülkeleri ve Güney Akdeniz Ülkeleri
IRESMED	Dağıtım şebekesine bağlı yenilenebilir enerjinin entegrasyonu
EİE	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
MTA	Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü
ODTÜ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Merkezi
MAM	Marmara Araştırma Merkezi

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları çevreyi kirleten fosil kökenli yakıtların tükenme eğilimine girmesi ile daha da önem kazanmış ve bu konudaki çalışmalara hız verilmiştir. Dünya atmosferine salınan karbondioksit düzeyinde bir azalma sağlanması, rüzgar enerjisi üretiminin en önemli çevresel yararlarıdır. Karbondioksit, felaket boyutlarındaki küresel iklim değişikliği etkilerine yol açan sera etkisinin büyük ölçüde artıran en önemli gazdır. Rüzgar enerjisine geçmekle milyon tonlarca CO₂'in atmosfere salınımı önlenecektir. İklim değişikliğine neden olan sera gazlarının azaltmak için dünya ülkeleri 1997 yılı Kyoto Protokolünü imzalamışlardır (1).

Alternatif yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında hızlı bir gelişme rüzgar enerjisinde görülmektedir. Ayrıca bilinen enerji yatırımlarının bir çoğu çevrenin ve yaşama alanlarının tahrip olmasına sebep olmaktadır. Küresel çevresel problemler üzerindeki ciddi endişeler, yenilenebilir kaynakların önemini ve yararlarını artırmaktadır (1).

Rüzgar enerjisinden elektrik üreten sistemler gerek elektrik şebekesinin gidemediği uzak yerleşim merkezlerinde, adalarda, kırsal alanlarda, ormanlık ve dağlık bölgelerdeki birimlerde (TV, radyo istasyonları, haberleşme istasyonları) elektrik enerjisi temini amacıyla yada enterkonnekte sistemi beslemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu şekilde gerek birkaç kW'lık sistemler yada MW'lık sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük büyüklükteki rüzgar türbinleri kolayca istenilen yere monte edilebilecek büyüklük ve yapıda modüler olarak imal edilmektedir. Enterkonnekte şebekeye bağlı MW'lık rüzgar türbinleri de modüler yapıda dizayn edilmekte deniz aşırı okyanus üzerinde, kıyı şeritlerinde veya karasal alan üzerine rüzgar santrali olarak onlarcası bir arada kurulmaktadır.

Ağır teçhizat üreten endüstri için, yüzde 20-25 gibi büyüme hızları yüksektir, fakat rüzgar endüstrisinin ilk endüstrileşme aşamalarında, çok daha yüksek oranlar

yaşanmıştır. Son 5 yıldır kurulan toplam türbinlerin yıllık ortalama büyüme hızı, yaklaşık % 32'dir (1).

Rüzgar türbin imalatçılarının artması ve teknolojik gelişmelere paralel olarak oldukça verimli rüzgar türbinleri imal edilmektedir. Kıyıdaki bir türbinin ürettiği elektriğin ortalama maliyeti, 1980'lerin ortalarında kurulmuş bir türbin için, yaklaşık 8,8 sent/kWs düzeyinden, 1000 kW'lık yeni kurulmuş bir türbin için 4,1 sent/kWs düzeyine inmiştir. Son 15 yılda yarıdan fazla bir iyileşme demektir. Bugün imal edilen rüzgar türbinleri 20 yıl önceki benzerlerinden 100 kat daha güçlüdür. Bütün bu gelişmeler rüzgar enerjisine olan ilgi ve gelişmelerin hızını göstermektedir (1).

Küçük boyutlu rüzgar türbinleri genellikle birkaç kW'a kadar imal edilmişler. Üreticilerin yaptıkları rüzgar enerji sistemleri, sabit mıknatıslı, birkaç metre çapında ve akü sistemini sarj eden sistemlerdir. Fırtına koruma düzenleri vardır. Kompozit malzemeden ve çıkışları 12, 24, 36 veya 48 Volt DC çıkışlı olarak imal edilmişlerdir.

Spooner E ve Chen Z (1995) yaptıkları çalışmada değişken hızlı rüzgar türbin sistemlerinde sabit mıknatıslı jeneratörlerin kullanılmasını araştırmışlardır. Modüler hale getirdikleri stator ve rotor düzeninin demonstrasyonunu yapmışlardır. Bobinlerden aldıkları çıkışa tek tek farklı kapasitelerde kondansatörler bağlayarak çıkış gücünün ve geriliminin karakteristiğini analiz etmişlerdir (2).

Spooner E ve Williamson A (1996) yaptıkları çalışmada çok kutuplu sabit mıknatıslı senkron jeneratör dizayn ederek değişken ve sabit hızlı sistemlerin direk şebekeye bağlanabilmesi için modüler rotor ve stator dizaynı üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları deneyde 26 kutuplu rotor, 15 bobinli stator ve 60x60x19 mm ferit mıknatıs blokları kullanarak geliştirdikleri stator ve rotor dizaynını analiz etmişlerdir. Stator ve rotor geometrisinin avantajlarını ifade etmişlerdir (3).

Chalmers BJ, Wu W ve Spooner E (1999) 5 kW'lık sabit mıknatıslı ve dişli sistemi bulunmayan torus yapılı jeneratörü rezistif yükle birlikte denemiştir. Jeneratörden çekilen akım arttıkça kayıpların arttığını ve çıkış geriliminin azaldığını göstermişlerdir. Sabit mıknatıs olarak sinterlenmiş Nd₂Fe₁₄b (neodyum) mıknatıs bloklarını kullanmışlardır. Jeneratörü 200 devir / dakikada test etmişlerdir (4).

Bu çalışmada; Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hızlı bir gelişme gösteren rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üreten; yatay eksenli, 3 kanatlı, dişli sistemi bulunmayan, doğrudan jeneratöre bağlanmış, eksenel akı yollu sabit neodyum mıknatıslı jeneratörü, elde edilen AC gerilimi doğrultmak için doğrultucu devresi ve fırtına durumlarında mekanik koruma sistemi olan rüzgar türbini ile kullanılarak incelenmiştir.

Rüzgar türbini yapısı itibariyle bölümlere ayrılmış ve her bir bölüm ayrı ayrı incelenmiştir. Öncelikle rüzgar türbinindeki kanatlar, yönlendirme kanadı, jeneratör, AC gerilimin doğrultulması ve rüzgar hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar incelenerek benzer çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmada, bir evin ihtiyacını (ortalama 1 kW) karşılayabilecek bir rüzgar türbini tasarlanmıştır. Kanat çapı ve jeneratör büyüklüğü belirlenmiştir. Teorik hesapları yapıldıktan sonra rüzgar türbininin imalatına geçilmiştir. Yapılan çalışmanın her aşaması ayrıntılı olarak anlatılarak resimlerle pekiştirilmiştir. İmalatta kullanılan ölçüler verilmiştir. İmalat tamamlandıktan sonra öncelikle jeneratör deney düzeneğine bağlanarak veriler alınmış ve kaydedilmiştir. Diğer mekanik kısımların denenmesi gerçek şartlarda yapılmıştır. Rüzgar türbini yüksekçe bir tepeye konarak kanatların, jeneratörün ve yönlendirme kanadının çalışması test edilmiştir. Elde edilen veriler kaydedilerek analiz edilmiştir.

Son olarak veriler değerlendirilerek yapılan çalışmanın daha verimli hale getirilmesi için yapılması gerekenler önerilmiştir.

2. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1. Dünyada Rüzgar Enerjisinin Tarihi

Rüzgar enerjisinin ilk kullanımı denizciler tarafından deniz sandallarında olmuştur. Onlar bu durumun fiziksel çalışmasını, neyin nasıl çalıştığını bilmeseler de eski denizciler, rüzgarın kaldırma gücünü kullanabiliyorlardı. İlk rüzgar türbininin geliştirilmesi, değirmen ve su pompalamak amacıyla yapılan dikey eksenli sistemdir. Bu sistem 500-900 yılları arasında İran'da geliştirilmiştir ve su pompalamakta kullanılmıştır. Fakat yapısı hakkında detaylı bir yazılı metin veya bilgi mevcut değildir. Çalışma şekli doküman olarak günümüze ulaşan ilk rüzgar türbini İran rüzgar türbinidir. Tahtadan ve de kanatları bezden yapılmıştır (5).

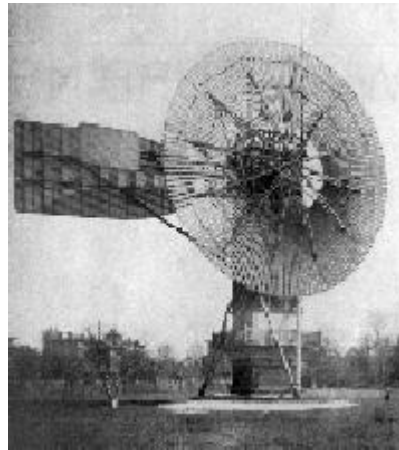
Dik eksenli rüzgar türbinlerinin geçmişte çok kullanıldığı yer Çin olarak bilinmektedir. Bundan 2000 yıl önce bulundu ve yaygın olarak kullanılmakta idi. İlk yazılı bilgi ise 1219 yılında Çinli devlet adamı Yahlu Chhu Tashi'ye aittir. En başarılı ve en gelişmiş rüzgar gücü uygulamalarının geniş bir şekilde su pompalama makinelerinde halen değişik yerlerde ve Girit adasında kullanıldığı bilinir. Deniz tipi rüzgar türbinlerinin yüzlercesi mahsul, tarla ve hayvan sulamak için kullanılmıştır (5).

Batı Avrupa'da bilinen ilk rüzgar türbinleri yatay eksenlidir. İlk uygulama, 1270 yılında dört kanatın bir mile bağlanmasıyla oluşturuldu. 1390 yılında Almanlar kule üzerinde türbin tasarımını gerçekleştirdiler ve bina şeklinde yaptılar. Binalar birkaç katlı yapıldı ve değirmen olarak kullanıldı (5).

Deniz rüzgar türbinlerinin daha verimli hale getirilmesi 500 yıl aldı. Son birkaç yüzyıldaki en önemli gelişme daha küçük sistemlerin geliştirilmesi ve en çok da 1800'lerde Amerika'da geliştirilen çiftlik tipi türbinlerdir ve hala kullanılmaktadır. 1854 yılında tahtadan, 1870 yılında ise çelik kanatlı olarak tasarlanmıştır. Düşük hızlı sistemlerdir (5).

1850 ile 1970 yılları arasında Amerika’da 1 PS ve daha az güçlü olan 6 milyon küçük rüzgar makinesi kullanıldı. 19. yüzyılın sonları Amerikan çok kanatlı rüzgar tasarımları ilk defa elektrik üretmek amacıyla kullanıldı (5).

Büyük rüzgar kanatlı sistemlerin elektrik üretmede ilk kullanımı 1888 yılında Charles F.Brush tarafından yapılmıştır(Cleveland, Ohio). Çok kanatlı ve kazıklardan çit şeklindeki rotor, 17 m çapındadır. Rotorun rüzgar yönünde dönebilmesi için çok büyük bir kuyruğu vardı ve ilk defa dişli kutusu ile türbin hızı 50 kat arttırılmıştır. Jeneratör olarak direk akım jeneratörü kullanılmış ve 500 RPM devirde işletilmiştir. Brush makineleriyle 17 m’lik rotor çapından 12 kW elde edilirken, modern çiftlik türbinleri ile 70-100 kW elde edilebilmektedir (5).



Resim 2.1. 1888 yılında Cleveland’da yapılan türbin görüntüsü

1891 yılında Done Poul La Cour Aerodinamik tasarım prensiplerinin geliştirerek ilk elektrik çıkışlı rüzgar makinesini geliştirdi. Geliştirdiği makineler dört kanatlı, daha yüksek devirli fakat dayanıklılığı zayıf olan makinelerdi. Done Poul La Cour (1846-1908) Askov Danimarka’da yaşamıştır. Aslında meteoroloji eğitimi almış idi. Bazı teorik deneyler için rüzgar tüneline de ilk defa o kullanmıştır. Askov High School’da 1897 yılında La Cour tarafından yapılan rüzgar türbini 89 W gücünde idi. 1905 yılında La Cour’un kuruculuğunu yaptığı Rüzgar Elektrikçileri Birliği (Society of Wind Electricity) isimli ilk dergi La Cour’un editörlüğünde bu birlik tarafından yayımlanmıştır (6).

Birinci Dünya Savaşının bitiminde Danimarka'da çok sayıda rüzgar türbini vardı. Güçleri 20 ile 35 kW arası değişen bu türbinler kullanılmıştı. I. II. Dünya savaşlarında fosil yakıtlarının kesilmesi ile rüzgar enerjisinin önemi anlaşılarak bu yıllarda rüzgar enerjisinin kullanımı ve teknolojisi gelişmiştir (5).

1920'lerin ortalarında 3 kW'lık küçük boyutlu rüzgar jeneratörü Parris-Dunn ve Jacobs Wind Elektrik Şirketleri tarafından geliştirildi ve çok geniş bir kullanım alanı buldu. 1935 ve 1970 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri, Danimarka, Fransa, Almanya ve Büyük Britanya'da çok kanatlı rüzgar türbinleri kullanıldı ve çok kanatlı olanların elektrik üretmede pratik bir çözüm olmadığı görüldü. 1941 yılında Vermont'a 1,25 MW'lık Smith-Putnam tarafından inşa edildi. Yatay eksenli ve iki kanatlı idi. 16 tonluk rotora sahipti ve paslanmaz çelikten imal edilmişti. Kanat açısı kontrol mekanizması vardı ve 28 d/dk devirle dönüyordu (5).

Avrupa da rüzgar enerjisindeki gelişmeler II. Dünya Savaşından sonra olmuştur. Danimarka'da 200 kW'lık Gedser rüzgar türbini inşa edildi. 1960'lara kadar başarı ile işletmede kalmıştır. Kompleks bir yapıya sahip olmamakla birlikte 3 kanatlı idi.



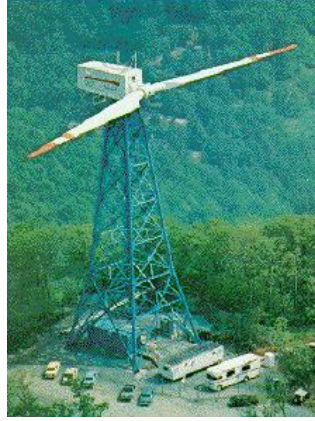
Resim 2.2. 200kW'lık Gedser türbini (Danimarka)

Elektromekanik dişli sistemli ve asenkron motor kullanmakta idi. Stall kontrol prensibine göre çalışan Gedser türbininde, ayrıca aerodinamik uç freni bulunmaktaydı. Bu sistem günümüzde kullanılan stall kontrolü türbinlerinde hala bulunmaktadır (6).

1973 yılında Arap Petrol Krizi diye sonradan adlandırılan kriz neticesinde, Amerika Birleşik Devletleri'nde çalışmalar hız kazanmıştır. Ulusal Hükümetin desteği ile araştırma programı başlatılmıştır. Araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda fabrikasyon ve test yapılabilir duruma gelinmiştir. 1 kW'tan 40 kW'a kadar 13 farklı küçük rüzgar türbin tasarımı, 100 kW ile 3,2 MW arasında 5 çeşit yatay eksenli rüzgar türbin tasarımı ve yine 5 kW ile 500 kW arasında birkaç çeşit dik eksenli rüzgar türbin tasarımı geliştirilmiştir. Daha sonra Enerji Araştırma ve Geliştirme Kurumu(ERDA) ve akabinde Birleşik Devletler Enerji Dairesi(DOE) kuruldu (7).

Daha sonra geliştirilen Darrieus türbinleri ile Amerika'da 34 m yüksekliğinde değişken hızlı türbin inşa edildi. Rüzgar enerjisi üretilmesi konusunda hükümet programları oluşturuldu ve destek verildi(7).

1975 yılında NASA'nın elektrik enerji üretim programı ile 200 kW gücünde MOD.0A, Clayton'da ve MOD1 (2MW) rüzgar türbinleri inşa edildi.



Resim 2.3. 2 MW'lık General Electric Mod1 türbini

1980'li yıllarda güçleri 40 ile 60 kW arasında değişen güçlerde 600'ü aşkın rüzgar türbini imal edildi. 1974 ve 1981 yılları arasında Birleşik Devletler Ulusal Rüzgar Enerji Programı kapsamında geliştirilen başarılı araştırma ve çalışmalarla kompleks tasarımlı ve kompozit rotorlu geliştirilen ve güçleri 1,5 ile 10 kW arasında olan rüzgar türbinleri oldukça yaygınlaştı ve geliştirilen tasarım özel imalatçılar tarafından da kullanıldı (7).

1990'lı yıllarda Avrupa'da, Almanya'da GROWION türbinleri geliştirildi. Bu yıllarda Ulusal Rüzgar Teknoloji Merkezi (NWTC). Kolorado'da Ulusal yenilenebilir Enerji Laboratuvarı kuruldu (NREL).



Resim 2.4. 100 kW Growian türbini (Almanya)

Bu yıllardan sonra rüzgar türbini imalatı ve inşaatı oldukça hızlanmaya başladı ve Avrupa'nın çeşitli ülkelerinde rüzgar santralleri kuruldu ve çok çeşitli yüksek kapasiteli rüzgar türbin tasarımları ve projelendirilmelerine başlandı (7).

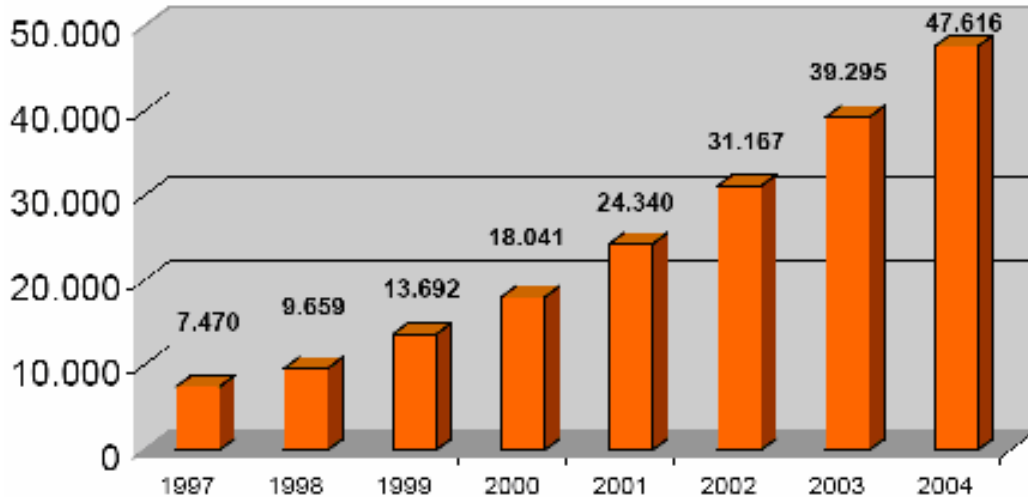
Teknolojik gelişmelere paralel olarak rüzgar türbin ve jeneratör teknolojisi de gelişmiş ve seri üretime geçilerek maliyetleri de büyük oranda azalmıştır. 1980 yılında kWh'ı 35 sent iken 2000'li yıllarda 5 sentin altına düşmüştür. Rüzgar enerjisinin en ucuz güç kaynaklarından biri olmasındaki temel faktörleri aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

- Büyük ve yüksek dayanıklılıkta fiber kompozitlerin imal edilmesi
- Rüzgar jeneratörlerinin değişken hızlı işlemlerde maksimum enerjiyi yakalayabilmesi ve onu koruyabilmesi
- Güç elektroniğinde ilerlemeler ve kurulum maliyetinin düşmesi
- Fabrika işlemlerinin gelişmişliği ve kurulum maliyetinin düşmesi
- Büyük rüzgar üretim fabrikalarının ekonomik aralığı sağlama konusunda yeterliliği
- Birikmiş olan deneyimin kapasite faktörünü iyileştirmesi

- Faydalı sistem modellemesi ve prototipin bilgisayarda yapılması ve ayrıca simülasyonun yapılabilmesi (8).

Dünyada rüzgar enerjisi konusundaki hızlı artış 1990'lı yıllardan sonra olmuştur ve her geçen yıl artan bir ivmeyle devam etmektedir. 1996 yılında dünya rüzgar enerji kurulu kapasitesi 7 470 MW iken 2004 yılı sonunda 6,3 kat artış göstererek 47 616 MW'a ulaşmıştır. 2002 yılında % 16, 2003 yılında ise % 22 artış göstermiştir. Verilen bu değerler dünyada rüzgar enerjisine olan yatırım ve ilginin nedenli büyük olduğunu göstermektedir. Toplam rüzgar enerjisi üretiminde artış trendini Almanya, USA, İspanya, Hindistan, Danimarka ve Avusturya sağlamakta diğer ülkelerin katkıları daha sınırlı kalmıştır (1, 9).

“Rüzgar Gücü 12” diye adlandırılan planlamaya göre, rüzgar enerjisinin 2020 yılına kadar dünya elektriğinin % 12'sini karşılama potansiyeline yönelik bir fizibilite çalışmasıdır.. bu süreçte, 1200 GW düzeyinde bir rüzgar gücü kapasitesi oluşturularak, 2 milyonu aşkın kişiye iş olanağı oluşturulacak ve iklim değişikliğine neden olan 10 milyar 700 milyon ton karbondioksitin üretilmesi önlenecektir (1).



Şekil 2.1. Dünya rüzgar enerjisi kurulu kapasitesi (9)

2.2. Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Tarihi

1973-1978 yılları arasındaki petrol krizinden sonra Tarım Bakanlığı tarafından yapılan kırsal enerji makineleri envanterinde kullanılıp kullanılmadığına bakılmaksızın, 871 adet su çıkarma ve 23 adet elektrik üretim amaçlı rüzgar türbini olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu rüzgar makineleri güçleri 1 kW’ın altında güce sahip olup yerli olanları ilkel yapıydı. Türkiye’de rüzgar enerjisi üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar 1960’larda Ankara Üniversitesi, 1970’lerde Ege Üniversitesi daha sonraki yıllarda ODTÜ’de yapılmış olup, 1980’li yıllarda TÜBİTAK-MAM da bünyesinde bazı çalışmalar yapılmıştır. MAM’da ilk rüzgar atlası çalışması başlatılmıştır. Gebze-Özbek tepede pompa çalıştırma ve elektrik üretim amaçlı çeşitli rüzgar türbinleri kurularak denenmiştir (10).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’na bağlı Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİEİ), 1981 yılından bu yana, rüzgar enerjisi çalışmaları yapmaktadır. 1989 yılında bu kurumda Rüzgar Enerjisi Şube Müdürlüğü oluşturulmuştur. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi ve tespit edilmesi amacıyla Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü istasyonlarında yapılmış uzun dönemli ölçümlere dayalı istatistikler, EİE idaresi tarafından 1984’de tamamlanan “Türkiye Rüzgar Enerjisi Doğal Potansiyeli” çalışmasında değerlendirilmiştir. Bölgelere göre rüzgar güç yoğunluğu verileri toplanmıştır. 1990 yılında EİE idaresi “Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonu” projesini başlatmış ve sırasıyla: Karabiga, Gökçeada (Çanakkale), Nurdağı (Gaziantep), Bandırma (Balıkesir), Şenköy (Hatay), Göktepe (Muğla), Karaburun (İzmir), Akhisar (Manisa), Zengen (Konya), Elmadağ (Ankara), ve Yenihisar (Aydın) gözlem istasyonlarını tesis etmiştir. Bu 11 özel istasyonda rüzgarla ilgili verilerin toplanmasına devam edilmektedir. Daha sonraki yıllarda Türkiye Rüzgar Atlası Projesi kapsamında gözlem istasyonlarının sayısı artırılmış ve Türkiye Rüzgar Atlası çıkarılmıştır. EİE elde ettiği bu rüzgar datalarının satışına da başlamıştır (10).

Ülkemizde ilk sayılabilecek rüzgar türbini 1985 yılında Danimarka’dan alınan 55 kW gücündeki Çeşme Altın yunus turistik tesislerindeki rüzgar türbinidir. Daha

sonra EİE idaresi “Su pompalama Projesi” kapsamında 1,1 kW gücündeki rüzgar türbinini rotorunu ithal ederek Ankara’da kurmuştur. 1998 yılında Çeşme’de ARES A.Ş. tarafından 8,7 MW gücünde ve 2000 yılı içinde ise DEMİNER Holding A.Ş. tarafından Bozcaada’da 10.2 MW’lık rüzgar türbinlerinin yapımı gerçekleştirilmiştir. Özel sektör tarafından hazırlanan çok sayıda rüzgar santral projesi de çeşitli aşamalarda çalışmalarını devam ettirmektedirler. 2004 sonu itibari ile Türkiye ‘de kurulu güç 20 MW’tır (10).

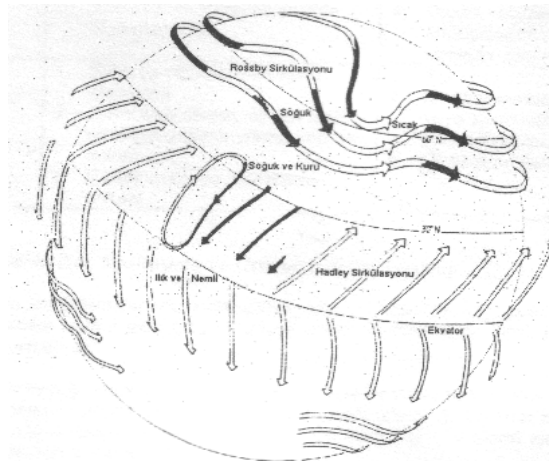
EİE idaresi MED 2010 ve İRESMED projelerine aktif olarak katılıp çalışmalarını devam ettirmektedir. MED 2010 projesi AB tarafından desteklenmiş ve OME (Observatoire Mediterranien de l’Energie) koordinatörlüğünde organize edilmiş olup proje ile “Akdeniz Ülkelerinde (AB’ye üye Akdeniz Ülkeleri ve Güney Akdeniz Ülkeleri) rüzgar ve güneşten elde edilecek elektrik enerjisinin Avrupa Birliği Ülkelerine büyük ölçekli entegrasyonu sağlama yolları araştırılmıştır. Yapılması planlanan entegrasyon ile Avrupa Birliği Komisyonunun yenilenebilir enerji konusundaki 2010 yılı için %12’lik yenilenebilir enerji kullanımı ve Kyoto Protokolünün Avrupa Birliği Ülkelerinde 2010 yılında CO2 emisyonlarının 1990 yılı baz alınarak % 8 azaltılması hedeflerine ulaşılması sağlanacaktır. MED 2010 projesine EİE İdaresi Genel Müdürlüğü rüzgar enerjisi konusunda katılmıştır.

İRESMED (Integration of Renewable Energies into Electricity Network) projesi Avrupa Birliği JOULE ve INCO programı kapsamında finanse edilmiş olan bir projedir. Proje, kırsal alan sertifikasyonu için güneş enerjisi ve rüzgar gücünün elektrik üretimine entegrasyonu sağlamak olmak üzere iki ayrı çalışma grubunda yürütülmektedir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Rüzgar

En basit ifadeyle havanın hareketine rüzgar adı verilmektedir. Bilindiği üzere atmosferin toplam enerjisi, kinetik ve potansiyel enerji olarak ikiye bölünmüştür. Rüzgarlar, temel olarak basınç kuvvetlerinin etkisi ile potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur. Dünya üzerine düşen güneş enerjisi atmosferde geniş bölümlerde farklı şekillerde oluşumlara ve etkilere sebep olur. Ekvator civarında hava ile temas halinde bulunan sıcak ve nemli hava konveksiyonla yükselir, yükseldikçe soğur, belli bir seviyeye yükseldikten sonra daha soğuk olan kuzey enlemlere doğru yönelir ve 30° kuzey enlemlerine yaklaşıncaya kadar tekrar yer yüzeyine doğru alçalır. Burada nispeten daha soğuk ve kuru olan hava ekvatora doğru yönelir. Buna “Hadley Sirkülasyonu” denir. Dünyanın dönüşü sebebi ile meydana gelen Coriolis Kuvveti nedeniyle havanın hareketi, hareket yönünden sağa doğru saptırıldığından $0^\circ - 30^\circ$ enlemleri arasında yer yüzeyinde oluşan rüzgarlar temel olarak Kuzey-Doğu karakterli olurlar (11).

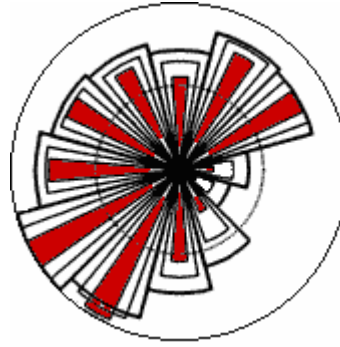


Şekil 3.1. Atmosferin genel dönüşümü

Rüzgar yönü ve şiddeti ile tanımlanır. Rüzgar hızı ölçümleri genellikle analog veya sayısal anemometreler vasıtasıyla yapılmaktadır. Bunlar arasında kupa anemometre,

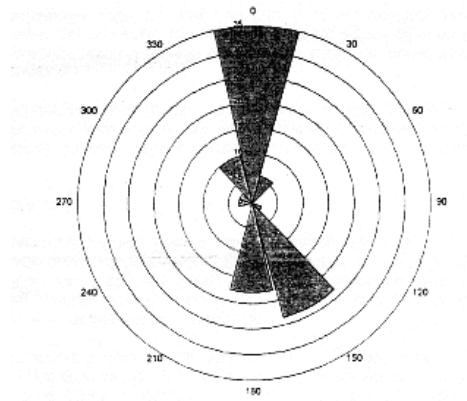
pervane tipli anemometre veya ultrasonik anemometre gibi farklı çeşitler bulunmakla birlikte en yaygın olarak kullanılanı kupa anemometrelerdir (11).

Rüzgar yönü ve şiddeti belirlendikten sonra kayda alınan verilerle rüzgar gülleri elde edilir. Rüzgar gülü 360°'lik alanı süpürür ve 30°'lik açılarla 12 eşit parçaya bölünmüştür (11).



Şekil 3.2. Rüzgar Gülü

Rüzgar gülü mikrokonuslandırma çalışmaları yaparken iyi bir gösterge olmakla beraber zaman zaman yanıltıcı olabilmektedir. Mikrokonuslandırma çalışmalarında rüzgar gülü yerine daha iyi bir gösterge olan enerji gülü tercih edilmelidir. Böylece rüzgarın geldiği yön değil; enerjinin geldiği yön dikkate alınmış olacaktır (11).



Şekil 3.3. Enerji Gülü

3.1.1. Rüzgar hızının yükseklikle değişimi

Meteorolojik veriler gösteriyor ki herhangi bir yükseklikteki hız ile diğer bir yükseklikteki hız farklıdır. Yer yüzeyine yaklaştıkça rüzgarın hızı azalmaktadır. Bu olay genelde rüzgar kesme olarak adlandırılır ve rotor tasarımında kullanılır. Yerden 5 km yükseklikte ise rüzgar hızı artık yüzey şekilleri ve hareketlerinden etkilenmemektedir. Birçok araştırmacının kabul ettiği şekilde eşitlik;

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \quad [3.1]$$

V_0	= Ölçülen rüzgar hızı	(m/sn)
H_0	= Rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik	(m)
V	= Bulunmak istenen rüzgar hızı	(m/sn)
H	= Rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik	(m)
n	= Pürüzlük katsayısı	$0,10 < n < 0,40$

olarak verilmiştir (12, 13).

Pürüzlülük katsayısı, düz yüzeylerde (deniz, kar kaplı alanlar) 0,10-0,13 iken, yüksek binaların bulunduğu şehirlerde ise, 0,27-0,40 arasında değişir.

Rüzgar enerjisi ise;

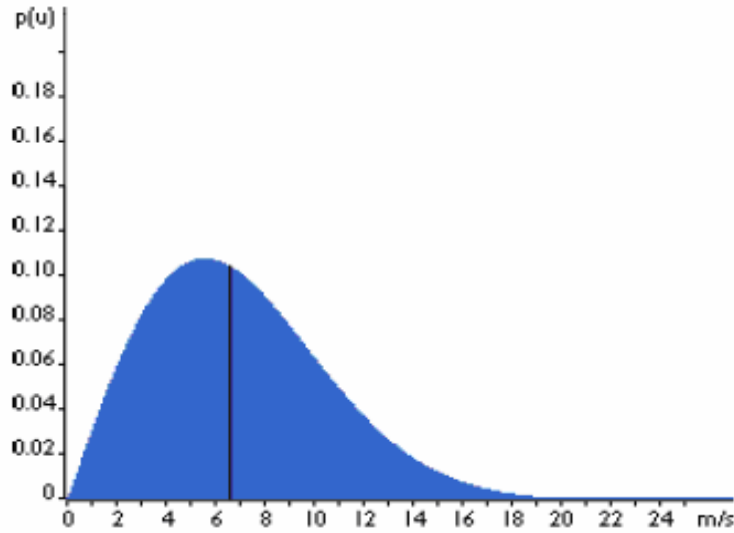
$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{3n} \quad \text{ve} \quad [3.2]$$

$0,30 < 3n < 1,20$ olacaktır (12, 13).

Rüzgar yüksekliğe bağlı olduğu kadar yüzey şekillerine göre de farklı özelliklere sahip olacaktır. Yüksek tepelerin önündeki rüzgar hızı ve şekli ile tepelerin arkasındaki şekil aynı olmayacaktır (12,13).

3.1.2. Frekans histogramı ve rüzgar hızı (weibull) dağılımı

Frekans histogramı rüzgar şiddeti sınıflarına karşılık gelen esme yüzdelерini (frekans) gösteren grafiksel bir gösterimdir. Frekans tablosundaki bilgiler yardımıyla hazırlanabilecek bu grafik yardımıyla incelenen alanda hangi rüzgar şiddeti diğerlerinin daha sık gözlemlendiği tespit edilebilmektedir. Histograma veri saklamada bir tasarruf yapmak amacıyla bir istatistiksel dağılım fonksiyonu olan 2 parametrelі bir weibull dağılım fonksiyonu uydurmak mümkündür. Böylece verinin tamamını saklamak ve kullanmak yerine sadece Weibull parametrelerini kullanarak, hesap yapmak mümkün olacaktır.



Şekil 3.4. Frekans histogramı ve weibull dağılımı

Weibull dağılım fonksiyonu aşağıda verilen eşitlikle tanımlanır.

$$\phi_{(u)} = \frac{k}{A} \left[\frac{u}{A} \right]^{k-1} \exp \left[- \left[\frac{u}{A} \right]^k \right] \quad u > 0 \quad [3.3]$$

Burada,

u : rüzgar hızı

A : ölçek parametresi

k : şekil parametresi'dir.

Uydurulan weibull dağılım fonksiyonu ne kadar iyi olursa olsun mutlaka bir hata payı içerecektir. Gözlem sayısı azaldıkça ve/veya mod değeri küçüldükçe uydurulan dağılım fonksiyonundaki hata miktarı genel olarak artacaktır. Özellikle iki tepe noktası bulunan frekans histogramlarında 2 parametrelili weibull dağılım fonksiyonu çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bazı ticari programlarda tercih edilen yüksek rüzgar şiddeti değerlerine daha fazla ağırlık verilmesi zaman zaman ham veri ile weibull fonksiyonu kullanılarak hesaplanan enerji üretim miktarlarında ciddi farklılıklar yaratmaktadır (11).

3.2. Hız ve Güç Bağıntıları

Rüzgardaki enerji, sahip olduğu hız dolayısıyla taşıdığı kinetik enerjidir.

$$\frac{1}{2} m u^2 \quad [3.4]$$

buradaki m , v hacminden u hızıyla geçen havanın kütlesidir. Kütle,

$$m = \rho \cdot v \quad [3.5]$$

ρ = havanın yoğunluğu

olduğuna göre, S alanından t zamanında u şiddetiyle geçen hava hacmi,

$$v = S \cdot u \cdot t \quad [3.6]$$

Ve havanın kütlesi de,

$$M = \rho \cdot S \cdot u \cdot t \quad [3.7]$$

olacaktır. Sonuç olarak rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji,

$$E_k = \frac{1}{2} \rho S u^3 t \quad [3.8]$$

Güç ise,

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \rho S u^3 \quad \text{Watt} \quad [3.9]$$

şeklinde bulunur. Rüzgarın sahip olduğu güç yoğunluğu ise,

$$E = \frac{P}{S} = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad \text{Watt/m}^2 \quad [3.10]$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buradaki güç, rüzgar şiddeti ve dolayısıyla güç yoğunluğu anlık değerleridir (11, 14).

Güç ifadesi incelendiğinde kanatların kestiği alanla ve en önemlisi de rüzgarın hızının küpü ile orantılı olduğu görülecektir. Görüldüğü gibi rüzgarın sahip olduğu güç, hava yoğunluğuna bağlıdır. Hava yoğunluğu şu eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\rho = \frac{P}{RT} \text{ kg/m}^3 \quad [3.11]$$

P	: basınç	hPa veya N/m ²
R	: havanın özgül gaz sabiti	(287,16 J/kg°K)
T	: sıcaklık	(°K)

Enerji üretimi hesapları yapılırken seçilen rüzgar türbininin güç eğrisi proje sahasının hava yoğunluğuna göre düzeltilmelidir. Bu işlem yapılırken kanat açılarındaki değişiklikler dikkate alınmalıdır.

Bunun yanı sıra hava yoğunluğunun yükseklikle değişeceği için düzeltilmesi gerektiği bilinmelidir. Hava yoğunluğunun yükseklikle değişimi şu bağıntıyla verilmektedir (11).

$$\rho = \left(\frac{P_0}{RT} \right) \exp \left(\frac{-gz}{RT} \right) \quad [3.12]$$

P_0 : Deniz seviyesinde hava basıncı (1013,25 N/m²)
 g : yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²)
 z : deniz seviyesinden yükseklik .

3.2.1. Rüzgardan güç elde edilmesi

Rotor kanatlarından gerçek gücün elde edilmesi, hava akıntısına karşı ve aynı yöndeki rüzgar güçleri arasındaki farklılıktır.

$$P = \frac{1}{2} \text{ saniyedeki kütle akış oranı } (V^2 = V_0^2) \quad [3.13]$$

P_0 = Rotordan açığa çıkartılan mekanik güç (türbin çıkış gücü)

V_0 = Rotor kanatları girişindeki rüzgar hızı

V = Rotor kanatları çıkışındaki rüzgar hızı

Havanın şiddeti devamlılık göstermez ve V 'den V_0 'a kadar değişebilir. Rotor kanatlarının duyarlılığı, tasarımı, aerodinamiğiyle ilgilidir. Dönen kanatlardan akan hava kütlelerinin akış oranı, ortalama şiddetli yoğunluğun çoklanması ile bulunabilir.

$$\text{Kütle akış oranı} = \rho A \frac{V + V_0}{2} \quad [3.14]$$

Rotordan ortaya çıkarılan mekanik güç;

$$P_0 = \frac{1}{2} \left(\rho A \left(\frac{V + V_0}{2} \right) \right)^2 V^2 - V_0^2 \quad [3.15]$$

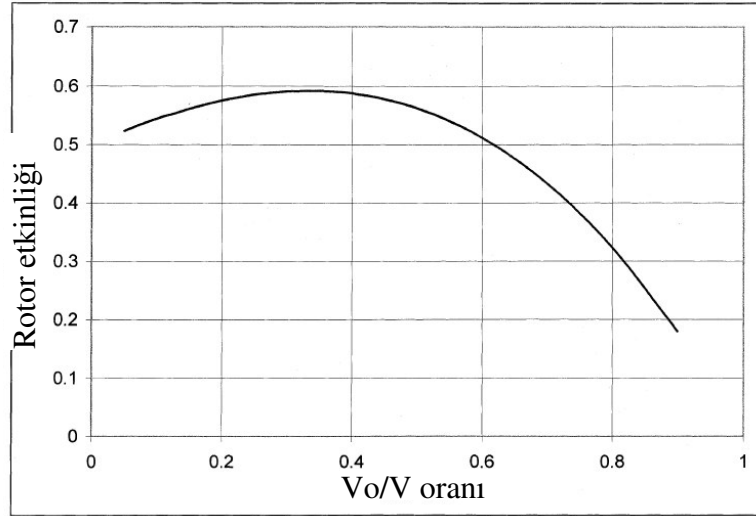
ifade düzenlenirse,

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V} \right) \left(1 - \frac{V_0}{V} \right)^2}{2} \quad [3.16]$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad [3.17]$$

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V} \right) \left(1 - \frac{V_0}{V} \right)^2}{2} \quad [3.18]$$

C_p , rüzgar gücüne karşı koymanın bir sonucudur ve rotor kanatları tarafından oluşturulur. Rotorun güç katsayısı veya rotor etkinliği olarak adlandırılır.



Şekil 3.5. $C_p - V_0 / V$ değişimi

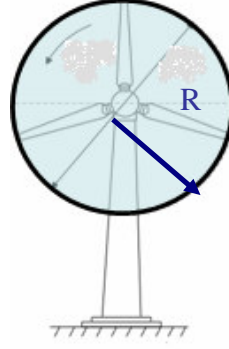
Şekil 3.5’de $C_p - V_0 / V$ oranı verilmiştir. Görüleceği gibi $C_p = 0,59$ teorik olarak elde edilebilecek maksimum değerdir. İlk defa 1919 yılında formülize edildi ve Betz limiti olarak bilinir. Pratik olarak iki kanatlı ve yüksek hızlı sistemlerde 0,5 düşük hızlı ve çok kanatlı sistemlerde 0,2-0,4 civarındadır (13-17).

3.3. Rotor Süpürme Alanı

Güç denkleminde daha önce verildiği gibi rüzgar türbininin güç çıkışı rotor süpürme alanı ile doğrusal bir değişkenlik gösterir. Yatay eksenli türbin için rotor süpürme alanı;

$$A = \pi R^2 \quad [3.19]$$

R: Rotor boyu (kanat uzunluğu)



Şekil 3.6. Rotor süpürme alanı(13, 14, 17).

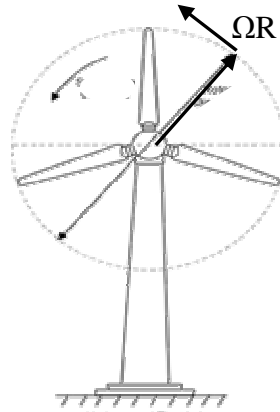
3.4. Kanat Uç Hız Oranı (λ)

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad [3.20]$$

Ω = Rotasyonel hız (rad/sn)

R = Rotor yarıçapı

V = Serbest rüzgar hızı olarak tanımlanır.

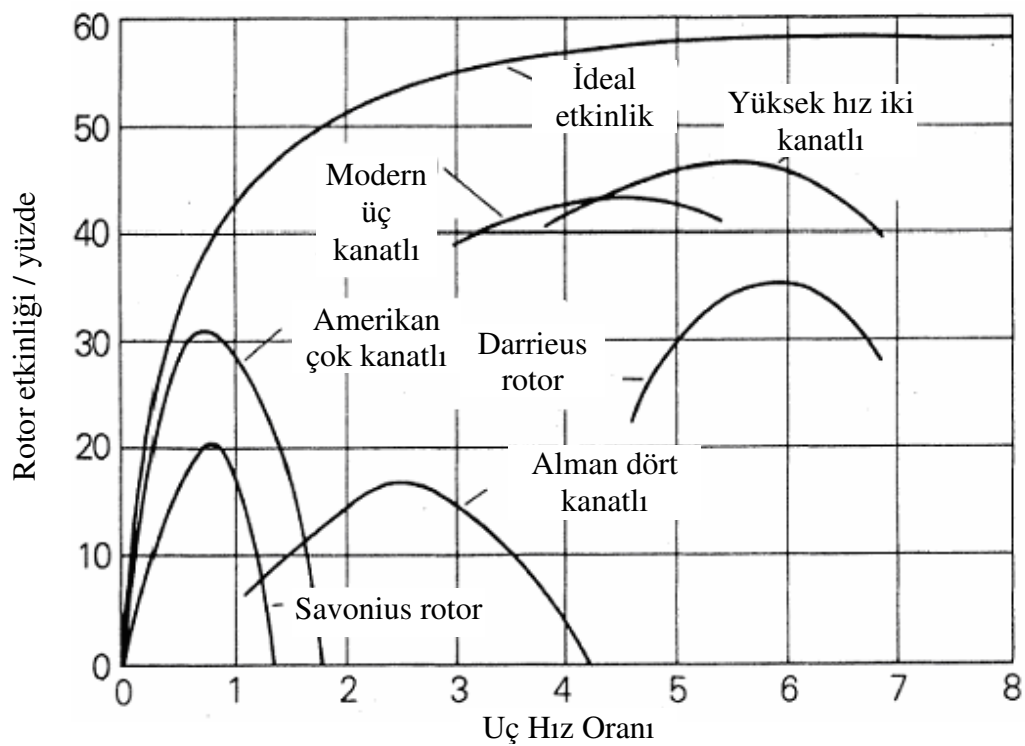


Şekil 3.7. Kanat uç hız oranı

Kanat sayısı ile kanat uç hız oranı (λ) arasındaki ilişki Çizelge 3.1’de ve Şekil 3.8’de verilmiştir (14, 17).

Çizelge 3.1. Kanat sayısı – λ değişimi (12).

Kanat Sayısı	λ
8-24	1
6-12	2
3-6	3
2-4	4
2-3	>5

Şekil 3.8. Farklı kanat yapılarında C_p - λ değişimi (14)

Bunun yanı sıra gücün, hızın küpüyle orantılı olduğu göz önüne alınırsa, bu faktörlerin önemi daha da artacaktır. Değişik hızlı sistemler için;

$$P = 0,15D^2V^3 \quad [3.21]$$

olarak belirlenir.

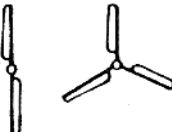
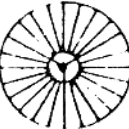
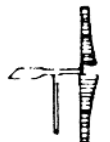
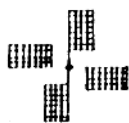
P: Rüzgardan elde edilebilecek teorik güç

D: Türbin çapı (18).

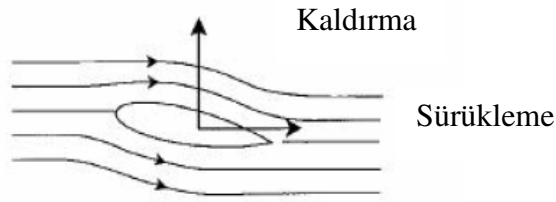
3.5. Rüzgar Türbinleri

Çizelge 3.2’de çoğunlukla kullanılan türbin tipleri ve onların kullanım alanları verilmiştir (15, 18).

Çizelge 3.2. Kanat tipleri ve özellikleri

Rotor Tipleri	λ^{**}	C_p^{**}	RPM	Tork Kullanım Yeri	
PERVANE TİPİ 	6 10	0.42	Yüksek	Alçak	Elektrik üretimi
DARRIEUS TİPİ 	5 6	0.40	Yüksek	Alçak	Elektrik üretimi
CYCLOGIRO TİPİ 	3 4	0.45	Orta	Orta	Elektrik üretimi veya su pompalama
ÇOKKANATLI TİP 	3 4	0.35	Orta	Orta	Elektrik üretimi veya su pompalama
YELKEN KANAT TİPİ 	4	0.35	Orta	Orta	Elektrik üretimi veya su pompalama
FAN TİPİ 	1	0.30	Alçak	Alçak	Su pompalama
SAVONIUS TİPİ 	1	0.15	Alçak	Yüksek	Su pompalama
HOLLANDA TİPİ 	2 3	0.17	Alçak	Yüksek	Su pompalama veya değirmen

Rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar sürüklenme (drag) ve kaldırma (lift) kuvvetleridir. Sürüklenme cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Kaldırma kuvveti ise akış yönüne dik olarak meydana gelir (17).



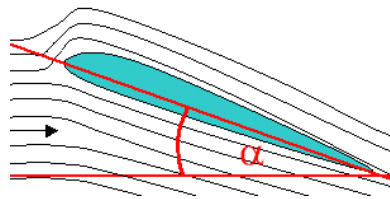
Şekil 3.9. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri

Rüzgar türbinleri tasarımında aşırı rüzgar yükü durumları, fırtınalı durumlar dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Rüzgardan elde edilen güç, rüzgar hızının küpüyle orantılı olduğundan çok yüksek rüzgar hızları kanatlara çok yüksek güçlerle baskı yapacaktır (17).

Kanatlar, çok fazla yıpratıcı güçlere maruz kalmaması için özellikle elektrik üretim amaçlı olanlar az sayıda, uzun ve dar kanatlı olarak imal edilirler. Türbinin daha hızlı dönmesi içinde dar kanatlı olarak imal edilirler (19).

3.5.1. Kanat profili (airfoil)

Cismin referans hattı ile hava akışı arasında yaptığı açı “hücum açısı (angle of attack) olarak adlandırılır ve α ile gösterilir.



Şekil 3.10. Hücum açısı gösterimi

Hafif bombeli yüzeyler verilen bir hücum açısı için daha yüksek bir kaldırma kuvveti meydana getirirler. Dolayısıyla airfoil (kanat hava akış profili) denen bu tip şekiller bu durum için uygundur (20).



Şekil 3.11. Airfoil kanat profili

Kanat profillerinde sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin özellikleri, rüzgar tünellerinde yapılan testlerle belirlenmektedir. Bu testlerde farklı hücum açılarında birimsiz büyüklükler olan sürüklenme katsayısı (C_D) ve kaldırma katsayısı (C_L) hesaplanır. Bu katsayılar yardımı ile türbin için en uygun kanat yapısı tasarlanır (6).

Sürüklenme katsayısı (C_D):

Herhangi bir kanat profili için sürüklenme katsayısı aşağıdaki ifade ile verilir.

$$C_D = D / (0.5 \rho V^2 A) \quad [3.22]$$

Burada;

D : Sürüklenme kuvveti	(N)
ρ : Hava yoğunluğu	(kgm^{-3})
V : Rüzgar hızı	(m/sn)
A : Kanat alanıdır	(m^2) (6, 17, 21).

Kaldırma katsayısı (C_L):

Kanat profilleri için kaldırma katsayısı ise;

$$C_L = 0.5 \rho V^2 A \quad [3.23]$$

Eşitlikte kullanılan L indisi kaldırma kuvvetini ifade etmektedir (6, 17, 22).

Her iki katsayı da rüzgar tünellerinde farklı hücum açıları ve rüzgar hızlarında hesaplanmaktadır. Her bir hücum açısı için hesaplanan C_D ve C_L değerlerinin oranı C_D / C_L alınır, bu oranların en büyük olduğu değerdeki hücum açısı değeri, rüzgar türbinlerinden en iyi verim alınabilecek değerdir (6).

Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine göre yatay ve düşey eksenli olmak üzere iki kısma ayrılırlar.

3.5.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Dikey bir eksenle dairesel bir hareket yaparlar ve böylece herhangi bir yönden gelen rüzgarı karşılama zorluğu yoktur. Güç ortaya çıkarmak daha kolaydır. Jeneratörü, dişli kutusunu vs. yere yerleştirilebilir ve makine için bir kuleye ihtiyaç duyulmaz. Rotoru rüzgara karşı çevirmek için bir sapma mekanizmasına ihtiyaç yoktur. Fakat, rüzgar hızı toprağa yakın mesafelerde düşüktür, dolayısıyla kuleden tasarruf edilmesine rağmen verim azalmaktadır. Kendi kendine başlama problemleri vardır. Makineyi tutmak için çelik tellere ihtiyaç duyulabilir (14, 18, 19).

Başlangıç zorlamasında güçlü fakat devamlı olmayan dönmeler periyodik değişiklikler ortaya koymakta ve bu da güç regülasyonunda elverişli olmayan bir durumdur. Dikey eksenlilerden güç ortaya çıkarmak nispeten daha kolaydır (8).



Resim 3.1. Dikey eksenli darrieus rüzgar türbini

3.5.3. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Genellikle yatay eksenli rüzgar türbin tipleri kullanılır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri daha gelişmiş ve genellikle çok daha fazla tasarlanmışlardır. Tasarım sayılarının genişliği, ticari yönden elverişli ve kullanışlıdır. 50 W'tan 1,8 MW'a kadar üretilmektedir. Tarımda kullanılan rüzgar türbinlerinde olduğu gibi genellikle birden çok kanat kullanılarak tasarlanmaktadır. En iyi elektrik üretimini ucuz şekilde sağlamak için iki veya üç kanatlı jeneratörlerin kullanımı yeterli verimliliği sağlamaktadır. Mekanik ve aerodinamik ayar üç kanatlı rotor için daha uygundur. Küçük rüzgar türbinlerinde genellikle üç kanat kullanılır. Çok kanatlı rüzgar türbinleri tarımda su pompalarında kullanılır. Yatay bir eksenle dairesel bir hareket yaparlar. Kullanım alanları oldukça geniştir (8, 19).



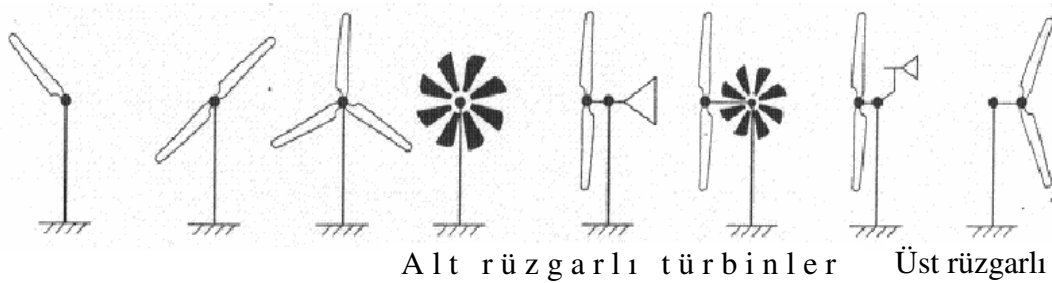
Resim 3.2. Yatay eksenli rüzgar türbini- Enercon E-112. 4,5 MW

3.5.4. Üst rüzgarlı (upwind) türbinler

Bu türbinlerde rotor, rüzgar tarafına bakar. Bu tasarımın temel avantajı kulenin arkasındaki rüzgar gölgesini önlemesidir. Temel dezavantajı ise rotorun daha az esnek olma ihtiyacı ve kuleden biraz uzağa yerleştirilmesi gereğinden kaynaklanır ki bazı üreticiler bunu yüksek maliyetli bulurlar. Bir sapma mekanizmasına ihtiyaç duyarlar (14, 18).

3.5.5. Alt rüzgarlı (downwind) türbinler

Bu türbinlerde rotor, kulenin rüzgar altı tarafındadır. Sapma mekanizmasına ihtiyaç duyulmadan da imal edilebilmektedirler. En önemli avantajı rotorun daha esnek imal edilmesi olarak karşımıza çıkar. Üst rüzgarlı türbinlere göre daha hafiftir (14, 18).



Şekil 3.12. Alt ve üst rüzgarlı türbinler (13)

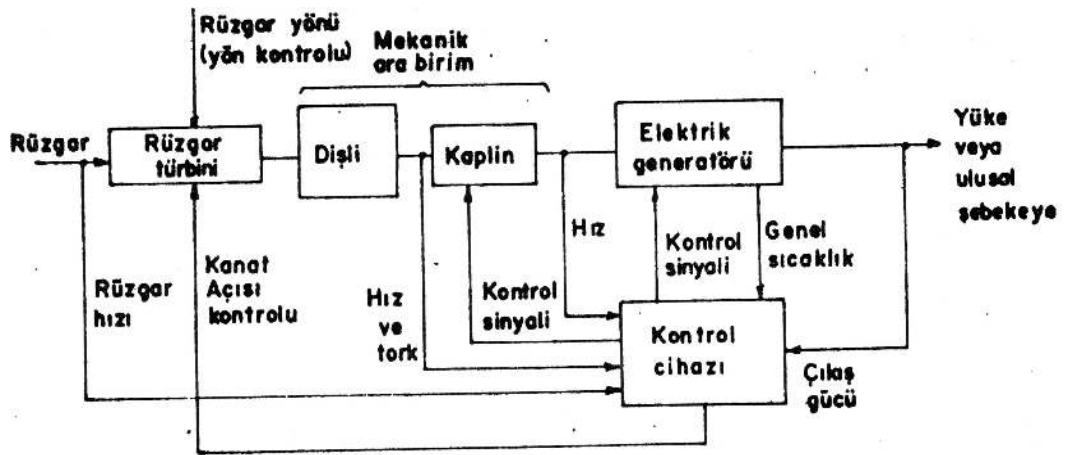
Rüzgar türbinleri farklı kanat sayılarına sahiptir. Temel kural ise, kanat sayısının azalması ile dönüş hızının artmasıdır. Bunun tersi olarak da kanat sayısı arttıkça rotorun torku artmakta fakat dönüş hızı azalmaktadır. Bu dönüşüm ölçüsü olarak uç hız oranı (tip speed ratio) denen bir parametre tanımlanmıştır. λ ile gösterilen bu oran pervane dönüş hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır. Eğer $\lambda = 1$ ise, pervane dönüş hızının rüzgar hızına eşit olduğu görülür. Değişik rüzgar hızlarında sabit bir atalet momentine sahip olmasıdır. Ayrıca istenen kanat uç hız oranı da elde edilmektedir (8).

3.6. Rüzgar Jeneratörleri

Elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan rüzgar türbinleri az kanatlı ve yüksek hızlı makinelerdir. Yüksek hızda çalışmalarının nedenleri;

- Eşit çaptaki yüksek hızlı bir rüzgar türbini düşük hızlı bir rüzgar türbininden daha hafif dolayısıyla daha ekonomiktir.
- Dönme hızları daha yüksek olduğu için gerekli çevrim oranı daha düşüktür. Bu nedenle dişli kutusu daha hafiftir.
- Elektrik jeneratörünün çalışmaya geçmesi için gerekli başlangıç torku küçüktür.

Rüzgar elektrik sistemlerinin temel bileşenleri şekil 3.13’de gösterilmiştir. Hareketli havadan mekanik enerji şeklinde elde edilen enerji, uygun bir kaplin ve dişli kutusu içeren mekanik aktarıcı yoluyla elektrik jeneratörüne aktarılır. Jeneratörden alınan elektrik çıkışı, uygulamaya göre bir yüke veya güç şebekesine bağlanır (18).

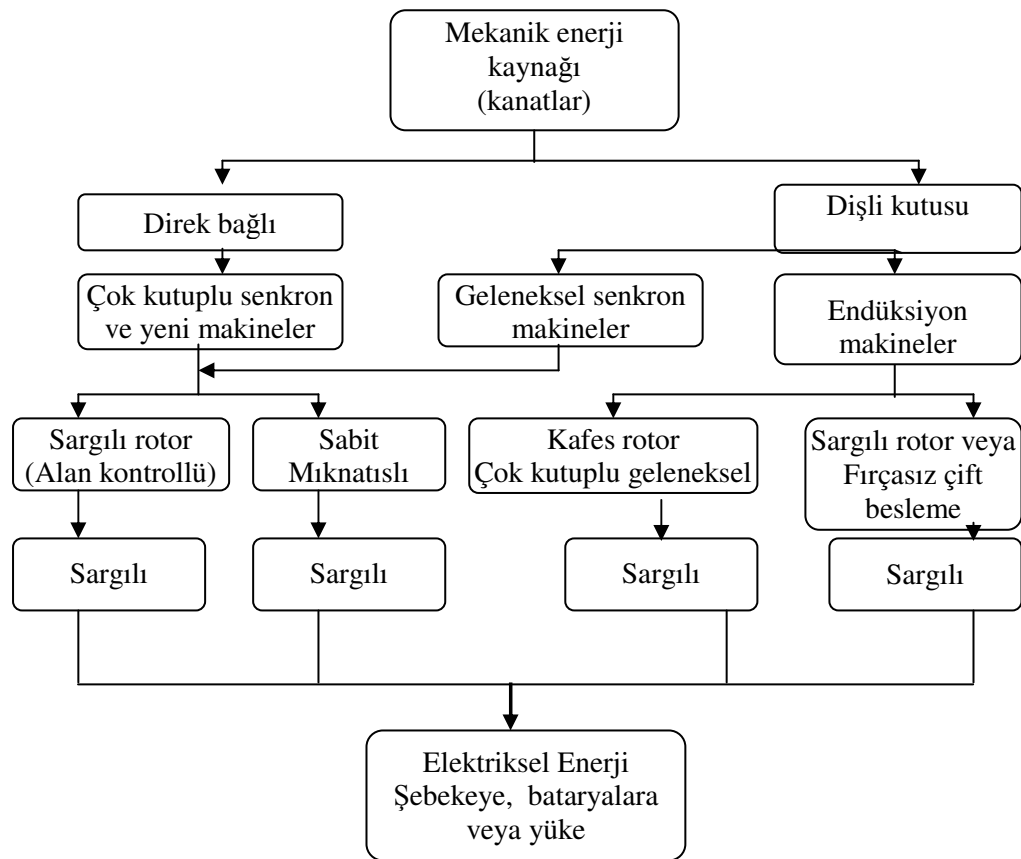


Şekil 3.13. Rüzgar elektrik sisteminin basit bileşenleri

Bu tür sistemde kullanılan kontrol cihazı bir ya da daha fazla noktada rüzgar hızı ve yönü, mil hızları ve torkları (Döndürme momenti), çıkış gücü ve gerekliyse jeneratör sıcaklığını algılayarak kanat açısı kontrolü, yön kontrolü (sadece yatay eksenli

makinelerde) yapmak ve rüzgar enerji girişi ile elektrik çıkışını eşlemek amacıyla jeneratör kontrolü için uygun sinyalleri üretir (18).

Rüzgar türbinlerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemleri gösteren akış şeması aşağıda verilmiştir (23).



Şekil 3.14. Rüzgar türbinlerinde mekanik enerji-elektrik enerji dönüşüm şeması

En genel olarak üç tip elektrik jeneratörü kullanılır. Bu jeneratörler;

- 1 - DC Jeneratörler
- 2 - Senkron jeneratörler veya Sabit Mıknatıslı Senkron jeneratörler.
- 3 - Asenkron jeneratörler (Endüksiyon jeneratör)

3.6.1. DC jeneratörler

Bütün makineler esasta alternatif akım makineleridir. Çünkü endüktör dönmesi, kuzey ve güney kutupların manyetik akısından kaynaklanır. DC makine, AC'yi DC'ye çevirmek zorundadır. Mekanik komütatörleri kullanarak komütatör performansları kayan karbon fırçalarındaki bakır segmentlerin bir fonksiyonudur. Devamlı olarak pozitif çıkış elde edilir. Dönen kontaklar sonuçta düşük güvenilirlik ve yüksek bakım maliyeti ister. Bu DC makinenin dezavantajıdır, fakat kolay hız kontrolü sağlanmasından dolayı 1980'lere kadar büyük oranda kullanılmıştır. Küçük ve lokal rüzgar işletmelerinde kullanılmaktadır. DC makineler komütatör, fırça bakım problemleri yüzünden gözden düşmüştür (8, 14).

Geleneksel DC makine, ayrıca kendinden uyartımlı, dc akımdan bir manyetik alan oluşturan şönt veya seri bobinleri taşır. Bugünlerde DC makineler genellikle sabit mıknatıslı olarak kullanılmaktadır. Rotor sürekli manyetik akıyı sağlayan sabit mıknatıslardan oluşur. Stator ise iletken sarımlarından oluşur ki üzerinde gerilim endüklenen kısımdır. Kullanılan DC makinelerin üzerinde komütatör fırça düzeni yoktur. Elde edilen gerilim daha sonra yarı iletken doğrultucularla doğrultulur. Sonuçta güvenli bir şekle dönüştürülmüş olan DC makine küçük rüzgar türbinlerinde kullanılır. Sürekli mıknatısla elde edilebilecek manyetik alan sınırlı olduğundan dolayı fırçasız DC makineler 100 kW'a kadar imal edilebilmektedir (14).

3.6.2. Senkron jeneratörler veya sabit mıknatıslı senkron jeneratörler

Senkron jeneratörler:

Sabit- hızlı bir hareket vericiden yararlanarak sabit frekanslı AC elektrik üreten senkron makinelerinin teknolojisi yaygın ve gelişmiş özelliktedir. Jeneratör makinedeki kutup sayısı ile ilgili senkron hız adı verilen sabit bir hızda çalışmalıdır. Bu makinelerde çıkış frekansı;

$$\text{Çıkış frekansı} = N \times \text{Kutup Sayısı} / 120 \text{ olarak verilir (14).}$$

[3.24]

Senkron makinelerin şebeke ile paralel çalışması için üretilen hız sabit olmalıdır ve % 1-2 oranındaki çok küçük dalgalanmalar saniyenin bölümleri gibi yalnızca çok kısa süreler için kabul edilebilir. Rüzgar sürücülü senkron makinelerde bu koşulun yerine getirilmesi aşağıdaki nedenlerden dolayı zordur;

- Rüzgar girişindeki sürekli dalgalanmalar,
- Elektriksel çıkışın hız değişimlerine duyarlılığı,
- Makinenin şebekeden güç çekme ve motor olarak çalışma gibi özellikleri (18).

Bu problemler jeneratör mili ile dişi kutusu arasında uygun bir kuplaj kullanılarak aşılabilir. Maksimum torka sınırlama getiren kuplajlar en iyi performansı ortaya çıkarır.

Rüzgar sürücülü jeneratörün şebeke hatları ile senkronlanması özellikle ani piklerde önemli bir problemdir. Bilgisayar simülasyon çalışmaları düzensiz senkronizasyonun, etkin bir hız kontrol sistemi uygulanması ve otomatik senkronlama cihazı kullanımı ile sınırlı geçişlerle başarılabileceğini göstermiştir (18).

Ani rüzgarlar nedeniyle oluşan aşırı yükleri önlemek ve jeneratör çıkışını nominal değerde sınırlamak için kanat açısı kontrolünde çok yüksek performans gereklidir. Ayrıca şebeke ile paralel çalışma durumunda rüzgar- sürücülü senkron jeneratörün şebeke ile paralel çalışmasında elektriksel kararlılığını artırmak için uyarım kontrol mekanizması kullanılabilir (18).

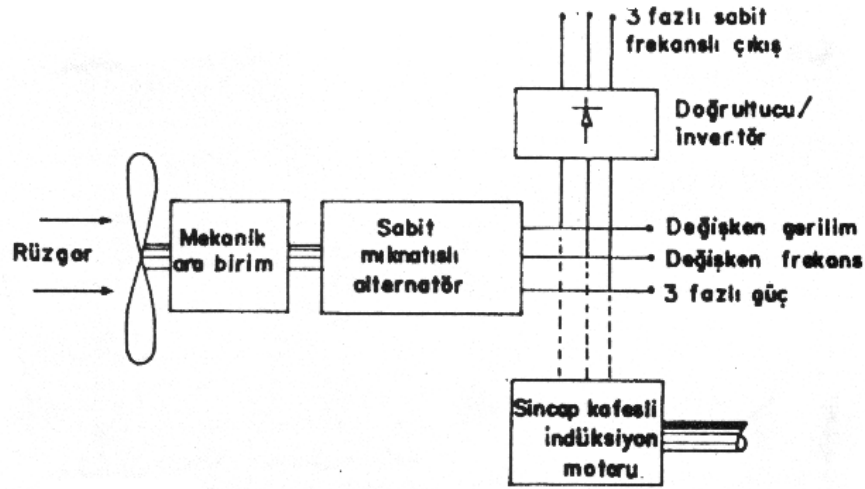
Elektriksel güç üretmekte en çok kullanılan kendini kabul ettirmiş bir makinedir. Senkron makine sabit hıza bağlı olarak sabit frekansta çalışır. Bu sebepten dolayı değişken hızlı rüzgar türbin uygulamaları kullanımı için uygun değildir. Fakat fırça ve komütatör bakımı olmaması avantajıdır. Güvenliğinin yanı sıra bakım ve işletme maliyeti de çok düşüktür. Relüktans senkron jeneratör şimdilerde küçük rüzgar türbinleri için geliştirilmekte ve 10'larca kW'a kadar kullanılmaktadır. Senkron makinenin ideal kullanımı, solar termal güç alanları ile birlikte sabit hızda

kullanılmasıdır. Şebekeye bağlı sistemlerde kullanılması reaktif güç ihtiyacı olmamasından dolayı uygundur. Fakat şimdilerde daha çok endüksiyon makine kullanılmaktadır (14).

Rüzgardan elektrik üretme şekillerinin en basitlerinden biri Şekil 3.15'te gösterilen sabit mıknatıslı alternatör kullanmaktır. Alternatörün statoru çok fazlı (iki veya üç fazlı) çıkış için sarılır ve rotor dış kenarında mekanik olarak yerleştirilmiş değişken kutuplu sabit mıknatıslılar bulunur. Çıkış frekansı kutup sayısının yarısı ile dönme hızının çarpımına eşittir. Açık devre (yüksüz) koşullarında çıkış gerilimi de döner hızla orantılıdır. Bununla birlikte yük altında endüvi reaksiyonu etkileri ve iç empedans düşümü nedeniyle bu orandan sapma ortaya çıkabilir (18).

Eğer rüzgar jeneratörü sabit hızda işletiliyorsa yük altındaki çıkış sabit frekansta fakat değişken gerilimde olacaktır. Değişken hızda işletilirse çıkış, değişken gerilim ve değişken frekansta olacaktır. Bu çıkışların her biri tam dalga doğrultucu evirici kombinasyonun(ac-dc-ac hat olarak da bilinir) ile sabit gerilim sabit frekanslı alternatif akıma dönüştürülebilir (18).

Konvansiyonel bir sincap kafesli motor statoruna değişken gerilim, değişken frekanslı güç uygulanarak değişken hız modunda çalıştırılabilir. Manyetik devrenin doyuma girmesini engellemek için, uygulanan gerilim frekans ile orantılı olarak değişmelidir. O zaman hava aralığı akışı yaklaşık sabit olacak ve tatmin edici işletim sonuçları elde edilecektir. Dolayısıyla rüzgarın sürdüğü değişken hız çıkışı olan sabit mıknatıslı alternatör bir endüksiyon motoruna bağlanabilir. Şekil 3 15'de noktalı hatlarla gösterildiği gibi (18).



Şekil 3.15. Sabit mıknatıslı alternatör kullanan sistem

Sabit mıknatıslı alternatörler ve endüksiyon jeneratörleri esas alınarak yapılan planlamalarda; bazı özelliklerinden dolayı örneğin düşük maliyet, basit imalat, arızasız ve daha az bakım istemesinden dolayı daha fazla kullanılmaktadır. Her nasılsa, güç elektroniğindeki ilerlemelerle sabit mıknatıslı senkron jeneratörün çıkışında değişken gerilim ve değişken frekans kontrolünü mümkün kılmıştır (8).

Sabit mıknatıslı makineler, geliştirilen yeni tasarımlarda daha fazla tercih edilmektedir. Çünkü istenilen çapta imal edilmesinin yanı sıra daha yüksek verimli işletilebilmektedir. Bu sabit mıknatıslı senkron jeneratör (Permanent Magnetic Senkron Generatör) makineler değişken hızlı rüzgar makineleri ile birlikte kullanılmaktadır. Daha geniş ve büyük güç sistem ağlarında, genellikle senkron jeneratörler kullanılır. Senkron jeneratörler hem aktif hem de reaktif güç sağlayabilmektedir. Bunların reaktif güç akışları kontrol edilebilmektedir. Senkron jeneratörler herhangi bir güç faktöründe işletilebilmektedir (8).

Sabit mıknatıslı senkron jeneratörde farklı rüzgar hızlarında, rüzgar jeneratörlerinin gerilim ve frekans sinyalinin değişimlerini, kontrol etmek amacıyla çevirici/ evirici kullanılabilir. Çevirici bu farklı sinyali DC sinyale çevirir ve Çevirici çıkışı istenilen büyüklük ve frekanstaki AC sinyale çevrilir (8).

Sabit mıknatıslı jeneratörler:

Sabit mıknatıslı makineler, yüksek enerjili sabit mıknatısların fiyatının düşmesi ile birlikte daha çok kullanılan baskın makineler olmuştur. Bu makineler bir çok eşsiz özellik sunarlar. Bu makineler daha verimlidir çünkü önemli sayılabilecek rotor kayıplarının azaltılmış yani alan uyartım kayıplarından kurtulmuştur. Böylece motor verimliliği oldukça geliştirilmiş ve yüksek güç yoğunluğu başarılmıştır. Sabit mıknatıslı motorlar, küçük manyetik ölçülerden dolayı küçük manyetik kalınlıktaki mıknatıslara sahiptir. Eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler, eksene dik akılı makinelerden belirgin bir şekilde daha fazla avantajlara sahiptir.

Araştırmacılar tarafından hava aralığı hesaplamaları ve motor tasarımları daha kolay yapılmaktadır. Çekirdek (nüve) malzeme kullanmadan yüksek güç çevrim oranı elde edilmektedir. Gürültü ve vibrasyon geleneksel makinelerden daha düşüktür. Ayrıca temel hava aralığı akısının yönlendirme çeşitliliği ve çok sayıda değişik topolojilere imkan vermektedir.

Eksenel akılı yüzey mıknatıslı sabit mıknatıslı makineler, farklı stator ve rotor sayıları ile kanallı ve kanalsız olmalarına göre sınıflandırılırlar (24).

Eksene dik akılı yüzey yerleşik sabit mıknatıslı makineler:

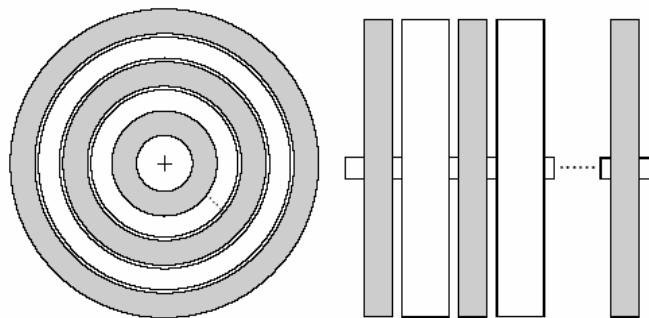
Geleneksel eksene dik akılı sabit mıknatıslı makineler son 10 yılda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Endüstride en çok kullanım alanı bulan sabit mıknatıslı makine tipidir. Bu makineler endüksiyon makinelerinden daha yüksek tork kapasitesine sahiptir. Endüksiyon makinelerinde olan rotor sargılarının olmayışı, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek torklu amper çevirme oranına sahiptir. İmalatta karşılaşılan en önemli dezavantajı, kanallı eksene dik akılı makinelerde mıknatısların rotora yerleştirilirken yerlerinden kaçması veya ayrılmasıdır. Stator yapısı kanalı olmayan yapıda ve çok sayıda istiflenmiş ince çelik plakalardan meydana gelmektedir. Sargılar statorda sarıldıktan sonra etrafı epoksi reçine ile kaplanmaktadır. Rotor yapısı yüzey monteli NdFeB mıknatıslar, rotor çekirdeği ve

şafttan oluşmaktadır. Bu makinelerde tork üretiminde, statorun rotora bakan yüzeylerinde veya statorun dış tarafta olmasına göre farklılıklar göstermektedir. Hava aralığının genişliği akı yoğunluğunda azalmalara sebep olmaktadır. Bu makinelerin en önemli avantajı statorun dış yüzeyde olmasından dolayı ısı transferi çok daha kolay olmakta ve gereksiz ısınma kolayca uzaklaştırılmaktadır. Bu yüzden daha fazla elektriksel yüklenmelere olanak vermektedir (24).

Eksenel akılı yüzey yerleşik sabit mıknatıslı makineler:

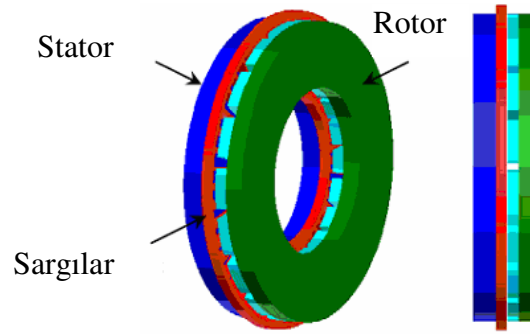
Eksenel akılı yüzeye yerleşik sabit mıknatıslı makineler ile ilgili ilk çalışmalar 70'li yılların sonlarında ve 80'li yılların başlarında yapılmıştır. Disk tip eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler özellikle 90'lı yıllarda artan ilgi sebebiyle geleneksel eksene dik akılı makinelere alternatif olmuştur (24).

Daha önce verildiği gibi eksenel akılı makinelerin eksene dik akılı makinelere göre bazı avantajları vardır. Bunlardan birincisi, daha az çekirdek malzeme kullanılması yüksek güç çevrim oranı ve yüksek verimdir. İkincisi, aynı güçteki eksene dik akılı makinelerden daha küçük boyutludur. Üçüncüsü, planlama ve uygun hava aralığı ayarlanması eksene dik makinelerden daha kolaydır. Üstelik ana hava aralığı akısının yönlendirilmesinde sağladığı çeşitlilik bir çok değişik seçeneği yapılmasına zemin hazırlamaktadır. Eksene dik ve eksenel akılı makinelerin çeşitli yapıları Şekil 3.16'de görülmektedir.



Şekil 3.16. Eksene dik ve eksenel akılı makine şekilleri

Eksenel akılı makineler temelde rotor yapılarına göre sınıflandırılırlar. Yani eksenel akılı iç sabit mıknatıslı makine demek rotor iç mıknatıs yapısına sahip demektir. Temel ve çok basit olan tek rotor ve tek stator yapılı eksenel makine Şekil 3.17’de verilmiştir.

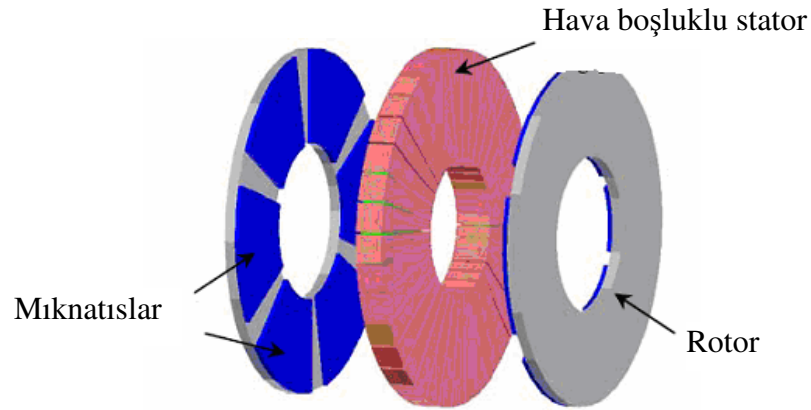


Şekil 3.17. Tek rotor ve tek statorlu basit eksenel akılı makine şekli

Stator ring şeklinde sargılardan oluşmakta ve epoksi benzeri malzeme içerisindedir. Dış kısmında akı yolunun tamamlanması için demir diskten oluşmaktadır. Rotor yarı çelik disk malzemeden oluşmakta üzerine mıknatıslar iyice yerleştirilerek manyetik alan oluşturulmaktadır.

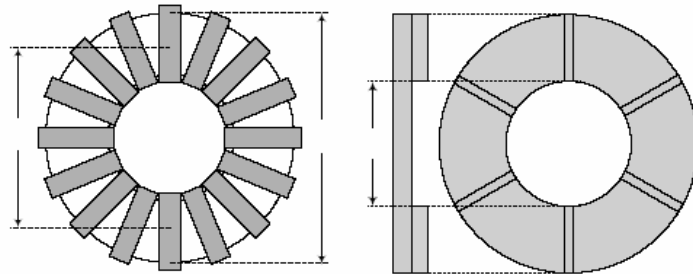
Eksenel akılı makinelerde en çok kullanılan tasarım, iki manyetik rotor bloğu arasındaki stator yapısıdır. Bu manyetik gücü döndürebilmek oldukça kolaydır. Bu yapıda statordaki bakır sargılardan güç elde etmek oldukça basittir.

Kanalsız TORUS (Simit şeklinde geometrik yapı) makine tipik olarak, çift rotor-tek stator, eksenel akı, sabit mıknatıs, kanalsız ve disk tipli yapıdadır. İdeal yapısı Şekil 3.18’de verilmiştir (24).



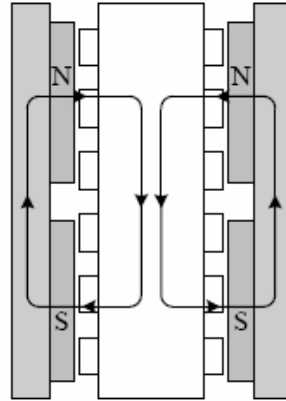
Şekil 3.18. Eksenel akılı Torus NS makine şekli

Makine ideal olarak, tek stator ve sandviç edilmiş iki sabit mıknatıslı rotor diskten oluşmaktadır. Rotor yüzeye monte edilmiş NdFeb mıknatıslardan, rotor çekirdeği ve şafttan oluşmaktadır. İki biçimlendirilmiş rotor diskte bulunan mıknatısların arasındaki eksenel akının döndürülmesi prensibine dayanmaktadır. Toroidal (simit şeklindeki yapıda eksene dik sarım şekli) sarımlı stator ve rotorun detaylandırılmış şekli verilmiştir (Şekil 3.19).

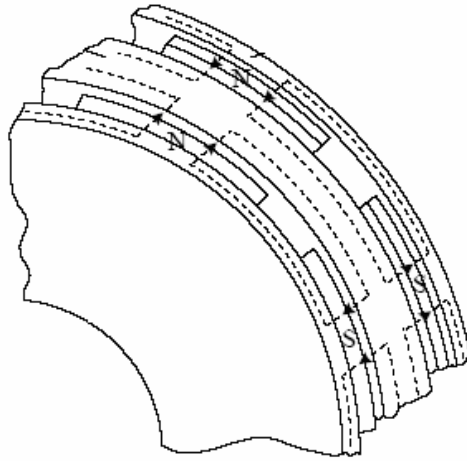


Şekil 3.19. Eksenel akılı torus NS makinenin detaylı şekli

Torus-NS makinenin basit akı yolu, iki ve üç boyutlu çizimleri Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir. N kutbundan çıkan manyetik akı hava yolu, stator sargıları, stator çekirdeği ve tekrar stator sargıları ile hava boşluğunu takip edip S kutbunda yolunu tamamlamaktadır (24).



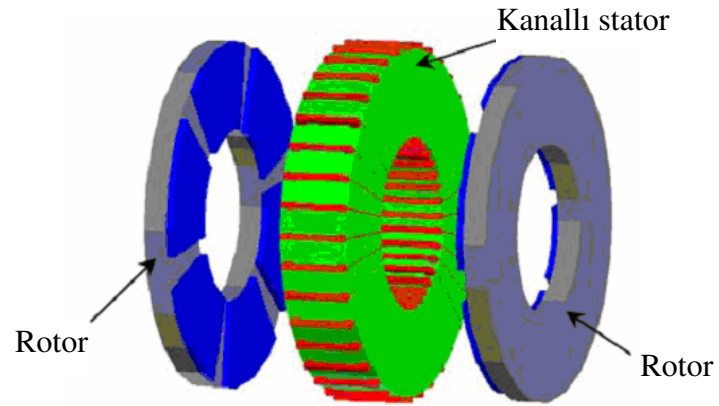
Şekil 3.20. Eksenel akılı torus NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli



Şekil 3.21. Eksenel akılı torus NS makinenin üç boyutlu akı yolu şekli

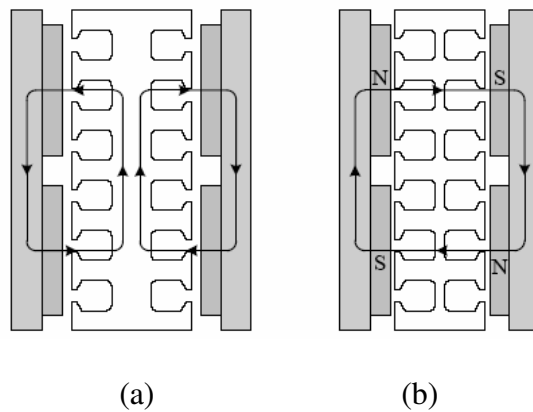
Kanalsız TORUS topolojisi yüksek güç çevrim veya yüksek tork çevrim oranına sahiptir. Çünkü kısa eksenel akı yoluna sahiptir. Ayrıca TORUS topolojisinde sargılar hava aralığında tork üretimi içinde kullanılır. Sargılar kısa olduğundan bakır kayıpları daha az ve ısı transferi daha kolay olduğundan daha verimlidir. Kanalsız hava aralıklı sargılarda, karşılıklı endüktans ve sızıntı değerlerinin düşük olmasını sağlamaktadır.

Yarıklardan dolayı akı dalgalanmaları, bozucu tork, yüksek frekans rotor kayıpları ve statordaki ince plakalarda doyumlar meydana gelmektedir. Bu makinelerin kendi endüktansları küçüktür. Şekil 3.22’de kanallı TORUS-NN tip makinenin ideal şekli verilmiştir (24).



Şekil 3.22. Eksenel akılı kanallı torus NN, yüzeye monteli tip sabit mıknatıslı makinenin şekli

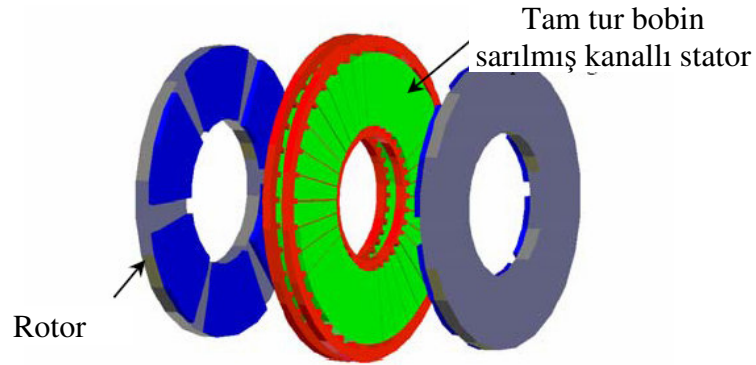
Statorda sargılar yarıklara sırt sırta bağlanmıştır. Yapı TORUS-NS makineye çok benzemektedir. Yine iki rotor arasında bir stator ve manyetik akı eksenel olarak hareket etmektedir. Sargılar çok kısa olduğundan dolayı bakır kayıpları az ve makine daha verimlidir. Şekil 3.23’de ve daha önce Şekil 3.21’de verildiği gibi TORUS-NN tip makinenin akı yolu verilmiştir. Prensip olarak kanalsız makine ile aynıdır. Birinde akı yolu daha uzun ve karşısındaki S kutbuna ulaşırken diğerinde daha kısa bir yol izlemektedir.



Şekil 3.23. (a) Eksenel akı yollu torus NN makinenin iki boyutlu akı yolu şekli
(b) Eksenel akı yollu torus NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli

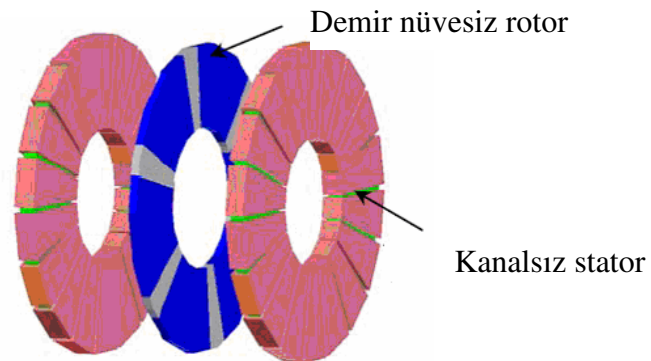
TORUS-NS tip kanallı makine Şekil 3.24’de verilmiştir. Burada akı N kutbundan çıkıp hava aralığı, sargılar tekrar hava aralığı ve karşısındaki S kutbuna ulaştıktan

sonra dönüşü de aynı şekilde olup diğer S kutbuna ulaşarak uzun bir yol izlemektedir (24).



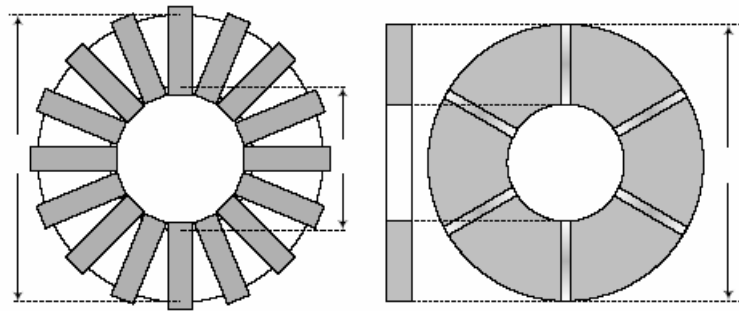
Şekil 3.24. Eksenel akılı torus NS kanallı tip sabit mıknatıslı makine şekli

TORUS-NS tip makinenin avantajı stator daha ince yapıda olduğundan dolayı stator ağırlığı daha az, demir kayıpları daha az ve sonuçta TORUS-NN tip makineden daha verimli olacaktır. Teoride TORUS-NS makinelerin stator çekirdeğine ihtiyacı yok gibi düşünülse de mekanik yapıdan dolayı ince bir çekirdek bulunmak zorundadır. Bu iki yapının bir farkı da sargı tipleridir. Biri sırt sırta bağlanırken diğeri tam tur sarılır. Nüvesiz olarak bilinen NS makineler küçük ve orta büyüklükteki güç üretimlerinde kullanılırlar. Nüvesiz makineler literatürde daha az incelenmiştir. Bununla birlikte literatürde kanalsız eksenel akılı iç rotor AFIR-NS (Simit şeklindeki yapıya geniş yay parçaları şeklinde yerleşim) ve kanallı eksenel akılı iç rotor-dış stator AFIR-S disk tipli sabit mıknatıslı makinelerle rastlanmaktadır. AFIR-NS makine Şekil 3.25’de verilmiştir.



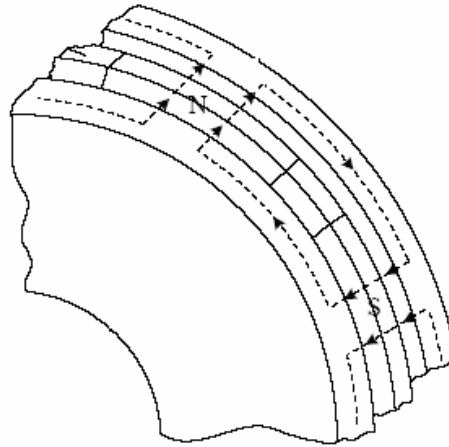
Şekil 3.25. Eksenel akılı Afir-NS makine şekli

Bu topolojinin yapısı TORUS makinelerden oldukça farklıdır. Rotor da demir malzeme yoktur. Mıknatıslar, manyetik olmayan malzeme üzerindedir. Manyetik akı rotorda dolaşmaz. Manyetik olmayan malzeme rijitliği sağlamak ve mıknatısları taşımak için kullanılır. Bu yapıdan dolayı sistemin ataleti yüksektir. Küçük güçteki yüksek atalet isteyen sistemlerde kullanılır. Kanalsız stator ve rotor yapısının detayı Şekil 3.26’da verilmiştir (24).



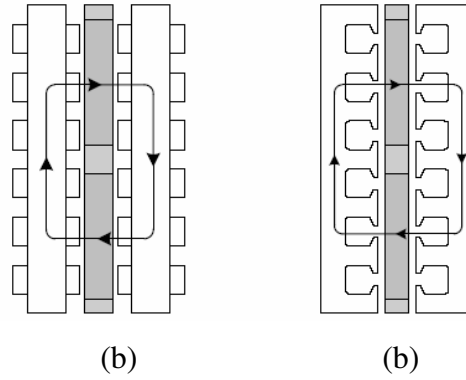
Şekil 3.26. Eksenel akılı kanalsız Afir-NS makine detayı

Üç boyutlu akı yolu Şekil 3.27’de verilmiştir.



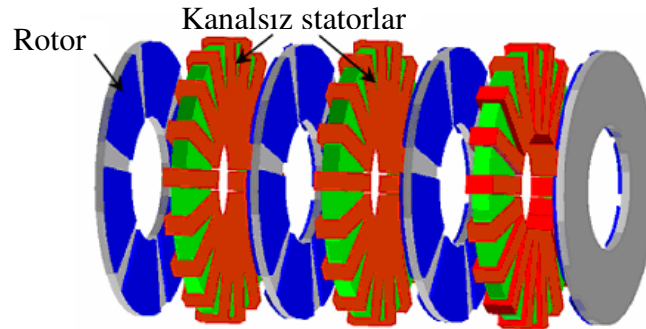
Şekil 3.27. Afir-NS makinede üç boyutlu akı yolu şekli

Kanallı ve kanalsız AFIR-NS tip makinelerin iki boyutlu akı yolları Şekil 3.28’de verilmiştir. Aynı prensiple eksenel olarak döndürülen manyetik akı ile sargılarda gerilim endüklenmektedir.



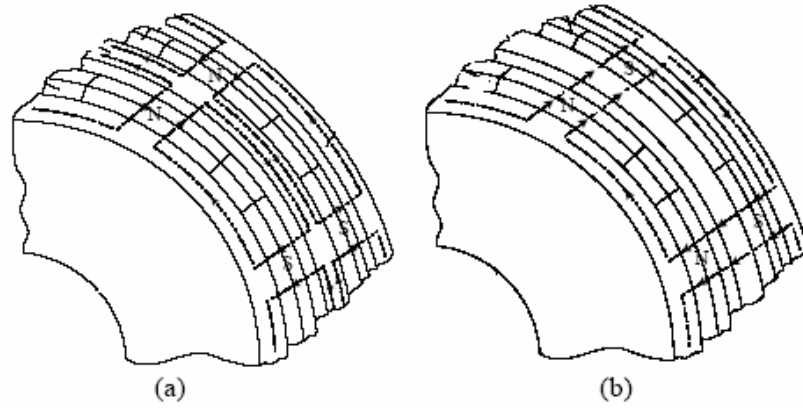
Şekil 3.28. (a) Eksenel akı yollu kanallı Afir-NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli
(b) Eksenel akı yollu kanalsız Afir-NS makinenin iki boyutlu akı yolu şekli

Hem TORUS hem de AFIR tip makineler aynen eksene dik akılı makinelerde olduğu gibi çok aşamalı olarak yapılabilmektedirler. Genellikle çok aşamalı yapıda N rotor ve $N+1$ stator diski vardır. Burada N rotor veya stator sayısıdır. Aynı şaftı kullanırlar. Sargılar seri veya paralel olarak bağlanabilirler. Akı yolu şekillendirilirken dikkat edilmelidir. Şekil 3.30'da kanalsız statorlu $N=3$ olan çok bölümlü sabit mıknatıslı makine verilmiştir (24).



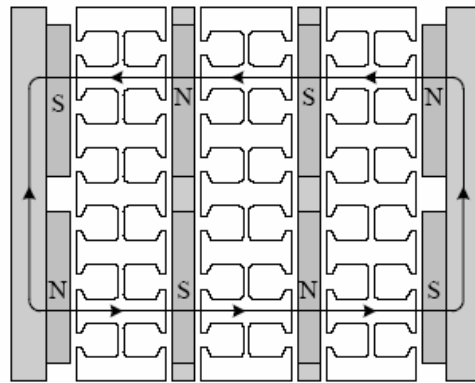
Şekil 3.29. Çok aşamalı kanalsız tip sabit mıknatıslı makinenin üç boyutlu şekli

Şekil 3.30'da de 3 stator ve 2 rotordan oluşan sabit mıknatıslı makinede akı yolu gösterilmiştir.



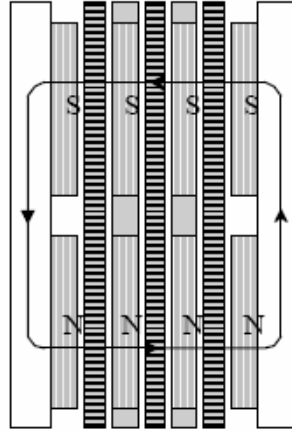
Şekil 3.30. (a) Eksenel akı yollu çok aşamalı NN makinenin üç boyutlu akı yolu şekli
(b) Eksenel akı yollu çok aşamalı NS makinenin üç boyutlu akı yolu şekli

Çok aşamalı iki farklı şekildeki sabit mıknatıslı tasarım arasındaki birinci fark, manyetik akı yolunun şekillerde görüldüğü gibi farklı yolları takip etmesidir. İkinci olarak ise NS tip makinelerde rotor yine demir nüve olmadığından dolayı boyutları daha küçük ve daha hafif olacaktır.



Şekil 3.31. Çok aşamalı NS tip (N=3) makine şekli

Çok aşamalı eksenel akı makinelerin bir başka tasarımı, nüvesi statorla yapılandırır. Bu makineler çok sayıda rotor ve demir nüvesiz sargılardan oluşmaktadır. Manyetik akı yolu ve ideal tasarımı Şekil 3.32’de verilmiştir.

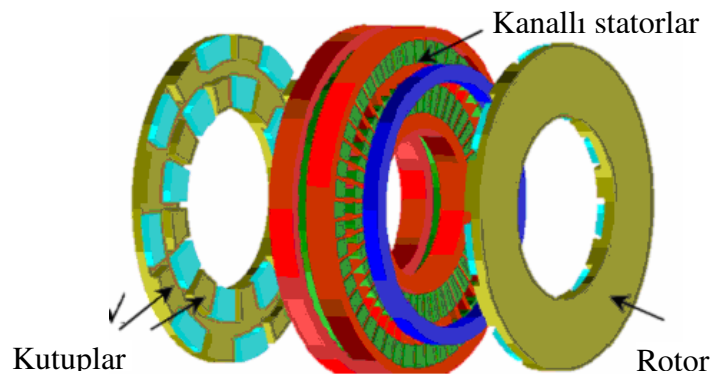


Şekil 3.32. Çok aşamalı statoru nüvesiz sabit mıknatıslı makine şekli

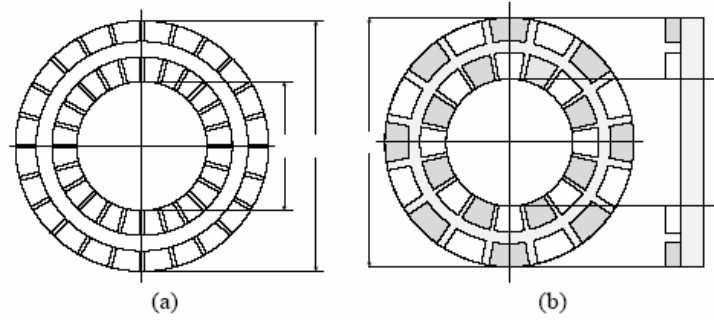
Diğer eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler:

Farklı uygulama alanlarına göre farklı akı yolları oluşturularak makineler tasarlanmaktadır. Değişken hızlı uygulamalarda en önemli etken olan, alan zayıflamasının istenmemesidir.

Yine geliştirilen başka bir tasarımda, iki karşılıklı rotor arasında bir kanallı statordan oluşan ve alan kontrollü olan sistem şekli aşağıda verilmiştir. 3 faz AC stator sargısı bir DC alan sargısı vardır ki eksenel akılı makinelerden en önemli farkıdır. Yapısı ve rotora mıknatısların dizilişi Şekil 3.33 ve Şekil 3.34’de verilmiştir (24).



Şekil 3.33. Alan kontrollü eksenel akılı yüzey mıknatıslı makinenin üç boyutlu şekli



Şekil 3.34. (a) Alan kontrollü eksenel akılı yüzey mıknatıslı makinenin stator şekli
(b) Alan kontrollü eksenel akılı yüzey mıknatıslı makinenin rotor şekli

3.6.3. Asenkron jeneratörler (Endüksiyon jeneratör)

Elektriksel güç endüstrisinde en fazla kullanılan makinedir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak geliştirilmiş ve kullanımı artmıştır. Öncelikli avantajı endüksiyon makinelerin bakıma ihtiyaç duymayan fırçasız yapısı ve DC alan güç paylaşımına ihtiyaç duymamasıdır. Bu dezavantajlarından dolayı senkron ve DC makinelerin kullanımını azaltmıştır. Ayrıca düşük maliyeti ve geçiş performansının yüksek olması endüksiyon makinelerin kullanımını artırmıştır (14).

Statoru şebekeye bağlanmış bir endüksiyon motorunun rotoru senkron hızların üzerinde sürülürse makine jeneratör haline gelir ve şebekeye sabit-gerilim ve sabit-frekanslı güç verir (18).

Endüksiyon makinenin birim kayması = $\frac{\text{Senkron hız} - \text{rotor hızı}}{\text{Senkron hız}}$ [3.25]

olarak tanımlanır.

Motor olarak çalışırken makinenin tam yük hızı senkron hızın biraz altındadır ve birim kayma genellikle 0,0 ile +0,05 arasında yer alır. Jeneratör olarak çalışırken makinenin birim kayması 0,0 ile -0,05 arasında yer alır. Jeneratör için nominal çıkış koşulları senkron hızın biraz üzerindeki (% 5'ten daha az) hızlarda elde edilir. Bu nedenle konvansiyonel endüksiyon jeneratörleri kullanılan rüzgar-elektrik sistemleri sabit hızlarda çalışmalıdır (18).

Endüksiyon jeneratörler esas olarak senkron jeneratörlerden daha basit yapıdadır. Endüksiyon jeneratörlerin işletimi, kontrolü, bakımı daha kolaydır. Senkronizasyon problemleri yoktur ve ekonomiktir. Bununla birlikte kendi uyarım akımlarını şebekeden çekerler ve böylece şebekeye reaktif yükleme yaparlar. Bu sorun statik kapasitörlerin eklenmesi veya rotor beslemesi ile düzeltilebilmesine rağmen böyle bir uygulama jeneratörün maliyet ve karmaşıklığını artırır. Zaten bütün işletim aralığında endüksiyon jeneratörlerin verimleri senkron jeneratör verimlerinden çok az düşüktür (18, 25).

Rüzgar-sürücülü endüksiyon jeneratörünün çıkışı yalnızca işletim hızıyla belirlenir. Çıkış nominal değeri aştığı zaman kanat açısı kontrolü çalışmalı ve çıkışı sınırlamalıdır. Ani pikler (Wind gust) gibi ani kesintiler yükün değişimi ile kontrol edilir ve maksimum tork koşullarına ulaşılmadığı sürece kararlı işletim oluşur. Maksimum tork olduğu zaman ise elektriksel çıkış düşmeye, hız artmaya ve sistem kontrolden çıkmaya başlar. Bu nedenle aşırı hız koruması rüzgar sürücülü endüksiyon jeneratör sistemlerinin güvenli çalışması için çok önemlidir (18).

Rüzgar türbini kendinden uyarımlı değilse (DARRIEUS rotorlarında olduğu gibi) başlatma anında motor olarak ve yeterli hıza ulaştıktan sonra jeneratör olarak çalışan bir endüksiyon makinesi kullanılabilir. Böyle bir düzenleme daha küçük ünitelerle mümkün olmasına rağmen, her iki işletim modu için farklı karakteristikler gerektiğinden büyük rüzgar elektrik sistemlerinde iki ayrı makine tercih edilir (18).

Değişken hızlı bir rüzgar türbininden sabit frekanslı çıkış elde etmek için sabit-hız, sabit-frekanslı üretim türü gereklidir. Dönen makinelerin komütatör gibi mekanik ve/veya tristör ve diyotlar gibi elektronik anahtarlama cihazları ile uygun bir şekilde birleştirilmesi için çok sayıda düzenlemeler yapılabilir. Bu uygulama için aşağıdaki düzenlemeler önerilebilir.

- Alan modüleli jeneratör sistemi
- AC-DC-AC hat

- Çift çıkışlı endüksiyon jeneratör
- AC komütatör jeneratör

Bir endüksiyon jeneratörü rüzgar türbini tarafından sürülmektedir ve çok iyi bilinir ki sadece aktif güç vermekte reaktif güç istemekle beraber reaktif güç Modern Static Var Compansator (ASVC) tarafından sağlanmaktadır. Sincap kafesli endüksiyon jeneratörler sabit hızlı rüzgar jeneratörleri ile çok geniş alanlarda kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda, wound-rotor endüksiyon jeneratörler harici rotor dirençleri tarafından ayarlanabilen hız için elverişli kontrol tasarımlarında tabi ki kullanılmaktadır. Bu durum sürücü sıralamasının dinamikleri geliştirilerek moment-kayma eğrilerinin kontrolüne imkan vermektedir (8).

Endüksiyon jeneratörleri şebekenin frekansına kilitlenmezler. Periyodik moment iniş çıkışları rüzgar türbininden küçük bir değişiklik absorbe edilebilir. Kapasitör yol vermeli endüksiyon jeneratörler olması durumunda jeneratörler kapasitörlerin bağlı olduğu karşı çıkış terminallerinden mıknatıslama akımını sağlarlar (8).

Endüksiyon makineler AC uyarma akımına ihtiyaç duyar. Bu makineler kendinden ve dışardan uyarımlı olarak imal edilebilirler. Uyarma akımı temelde reaktif ve stand alone sistemlerde şönt kapasitör tarafından sağlanır. Ekonomikliği ve güvenilirliği birçok rüzgar sistemlerinde endüksiyon makinelerin elektrik jeneratörü olarak kullanımını artırmıştır (14).

Rüzgar-enerji dönüşüm sistemleri aşağıdaki üç temel faktöre bağlı olarak sınıflandırılabilir;

- 1- Çıkış Türü
 - a- Doğru akım
 - b- Değişken frekans, değişken veya sabit gerilim, alternatif akım
 - c- Sabit frekans, değişken veya sabit gerilim, alternatif akım
- 2- Rüzgar türbinin dönme hızı
 - a- Değişken kanat açısı ile sabit hız
 - b- Basit açı değiştirici mekanizmaları ile yaklaşık sabit hız

- c- Sabit kanat açısı ile değişken hız
- 3- Elektrik enerji çıkışından yararlanma şekli
 - a- Akü grubunda depolama
 - b- Diğer şekillerde depolama
 - c- Konvansiyonel şebeke sistemine bağlantı (18).

3.7. Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemleri

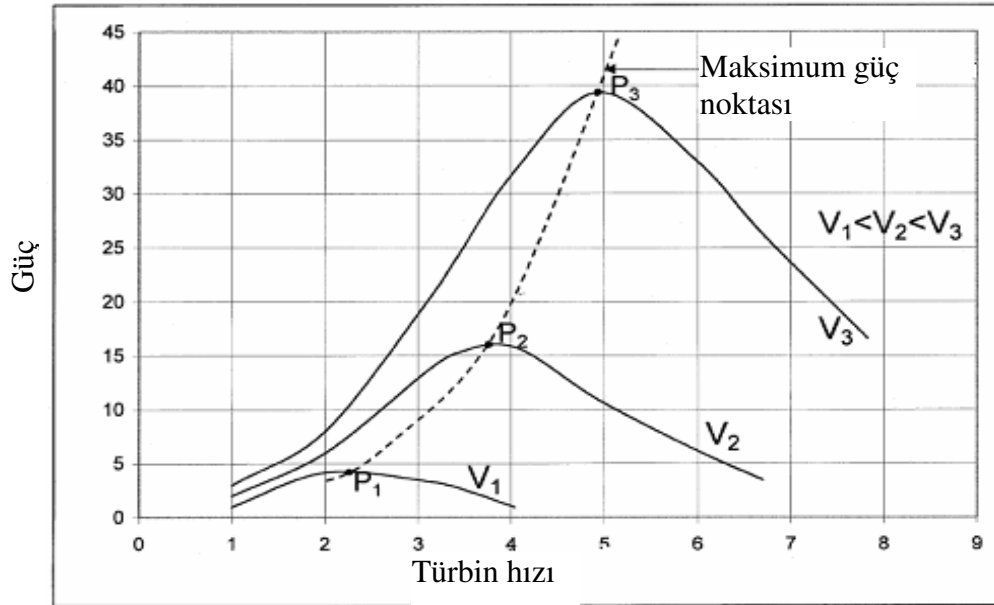
Elektrik jeneratörlerinde türbin hızı genellikle istenen hızdan daha düşüktür. Bu sebepten dolayı türbin hızını kontrol etmek veya istenilen seviyede tutmak için bütün rüzgar sistemleri bir sürücü sistemi kullanılır. Rüzgar güç denklemi;

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \text{ olarak verilmiştir.} \quad [3.17]$$

C_p değeri ile rotor uç hız oranı arasındaki bağıntı Şekil 3.35’de verilmiştir. Rüzgar hızının değişmesiyle TSR (Tip speed ratio) ve güç katsayısı değişecektir. TSR’nin bu belirli değerinde C_p maksimum değerindedir. Bu yüzden rotor sabit hızla işletmede iken; sadece bir rüzgar hızının bir değerinde maksimum değerini almaktadır.

Sürekli yüksek bir verim alabilmek için rotor güç katsayısı değerinin devamlı olarak maksimumda tutulması gerekir. Teorik olarak C_p ’nin maksimum değeri 0.59 iken pratikte limit değeri 0.5’dir. hatta 0.4’ün üstündeki değerler iyi olarak nitelendirilir. Bu yüzden sabit bir değerde kalmasına çalışılır. Rüzgar hızı değiştiğinde türbin hızı da değişecektir. Bu değişikliklere cevap verebilecek ve kontrolü sağlayabilecek mekanizmalar Rüzgar türbin sistemlerinde kullanılmalıdır. Düşük rüzgar hızlarında da maksimum çıkış gücü elde edilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Şekil 3.35’de V1, V2 ve V3 hızlarındaki çıkış güçlerinin maksimum olduğu noktalar gösterilmiştir. Verilen noktalarda maksimum güç alınmakta olduğu görülmektedir. P1, P2 ve P3 noktalarında TSR’nin sabit en yüksek değerde ve C_p ’de 0.5’e çok yakın demektir.



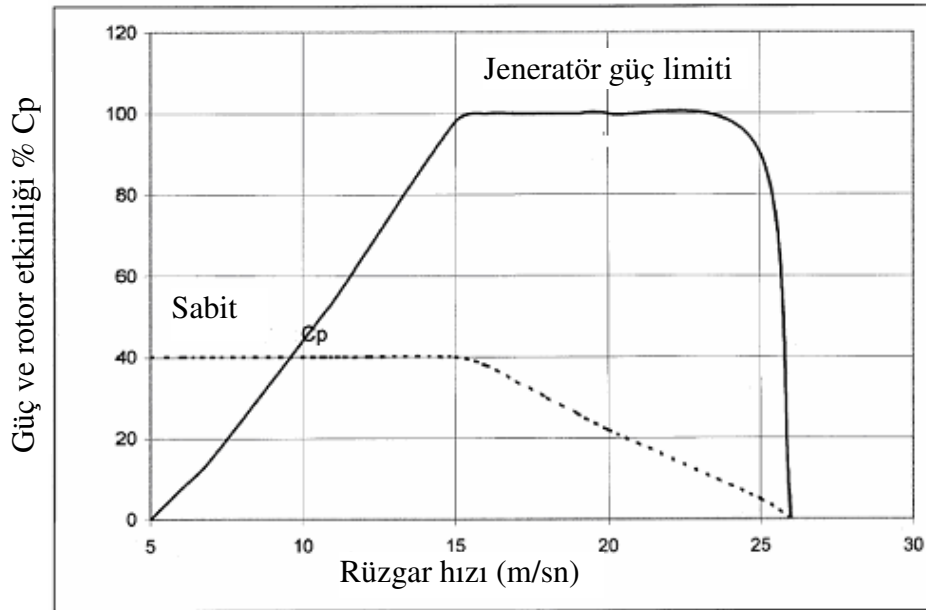
Şekil 3.35. Farklı rüzgar hızlarında çıkış gücü

Sabit hız oranında makinenin işletmesi ve böylece maksimum güç noktasının maksimum rotor hızının bozucu rüzgarlarda da sağlanması gerekir. Bozucu rüzgar hızları türbin hızını ve çıkışı da etkilemektedir. Bu sebepten dolayı türbin hızı ve jeneratör çıkış gücü kontrol edilmek zorundadır (14).

3.7.1. Hız kontrol bölgeleri

Rüzgar güç sistemleri kontrolünde 3 bağımsız bölüm vardır.

- Optimum sabit C_p bölge
- Hız sınırlayıcı bölge
- Güç sınırlayıcı bölge



Şekil 3.36. Değişik rüzgar hızlarında sabit Cp eğrisi

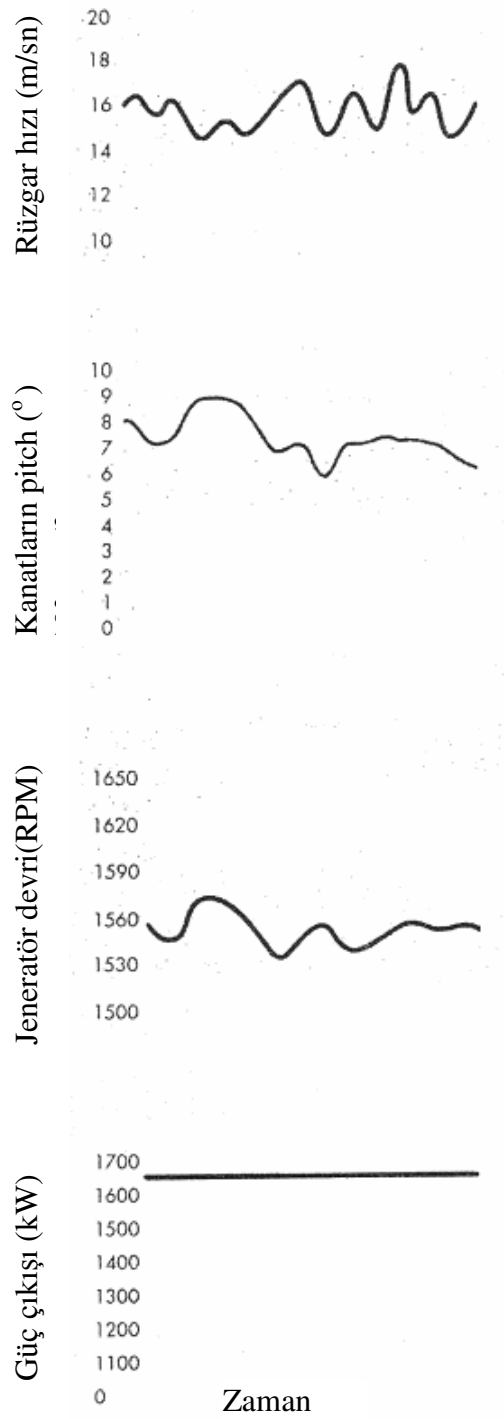
Genellikle türbin işletmesi 4-5 m/sn'de başlar ve 25-30 m/sn'de sonlandırılır. Yılda genel olarak zamanın % 70-80'inde türbinler işletmede kalabilmekte diğer zamanlarda rüzgar hızı ya çok düşük ya da çok yüksek olmaktadır.

Rüzgar türbinlerini maksimum Cp noktasında işletmede tutmak için hız kontrol sistemlerinin çok iyi olması gerekir ve iyi yanıt vermesi gerekir. Eğer rüzgar devamlı olarak artış gösterme eğiliminde ise sisteminde elektrik üretme güç sınırı buna paralel olarak artış eğiliminde olmalıdır. Türbin hızı azalır ve güç katsayısı Cp optimum değerden uzaklaşırsa çıkış gücü azalacaktır. Jeneratör çıkış gücü tasarım şekline göre sınırlıdır. Geleneksel olarak türbin hızı ve jeneratör çıkış güçlerinin kontrolünde 2 metod vardır (14).

3.7.2. Adım (pitch) kontrolü

Türbin hızı, kanat açıları mekanik veya hidrolik sistemlerle kontrol edilerek sağlanır. Rüzgar hız değişimlerinde kanat adım (pitch) mekanizması ile güç iniş çıkışları düzeltilmeye çalışılır. Verilen şekillerde kanat açılarının rüzgar hızının değerine göre değişimleri ve jeneratör devri görülmektedir. Çok büyük güçlü sistemlerde kanat açısı

mekanizması biraz geç cevap verecektir. Şekil 3.37’de gerçek zamanlı değerler verilmiştir (14).



Şekil 3.37. Vestas 1,65 MW rüzgar türbini gerçek ölçümleri

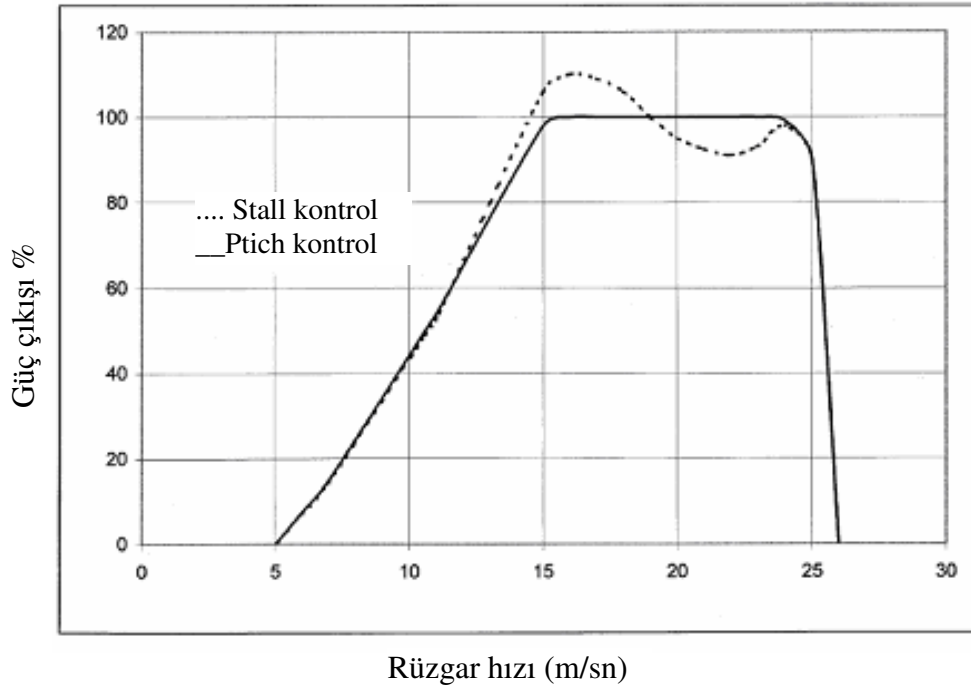
Jeneratör çıkış gücü, jeneratör hızında % 10'luk dalgalanmalara müsaade ettiğinden dolayı düzgün ve kaliteli enerji üretilmektedir. Çıkış gücünde istenmeyen iniş çıkışlar önlenmiş olur. Sistemin esnekliği veya işletme kolaylığı tabi ki tesisin ve türbinlerin üzerindeki baskıların azaltılmasıyla mümkün olacaktır (14).

Bu kontrol mekanizmasının avantajları, bütün rüzgarlı durumlarda aktif güç kontrolü olanağı sağlaması, daha yüksek enerji üretimi, acil durumlarda türbinin durması için güçlü bir fren sistemi gerektirmemesi, nominal gücün üzerinde rüzgar hızlarında pervane kanatlarına binen yükün azalması ve hafif bir yapıya sahip olması olarak sıralanabilir (6).

Ayrıca elektronik kontrol mekanizmaları da kullanılmaya başlanmıştır. Çeşitli sensörler kullanarak türbin içerisindeki birçok anahtar, valf, hidrolik pompa ve motoru da kontrol eder ve alınan bilgiler modem vasıtasıyla kayda alınabileceği gibi uyarı mekanizması da eklenebilir. Rotorun devir sayısı, dış ortam sıcaklığı, rotor sıcaklığı, jeneratörün akım ve gerilim değerleri okunabilir ve kontrol edilebilir (6).

3.7.3. Durma (stall) kontrolü

Aerodinamik durdurucularla rüzgar hızı cut-out seviyesine ulaşmadan önce kontrol altında tutularak kontrol sağlanır. Aktif fren sistemidir. Türbin hızının istenilen sınırlar dahilinde kalması sağlanır. Şekil 3.38'de iki kontrol mekanizması görülmekte olup, stall kontrolde, kanat açısı kontrol sistemine göre daha fazla ani düşüş ve yükselmeler görülmektedir. Pratikte her iki metodun da kullanıldığı sistemlerde düzgün ve pürüzsüz çıkış alınamamaktadır. Teorik olarak hesaplanan değerler tam olarak elde edilememektedir. Örneğin, aynı rüzgar hız değerinin artış veya azalış eğilimine göre rüzgar türbini farklı güçler üretmektedir (14).



Şekil 3.38. Durma (stall) ve Adım (pitch) kontrollü türbindeki güç çıkış eğrisi

Hücum açısına göre kontrol edilir ve stall açısına erişildiğinde kanatlar yatay bir dönüş hareketi yaparak yumuşak bir stall gelişimi meydana getirirler. Daha basit bir yapıya sahiptirler ve daha az bakım gerektirirler (6).

3.7.4. Jeneratör sürücüleri

Jeneratör işletme hızı ve kontrol sistemi, değişik hızlara göre önceden tanımlanmalı ve sistem tasarımına göre seçilmelidir. Sistemin büyük değişkenlerinin belirlenmesi rüzgar türbin tasarımında çok önemlidir. Alternatif stratejiler ve uygun hız kontrol metodları aşağıda verilmiştir (14).

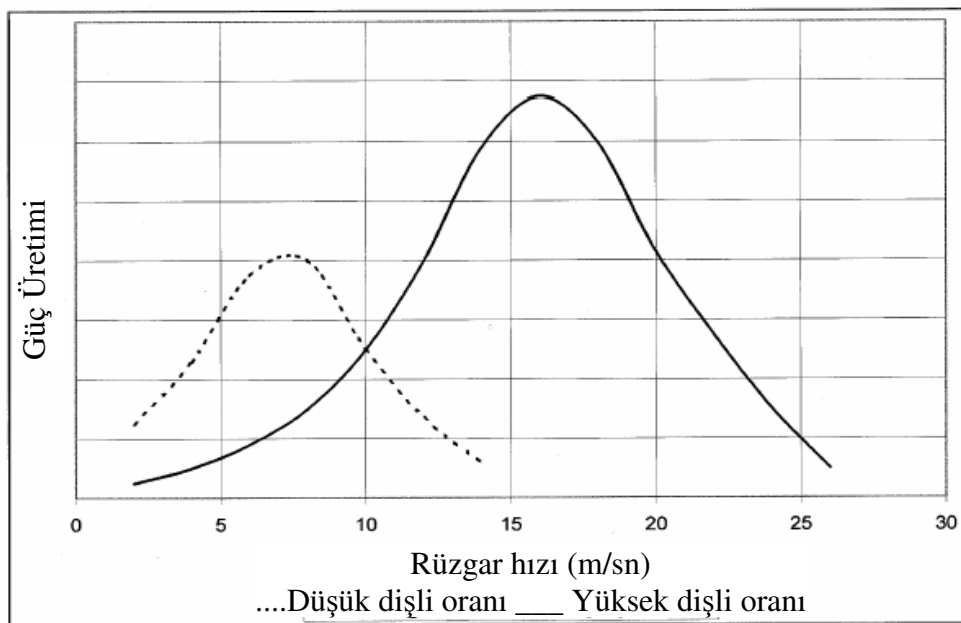
Sabit tek hızlı sistemler:

Sabit tek hızlı sistemlerde genellikle endüksiyon jeneratörleri kullanılır ve sabit hızlı işletme sağlanır. Hız, seçilen iki nokta arasında mekanik dişliler vasıtasıyla kalması sağlanır. Dişli kutusu hızı azaltıp torku artırarak C_p güç katsayısını artırmaya çalışır. Elektromekanik tork dönüştürücü kullanılır. Rüzgar jeneratörü genellikle % 1-2

kaymayla çalışır. Daha yüksek devirlerde dişliler verimi artırır fakat nüvedeki elektriksel kayıplar artar ki ısınma dolayısı ile oluşan kayıplardır. Tek hızlı sistemin en büyük dezavantajı devamlı olarak C_p rotor güç katsayısının en verimli olduğu bölümde işletilememesidir. Rüzgar hızı önceden belirlenen değerin altında veya üstünde olmakta ve sistem verimli çalışmamaktadır. Sistemin dişli çevirme oranı ortalama rüzgar hızına iyi seçilmelidir. Şekilde enerji üretimi maksimum dişli oranı 20 olarak görülmektedir. Sabit hızlı sistemler küçük boyutlu rüzgar sistemleri ile sınırlı kalmıştır(14).

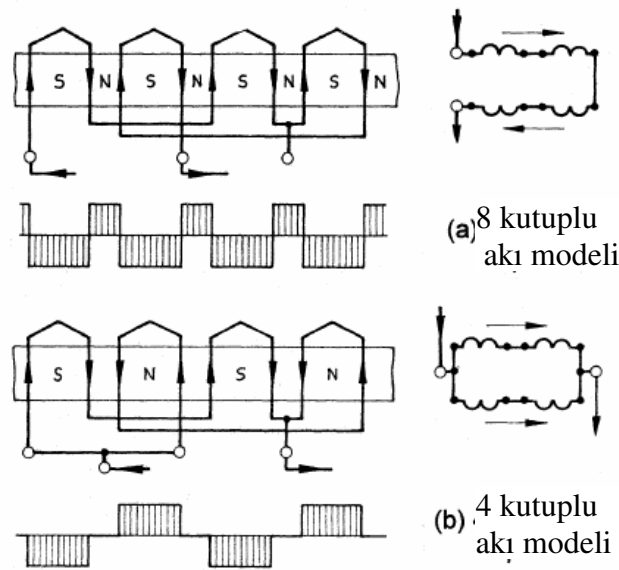
Sabit iki hızlı sistemler:

Bu sistemler enerji yakalamayı artırmakta, rotordaki elektriksel kayıplar azalmakta ve dişli gürültüleri azalmıştır. Hız değişen dişli oranına göre değiştirilir. İki işletme hızı o yöre nin yıllık beklenen rüzgar hızı ile yıllık enerji üretiminin optimize edilmesiyle seçilir. Yıllık olarak dişli kullanım oranı ve rüzgar hızı ölçümleri Şekil 3.39’da verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi 10 m/sn’nin altındaki hızlarda düşük hızlı dişli oranı, 10 m/sn’nin üstündeki hızlarda ise yüksek hızlı dişli oranı kullanılmaktadır (14).



Şekil 3.39. Dişli kullanım oranı

Önceleri bazı Amerikan tasarımlarında kayış sistemi ile sunulan ve anahtarlamalı iki jeneratör tarafından üretim iki hızlı olarak kullanılmıştı. En ekonomik ve verimli metod endüksiyon jeneratörünü iki hızda işletecek şekilde tasarlamaktır. Kafes yapılı motorda stator ikiye bölünerek üretim sağlanmaktadır. Kutup sayılarının değiştirilmesi makinenin kontrolü kaybedilmeden yapılabilmelidir. Ayrık sargılı statorun tasarımı tabi ki karmaşık ve zordur. Kutup değiştirme bir sargıda, stator sargılarındaki tek veya çift sayılı kutupların birbirine bağlanabilmesi ile sağlanmaktadır. Sincap kafesli rotorda bu olanaksızdır. Yani düşük hızlı işletmede kutup sayısı tam iken yüksek hızlı işletmede ise kutup sayısı yarıya indirilir. Bu şekilde optimum Cp noktasına yaklaşmaya çalışılır. Şekil 3.40'da stator sargılarında kutup değişiminin tek fazı görülmektedir. Çok sayıda kutup için bobinler seri bağlanır. Kutup sayısını azaltmak için bobinler seri ve paralel olarak bağlanır. Çıkış gerilimden de görüleceği gibi fazlar arasındaki açı kutup sayısı orantılıdır (14).



Şekil 3.40. Stator sargılarında kutup değişimi

Değişken hızlı dişli sürücü kullanımı:

Değişken hızlı sistemler son zamanlarda kullanım alanı pek bulamamaktadır. İşletmede yaşanan problemler elde edilecek kazançlardan daha fazla olmaktadır.

Değişken hızlı sistemlerde güç elektroniği kullanımı:

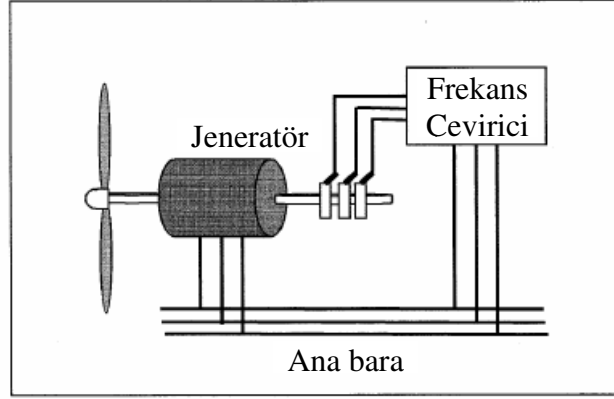
Modern değişken hızlı sistemlerle güç elektroniği kullanılarak değişken voltaj ve değişken frekans, sabit voltaj ve frekans çıkışına dönüştürülmektedir. Bu sistemlerin kullanımının yaygınlaşması, güç elektroniğindeki gelişmeler ve fiyatlarının ucuzlamasına paralel olarak artmıştır. Genlik modülasyonlu tristörler en fazla kullanılan sistemlerdir. Enerji kazancı değişken hızlı sistemlerde daha fazladır. Eklenen maliyet ve güç elektroniği sistemindeki kayıplara rağmen daha verimli işletilmektedir. Yarı iletken güç elektronik devre elemanlarının kullanılması yüksek frekanslı harmoniklere neden olmakta bunun sonucunda da ilave elektriksel filtrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuçta, yıllık enerji üretimi, değişken hızlı sistemlerde istenilen değerlere çok yakın ve gücün kalitesini kontrol edilebilir şekilde sunar. Böylece diğer sistemlerde olmayan iki önemli yararı vardır.

- Uzaktan kontrol için fırsat verir. Bu karadan uzak deniz uygulamaları için önemlidir.
- Kaliteli şebeke bağlantıları için daha uygundur (14).

Scherbius değişken hız sistemi:

Güç elektroniği kullanan değişken hızlı sistemle karşılaştırıldığında Scherbius makinesi düşük maliyet sunar ve güç kalitesi dezavantajı yoktur. Fabrikalarda ve maden ocaklarında kullanılır. İndüksiyon makinenin hızı rotor direncinin değiştirilmesi veya istenilen rotor kayması ile elde etmek için yani frekansı düzeltmek için dışardan gerilim enjeksiyonu yapılmasıyla ayarlanır. Şekil 3.41'de kayan yüzüklü dönen makinenin yapısı verilmiştir. Rotor kayan yüzükler vasıtasıyla değişken frekans kaynağına stator ise şebekeye bağlıdır. Bu yüzden makine, çift beslemeli endüksiyon makine olarak adlandırılır. Hız dışardan rotor frekansı ile kontrol edilir. Değişken hız kontrol oranı scherbius makinelerde genellikle 2:1'dir. Bu sistem kayan yüzüklerdeki bakımın zor olmasından dolayı ve güvenilirliğin düşük olmasından dolayı elektriksel kontakların çok olması sebebi ile çok fazla tercih edilmemektedir. Fakat bazı imalatçılar bu problemleri minimuma indirmişlerdir.

Sonuç olarak scherbius makinede ek maliyet getiren malzemeler olmasına rağmen büyük güçlü makinelerde daha verimli işletilmesine olanak vermektedir (14).



Şekil 3.41. Kayan yüzüklü döner makine şekli

Değişken hızlı direk sistem:

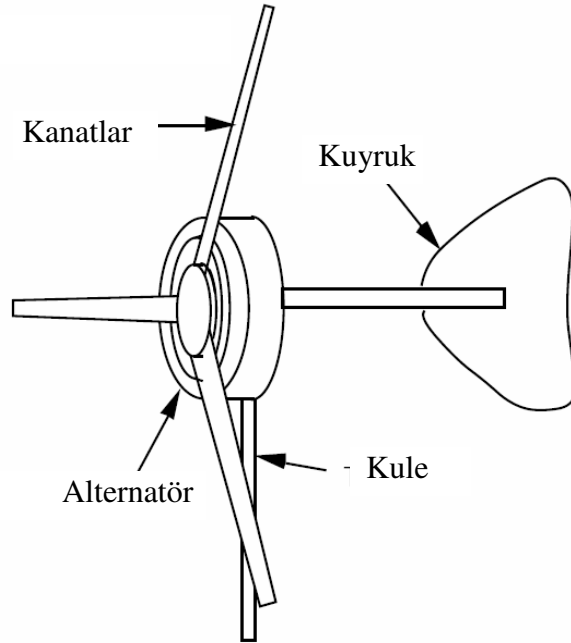
Bu sistemler genellikle küçük güçlü makinelerde kullanılır. Dişli kutuları ve güç elektroniği devrelerine ihtiyaç duymazlar. Kullanımdaki faydalarını sıralarsak;

- Daha az kule ağırlığı
- Gürültü ve vibrasyon azalır
- Kaybolan güç azalmıştır
- Kulede meydana gelen arıza ve bakım ihtiyacı azalır, gibi nedenlerden dolayı deniz üstü işletmelerde kısmen faydalıdır.

Direk işletmelerde jeneratör kutup sayısının çok olması gerekir. Eksenel ve eksene dik manyetik akı yollu çalışmalar yapılmıştır. 5 kW güçte 200 dk/devir laboratuvar prototipi eksenel yollu sabit mıknatıs jeneratörü tasarlanmıştır. Araştırmalar öncelikli olarak değişken hızlı direk büyük rüzgar güç sistemlerinde yapılmaktadır (14).

4. MATERYAL VE METOD

Çalışmada, ortalama bir evin elektrik ihtiyacını karşılayabilmesi için küçük bir rüzgar türbininin imal edilmesi amaçlanmıştır. Bir rüzgar türbini aşağıda verildiği gibi kule üzerinde; kanatlar, yönlendirme kanadı, sistemin yataklanması, rüzgar gücünün jeneratöre iletilmesi, jeneratör, doğrultucu ve zeminde; şönt regülatör devresi, depolama ve evirici bölümlerinden oluşmuştur.



Şekil 4.1. Rüzgar türbinin başlıca parçaları

4.1. Kanat Tasarımı ve İmalatı

Kanatlar rüzgar gücünü yapısı itibariyle dairesel güce çeviren ve jeneratörü süren kısımdır. Dönme yani mekanik güç, jeneratör ile elektriksel enerjiye çevrilmektedir. Rüzgar ile sürüklenen rotordan elde edilecek güç daha önce verilmişti (13 - 17) ;

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad [4.1]$$

ρ = hava yoğunluğu (kg/m³)

A = Süpürme alanı (m²)

V = Rüzgar hızı (m/sn)

C_p = Güç katsayısı

Bu formülde;

Hava yoğunluğu $\cong 1,225 \text{ kg/m}^3$

Çizelge 4.1. Çeşitli sıcaklıklardaki hava yoğunlukları (26)

Sıcaklık °C	Sıcaklık °F	Yoğunluk (Kuru hava kg/m ³)
-25	-13	1.423
-20	-4	1.395
-15	5	1.368
-10	14	1.342
-5	23	1.317
0	32	1.292
5	41	1.269
10	50	1.247
15	59	1.225
20	68	1.204
25	77	1.184
30	86	1.165
35	95	1.146
40	104	1.127

Süpürme alanı rotor kanatlarının boyu ile orantılıdır. Süpürme alanı;

$$A = \pi R^2 = 3,14 \times (1,2)^2 = 4,5216 \text{ m}^2 \quad [4.2]$$

olacaktır (13, 14, 17).

Kanat şekilleri genelde uç hız oranı 7 olacak şekillerde tasarlanmaktadır. Çalışmada ağaç malzeme kullanıldığı için parça bir ağaçtan kanatın çıkarılmasında işlem sırası

verilmiştir. Kanat tasarımında uygun bir kanat profili kullanılarak, istenen tork ve uç hız oranı elde edilmeye çalışılmıştır. Seçilen ağaç dış ortamda kalacağı için esnemeyen, sağlam yapılı cins olmalıdır. 30 yıl önce kesilmiş ve bekletilmiş çam ağacı kullanılmıştır. Güç katsayısının maksimum 0,59 olabileceği ve çoğunlukla 0,2-0,4 aralığında olduğu verilmişti. Güç katsayısı ortalama 0,3 alınmıştır.

$$\begin{aligned}\text{Devir (RPM)} &= \text{rüzgar hızı} \times \text{Kanat uç hız oranı (tsr)} \times 60 / \text{çevre} \quad [4.3] \\ &= 3 \times 7 \times 60 / (2,4 \times 3,14) = 167 \text{ rpm olacaktır.}\end{aligned}$$

Rüzgar hızı 10 m/sn olduğunda ise devir 556 rpm olacaktır.

Elektrik üretmek için yapılan rüzgar türbinleri çoğunlukla 3 kanatlı imal edilmektedir. Kanat sayısı arttıkça hız düşecek, tork artacaktır. Elektrik üretmede bizim için torktan çok hız önemli olduğundan dolayı 3 kanatlı tasarım kullanılmıştır. Daha fazla kanatlı yapılması başlangıç hızını artıracaktır ki bu da istenmeyen bir durumdur (15, 18, 19).

Sonuç olarak 10 m/s rüzgar hızında, kanatlardan elde edilebilecek güç;

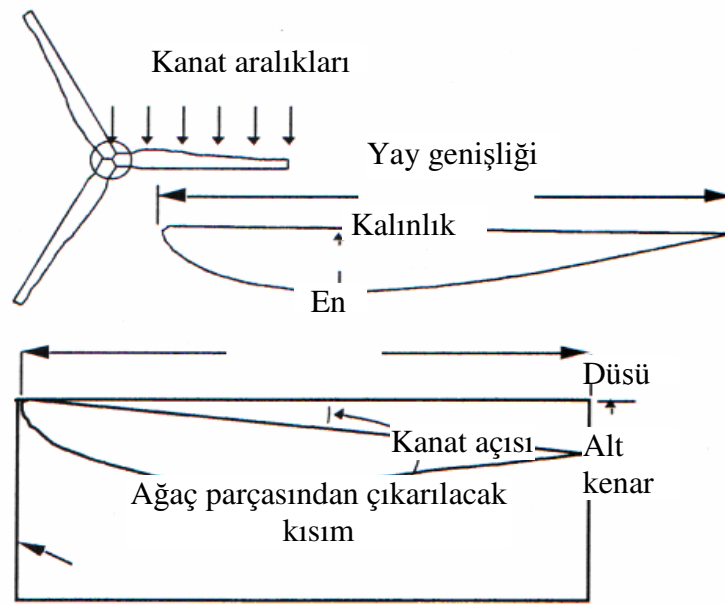
$$\begin{aligned}&= 0,5 \times 1,225 \times 4,5216 \times (10 \text{ m/s})^3 \times 0,3 \\ &= 0,969318 \times 1000 = 969,18 \text{ Watt}\end{aligned}$$

olarak hesaplanacaktır. Birimler ise;

$$\begin{aligned}&= (\text{kg/m}^3) \times (\text{m}^2) \times (\text{m}^3/\text{sn}^3) \\ &= (\text{kg-m}) / \text{sn}^2 \times \text{m/sn} \\ &= \text{Newton- m/sn} = \text{Watt}\end{aligned}$$

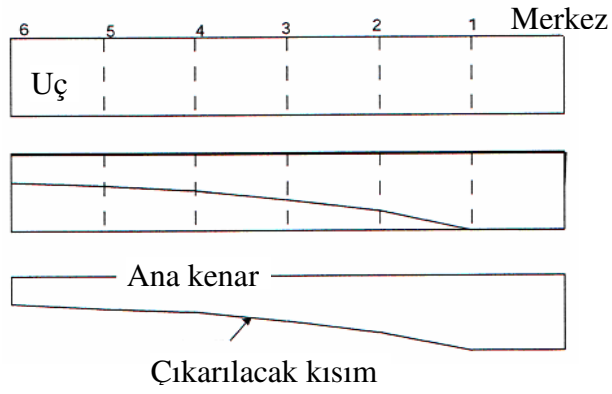
Kanat çapı ve rüzgar hızının çok önemli olduğu görülmektedir. Eğer çap iki katına çıkartılırsa güç dört kat artacaktır. Rüzgar hızı iki katına çıkartılırsa güç sekiz kat artacaktır. Hız, kanatların rüzgardan ne kadar yüklenebildiğine bağlıdır. Kanat sayısı azaldıkça tork azalacak fakat kanat dönme hızı artacaktır.

Rotor kanatları istenen tork, kanat hızı ve ortamdaki rüzgar hızına göre tasarlanmalıdır. Bu bağlantı bilindiği gibi uç hız oranına (tsr) bağlıdır. Bazı uygulamalarda kanat uç hızı rüzgar hızından 10 kat daha hızlı dönmektedir. Fakat bu durumda kanat yapısı zarar görebilmekte ve gürültülü çalışmaktadır. Yaptığım çalışmada 2,4 m kanat çapı ve 3 m/s rüzgar hızında kullanışlı güç elde edilmeye çalışılmıştır. Rotor kanatları için öncelikle 1200 x 150 x 37 mm'lik ağaç malzeme hazırlanmıştır. Aşağıda verilen kanat profili elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.2. Kanat aralıkları ve kanat profili

Bu şekilde kanat profili çıkarmak için kanat uzun ekseninde aralıklara ayrılmıştır. Her aralıkta ulaşılmak istenen ölçü verilmiş ve bu ölçüye göre kanat profili çıkarılmıştır (27).



Şekil 4.3. Kanat aralıkları

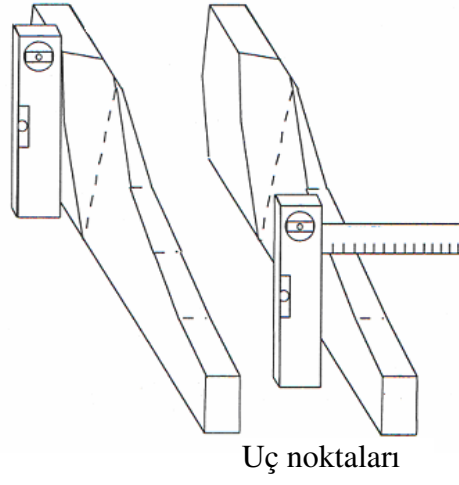
Çizelge 4.2. Aralık ölçüleri

ARALIK	MESAFE (mm)
1(merkez)	150
2	120
3	100
4	80
5	70
6 (uç)	60

Aralıklar ağaç malzeme üzerinde belirlendikten sonra aşağıda verilen ölçülerde aralıklardaki kanat kalınlıkları sağlanmıştır.

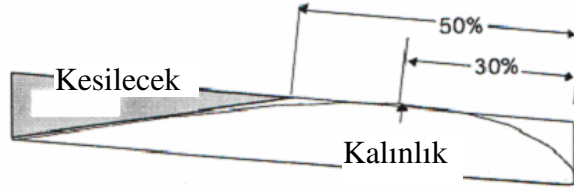
Çizelge 4.3. Aralık kalınlıkları

ARALIK	KALINLIK (mm)
1(merkez)	36
2	25
3	13
4	10
5	8
6 (uç)	7

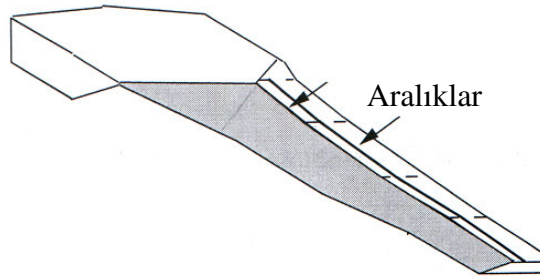


Şekil 4.4. Aralık kalınlıklarının ölçümü

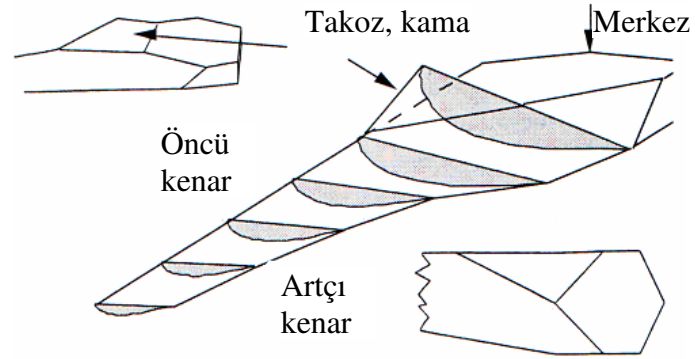
Aralıklardaki ölçüler sağlandıktan sonra aşağıda görülen balıksırtı kanat profilinin çıkartılması için kanat törpülenmiştir.



Şekil 4.5. Kanat profil ölçüsü



Şekil 4.6. Kanadın tamamının profil şekli



Şekil 4.7. Aralıklarda kanat profilleri

Hazırlanan kanatların merkezlerine vida yerleri açılmıştır. Aşağıdaki resimlerde, kanatları merkezde birleştirmek için hazırlanan malzemeler ve kanatların bitmiş hali görülmektedir.



Resim 4.1. Hazırlanan kanat malzemeleri

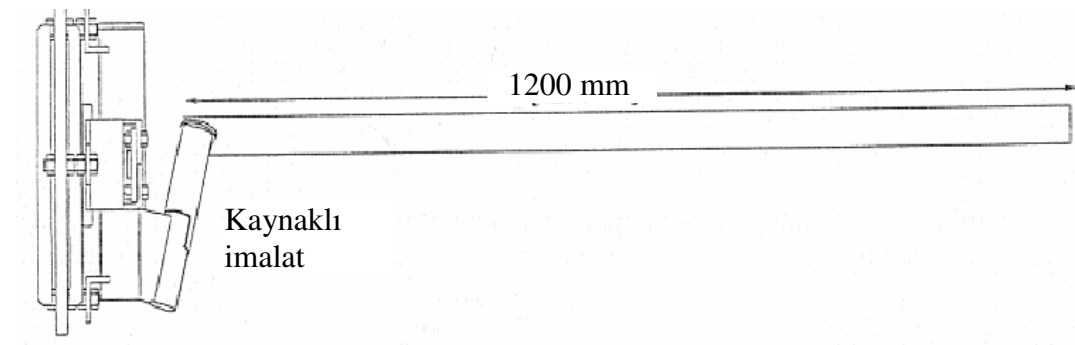


Resim 4.2. Kanatların birleştirilmiş hali

Kanat birleştirmesi yapıldıktan sonra kanat uç noktaları arasındaki uzaklık ölçülerek ve mesafelerin eşit olması sağlanarak balansı yapılmıştır. Sonuçta istenilen kanat profili resimde de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Kanatların farklı hava koşullarından zarar görmesini minimuma indirmek için koruyucu malzeme ve vernik ile kaplama yapılmıştır.

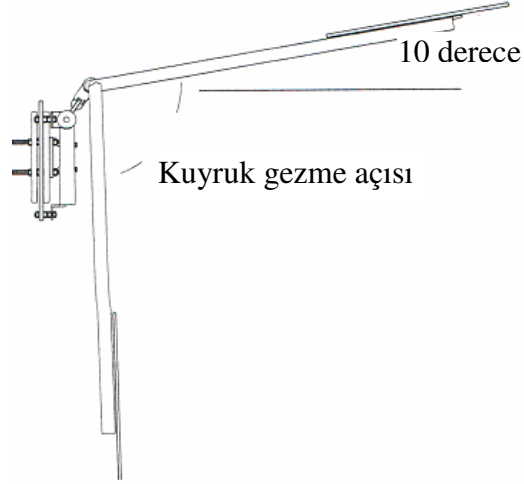
4.2. Yönlendirme Kanat Tasarımı ve İmalatı

Yönlendirme kanadının ilk görevi rotor kanatlarının rüzgar yönüne doğru yönlendirmektir. Yönlendirme kanadı büyük yapılarak yönlendirme görevini daha kolay ve hızlı yapabilmesi sağlanmıştır.



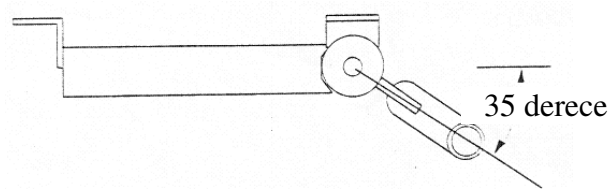
Şekil 4.8. Yönlendirme kanadı ölçüleri

Şekilden de görüldüğü gibi yönlendirme kanadının demiri, kule eksenine göre açı 20 derece yaptığı gibi yatay ekseninde devam ederken de yer yüzeyine paralel yapılmamıştır. 10 derecelik bir açı verilmiştir (27).

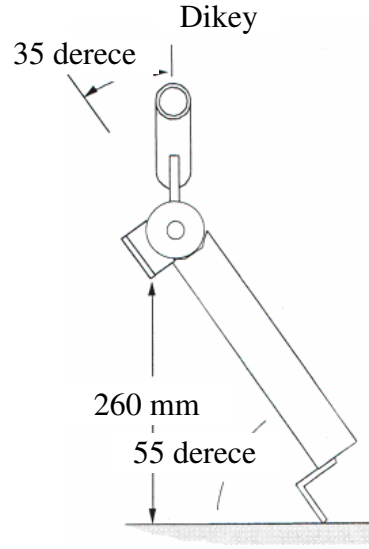


Şekil 4.9. Yönlendirme kanat açısı

Ayrıca kanatların rüzgara karşı dik durmaları pozisyonunda da yönlendirme kanadı yine kanat eksenine 35 derecelik bir açı oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Yönlendirme 120 mm uzunluğundadır. Kule ekseni ve kendi bağlantı borusu ile yaptığı açılar verilmiştir (27).



Şekil 4.10. Yönlendirme kanadı bağlantı boru şekli



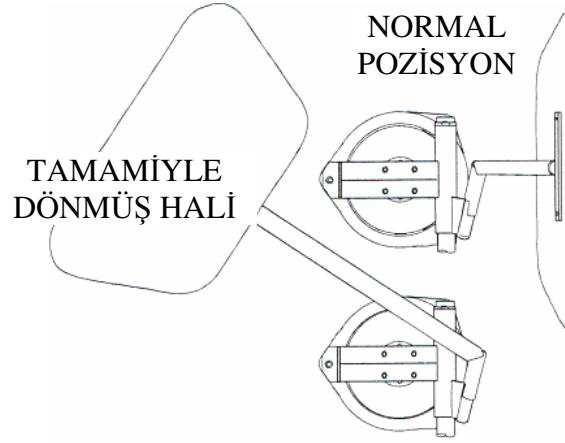
Şekil 4.11. Yönlendirme kanat ölçüleri

Gövdeye bağlanış şekli ve yapısı itibari ile fırtına sayılabilecek yüksek rüzgar hızlarında kanatlarla kavuşarak fırtınanın bozucu, kırıcı etkisinden kanatların ve diğer parçaların korunması sağlandığı gibi istenmeyen yüksek çıkış gücü de önlenmiş olacaktır. Bu şekildeki kuyruk sistemi hem rüzgar yönüne yönlendirme hem de yüksek rüzgar hızlarındaki yüklemenin önlenmesi amaçlanmıştır.

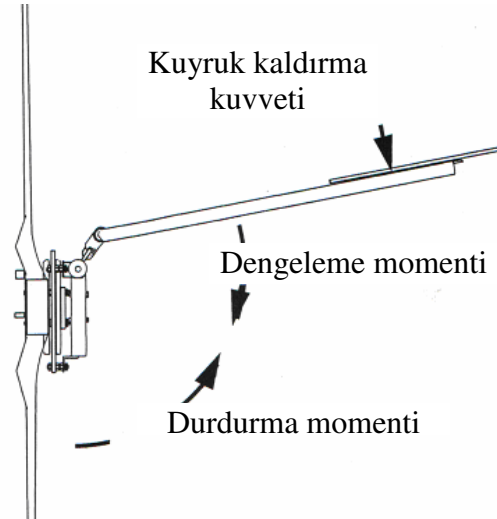
Bu şekilde oluşturulan tasarım ile kuyruk sisteminin fırtınalı durumlarda kanatların rüzgara karşı dik ekseninden uzaklaştırarak kanatların daha az rüzgar alması sağlanacak ve kanatlar ile sistem korunmuş olacaktır. Yönlendirme kanadı eksenden kayak olarak tasarlandığı için belirli rüzgar hızlarına kadar sadece yönlendirme görevini yapacaktır. Çünkü ağırlığından ve tasarımından dolayı belli bir eylemsizliği ve gücü vardır. Rüzgar hızı fırtına seviyesine ulaştığında rüzgar gücü yönlendirme kanadının bu eşik gücünü yenecek ve kanatları rüzgar yönünden kaydıracaktır (27).

Rüzgar hızı tekrar normale dönmeye başladığında veya azaldığında yönlendirme kanadı yapısı itibari ile eski konumuna kendiliğinden gelme eğiliminde olacaktır (27).

Aşağıda verilen şekilde yönlendirme kanadının normal ve fırtına durumunda alacağı şekil verilmiştir.



Şekil 4.12. Yönlendirme kanadının normal ve fırtınalı durumlarda alacağı pozisyonlar



Şekil 4.13. Yönlendirme kanadına gelen rüzgarın kaldırma kuvveti yönü

Kuyruk yine sert ağaç malzemeden imal edilmiştir. Yüzey kısmı boyanarak dış ortamın bozucu etkilerinden korunmaya çalışılmıştır.

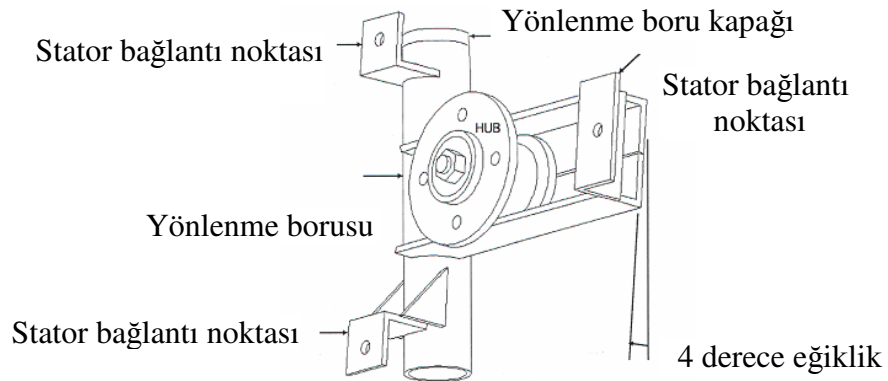


Resim 4.3 Yönlendirme kanadı

4.3. Sistemin Yataklanma Şekli ve İmalatı

Yataklamak için otomobil poryesi kullanılmıştır. Poryenin yapısı (Şekil 4.14) verilmiştir. Porye kullanılmasının sebebi istediğimiz vibrasyona dayanabilecek mukavemette olması ve imalatta kolaylık sağlamasıdır. Porye kuleye demir köşebentler kullanılarak sabitlenmiştir.

Kule demirine ve poryenin bağlandığı köşebende alternatörün sabitlenmesi için vida yerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Porye ve bağlantı şekli

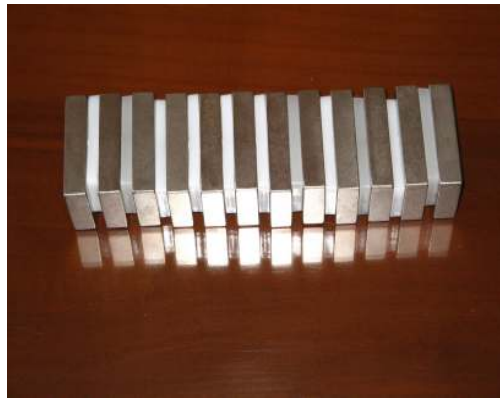
Porye dolayısı ile kanatlar dik eksene 4 derece açı yapacak şekilde kaynağı yapılmıştır. Bunun sebebi, kanatların rüzgarı tam karşılaması içindir (27).

4.4. Jeneratör İmalatı

Jeneratör, sabit mıknatıslı aksenal akı yollu ve kanatlara doğrudan bağlanmıştır. Jeneratör, iki sabit mıknatıslı rotor arasında sandviç şeklinde ortada stator olacak şekilde tasarlanmıştır. Kanalsız aksenal akı yollu N-S jeneratör tasarlanmıştır. Güçlü manyetik akı, statordaki sargılardan geçip yolunu tamamlayacaktır. Rotorun dönmesiyle oluşan hareketli manyetik akı sabit stator sargılarında alternatif akım endükleyecektir. Rotordaki sabit mıknatıslar karşılıklı dizilip sabitlenecek ve mile yataklanacaktır. Kullanılan mıknatıslar NdFeB (neodim) mıknatıslardır (4, 27-39).

4.4.1. NdFeB(Neodim) mıknatıs

Neodyum mıknatıslar, 1980’li yıllarda General Motor (USA) ve Sumitomo Special Metals of Japan şirketleri tarafından eş zamanlı olarak fakat farklı yollarla $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ özellikli mıknatısı geliştirmişlerdir. Manyetik akı yoğunlukları veya manyetik güçleri önceki mıknatıslara göre oldukça büyüktür. Boyutlarının da küçük olmasından dolayı çok geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Aşağıdaki şekilde yıllara göre mıknatıs çeşitleri ve manyetik akı şiddeti değerleri verilmiştir (29).



Resim 4.4. Neodyum mıknatıslar

Çeşitli mıknatıslar ve özellikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

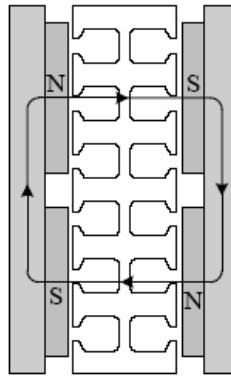
Çizelge 4.4. Sabit mıknatıs verileri (28).

Materyal	B (T)	H (kA/m)	Bhmax (kJ/m ³)	T max (°C)
Alnico V	1,280	51	44	>300
Ferrite	0,385	235	28	<100
Mn-Al-C	0,560	239	61	
SmCo ₃	0,870	637	146	=250
Nd ₁₅ B ₈ Fe ₇₇	1,230	881	290	=150

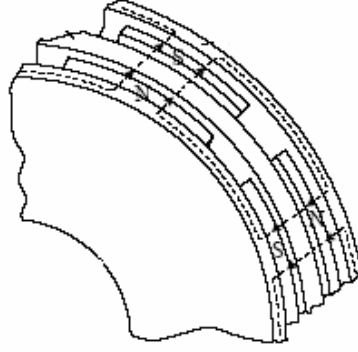
Çalışmada N40 diye adlandırılan neodyum mıknatısı kullanılmıştır ve mıknatıs değerlerini gösteriri üretici bilgisi Ek 1’de verilmiştir.

4.4.2. Rotor tasarımı ve imalatı

Her iki rotorda 14 manyetik blok vardır. Mıknatıs blokları rotorun içine sabitlemek için polyester karışım dökülerek gömülmüş ve dış ortamdan kaynaklanan korozyona korunarak yalıtımı sağlanmıştır. Her mıknatısın bir N bir de S kutbu vardır. Karşılıklı rotor yüzeylerinde N kutbunun karşısında S kutbu gelecek şekilde dizilmişlerdir. Böylelikle manyetik akı rotordan statoru geçip diğer rotora ulaşacak ve yan yana ardışık dizildiğinden dolayı akı yolunu aşağıda Şekil 4.17’de gösterildiği gibi tamamlayacaktır. (24, 27, 30, 33, 38, 40).

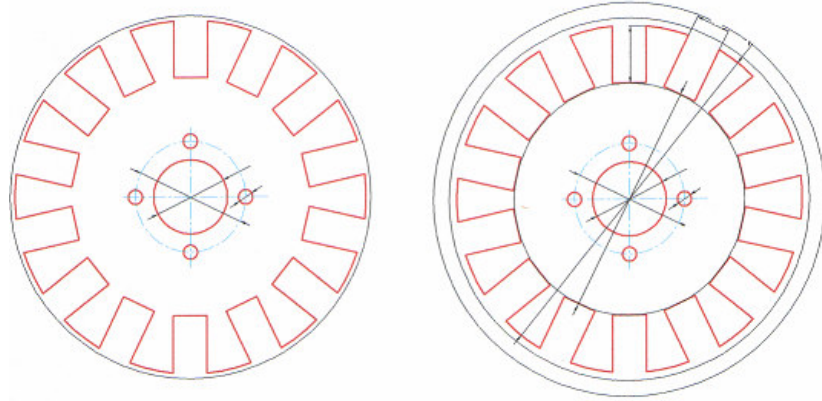


Şekil 4.15. Manyetik akı yolu



Şekil 4.16. Manyetik akı yolunun üç boyutlu gösterimi

Mıknatısların rotor plakası üzerine hassas yerleşimi için autocad programında ölçekli şekli çizilmiştir. Şekil 4.19’da mıknatıs bloklarının yerleşimi için hazırlanan şekil görülmektedir.



Şekil 4.17. Rotor nüvesine mıknatıs bloklarının dizilmesi için hazırlanan yardımcı kalıp autocad çizimi

Manyetik akı çelik veya demir üzerinde kolay yol alır. Rotor diskleri çelik malzemedan yapılmıştır. Rotor 310 mm çapında ve 8 mm kalınlığında çelik plaka üzerine 14 adet mıknatısın ardışık olarak dizilmesiyle elde edilmiştir. Diziliş planı autocad programında hazırlanarak kağıt üzerine çizdirilmiş ve mukavva malzeme üzerine yapıştırılarak yardımcı kalıp hazırlanmıştır. Çok güçlü olan mıknatısları plaka üzerine çok hassas bir şekilde yerleştirmek için hazırlanan yardımcı kalıp

vasıtası ile yönleri belirlenen mıknatıslar çok güçlü yapıştırıcı ile çelik plaka üzerine yapıştırılmıştır.



Resim 4.5. Rotor nüvesi, yardımcı kalıp ve bobinlerin görünüşü



Resim 4.6. Rotor nüvesi üzerine yapıştırılan mıknatıs bloklarının görünüşü



Resim 4.7. Hazırlanan iki rotorun görüntüsü

4.4.3. Stator tasarımı ve imalatı

Stator, elde ettiğimiz manyetik alandan maksimum güç alabilecek şekilde tasarlanmaya çalışılmıştır. Akı yolundaki bobin sayısı artırılarak doğru akıma yakın bir alternatif akım veya gerilim elde edilmeye çalışılmıştır.

Stator üzerinde 10 adet bobin oluşturulmuştur. Mıknatıs bloklarının hareketi ile her bobin üzerinde alternatif gerilim indüklenmesi sağlanmıştır. İndüklenen gerilim değeri;

- Dönme hızına
- Manyetik akı şiddetine
- Bobinlerdeki sarım sayısına bağlıdır (27).

Stator üç yerinden vidalanarak sabitleştirilmiştir. Jeneratör normal devrinde 24 volt gerilim üretecek şekilde tasarlanmıştır. Bunun için;

Çıkışta 24 volt alabilmek için gerekli sarım sayısını bulmak için;

Faraday kanunundan;

Hareketli manyetik alan içinde sabit bir iletkende endüklenen gerilimin etkin değeri,

$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot m \cdot \Phi \cdot f \cdot 10^{-8} \quad (Volt) \quad [4.4]$$

olacaktır (41).

Bu formülde,

N = İletken sayısı

m = Seri bobin sayısı

ϕ = Bir kutup çiftinin manyetik akısı (Maxwell)

f = Frekans (Hz)

$$f = \frac{2P \times n}{120} (Hz) \text{ dir.} \quad [4.4]$$

2P = Kutup sayısı,

n = Devir sayısı (d/dk)

Tasarlanan jeneratördeki özellikleri kullanacak olursak;

E = 24 Volt elde etmek için;

ϕ = Manyetik akı

$\phi = B \times A$ ise,

B = 1,2 Tesla maksimum değeridir.

Mıknatıs yüzeyindeki manyetik akı yüzeyden uzaklaştıkça azalacaktır. İki mıknatıs yüzeyi arasında stator ve hava aralığı olduğundan ayrıca statorda nüve kullanılmadığından manyetik akı düşecektir.

B = 4000 gauss = 0,4 T (Tesla) olarak alınır;

A = mıknatısın alanı

50 x 30 mm mıknatıs blokları kullanıldığı için;

A = 0,0015 m²

$\phi = 0,4 \times 0,0015 = 0,0006$ Tesla x m² olacaktır

Tesla x m² = 10⁸ Maxwell'dir.

m = 1, 2P = 28, n = 300 d/dk

F = 35 Hz olacaktır.

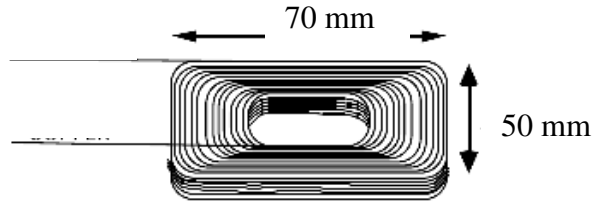
Değerler yerlerine konursa;

24 = 1,414 x 3,14 x 0,0006 x N x 35 10⁸ x 10⁻⁸ Volt buradan,

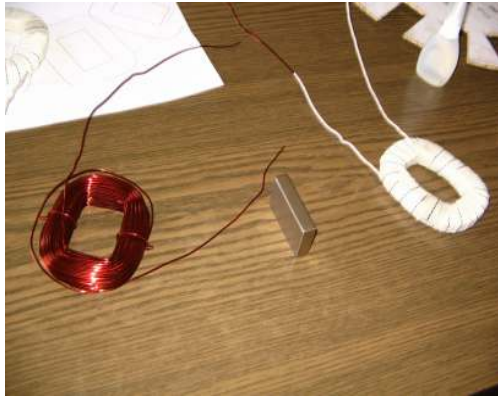
N = 258 iletken bulunur.

Bobinler 130 sipir olacak şekilde sarılmıştır. Jeneratörden çekilecek güç göz önüne alınırsa 1,15 mm çapında emaye bakır iletken yeterli olacaktır.

Bobinlerin sarım sayısı ve iletken kalınlığı belirlendikten sonra bobinler sarılmıştır. Bobinlerin sarımını kolaylaştırmak için tahtadan bobin sarım düzeneği yapılmıştır.



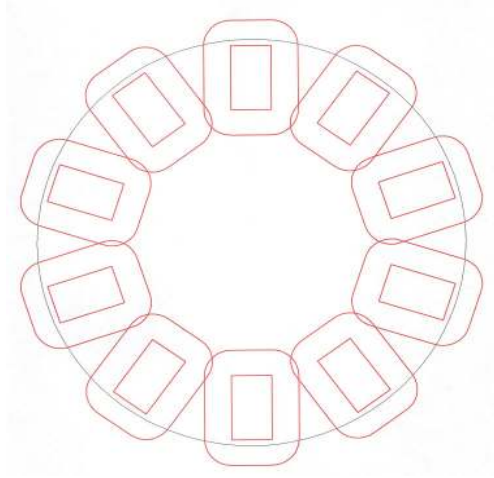
Şekil 4.18. Sarılmış bobin ölçüsü ve şekli



Resim 4.8. Sarılan bobinlerin görünüşü

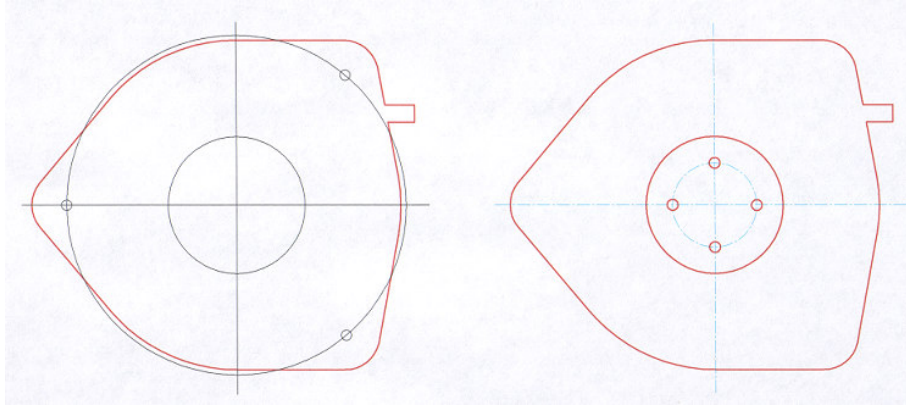
Bobin teli, emaye bakır tel 1,15 mm çapında ve yüksek sıcaklığa dayanıklı H sınıfı tel kullanılmıştır. Jeneratör aşırı yüklendiğinde bobinlerde yüksek akımdan dolayı sıcaklık yükselecektir.

Bobinlerin stator kalıbı içine hassas yerleştirilebilmesi için autocad programında gerçek ölçüsünde çizimi yapılmıştır. Yapılan bu çizim kalıp içerisine konarak yerleştirme hassas ve milimetrik ölçülerde yapılmıştır.



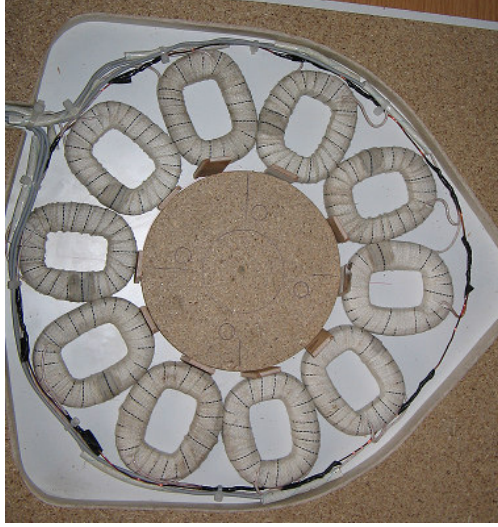
Şekil 4.19. Statora bobinlerin yerleştirmek için hazırlanan autocad çizimi

Stator kalıbının şekli yine autocad programında hazırlanmıştır. Hazırlanan kalıp şekli gerçek ölçülerinde çıktısı alınarak tahta kalıp hazırlanmıştır. Aşağıdaki şekilde stator kalıbının autocad çıktısı görülmektedir.



Şekil 4.20. Stator kalıp için hazırlanan autocad çizimi

Jeneratör yıldız bağlı tasarlanmıştır. Yıldız bağlanan bobinlerin şekli aşağıda verilmiştir. Yıldız bağlanan bobinler stator kalıbı içine yerleştirilmiştir.



Resim 4.9. Stator kalıbın içine bobinlerin yıldız bağlanarak yerleştirilmesi

Rotor ve stator için kalıplar yardımcı kalıp çizimleri kullanarak hazırlanmıştır. Kalıplar sunta malzemeden yapılmıştır. Stator ve iki adet rotor hazırlanan kalıpların içerisine yerleştirilmiştir.



Resim 4.10. Kalıpları hazırlanan rotor ve stator

Mekanik dayanımı sağlamak için rotor ve stator kalıp içerisine polyester reçine dökülmüştür. Polyester reçine normalde sıvı haldedir. İçerisine katalizör eklendiğinde kısa bir sürede katılaşır. Reçine katılaştıktan sonra kırılganlığını azaltmak ve esneme oranını düşürmek için talkum tozu ilave edilmiştir. 2 adet rotor ve bir adet stator için;

- 400 gr polyester reçine
- 5 cc katalizör
- 400 gr talkum tozu kullanılmıştır.

Karışım bir araya getirildikten sonra homojenliği sağlamak için iyice karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım, kalıplar üzerine dökölmüştür (27).



Resim 4.11. Karışımın hazırlanması



Resim 4.12. Polyester reçinenin kalıplara dökölmesi

Hava boşluğu kalmaması için polyester reçine, kalıbın içinde de karıştırılmış ve tüm yüzeye yayılmıştır.



Resim 4.13. Polyester reçinenin kalıplara dökülmüş hali

Üst yüzeyin kalıptan düzgün çıkması için üstüne tahta plaka kapatılarak ve mengenelerle sıkıştırılarak kurumaya bırakılmıştır. Çok kısa bir sürede katılaştan polyester karışım düzgün bir şekil almıştır.



Resim 4.14. Kalıpların üzerinin kapatılması



Resim 4.15. Kalıpların mengene ile sıkılması



Resim 4.16. Kalıptan çıkarılan stator

Kalıbı sökülmüş stator Resim 4.16’da görülmektedir. Yüzeylerde oluşan çıkıntılar zımparalanarak düzeltilmiştir. Rotorlar ile stator arasındaki açıklığın en aza indirmek için yüzey pürüzsüz ve düz hale getirilmiştir. Pürüzlülüğü azaltılan rotor ve stator boyanmıştır.



Resim 4.17. Stator ve rotorun przszleştirilmesi



Resim 4.18. Boyanmış rotor ve stator

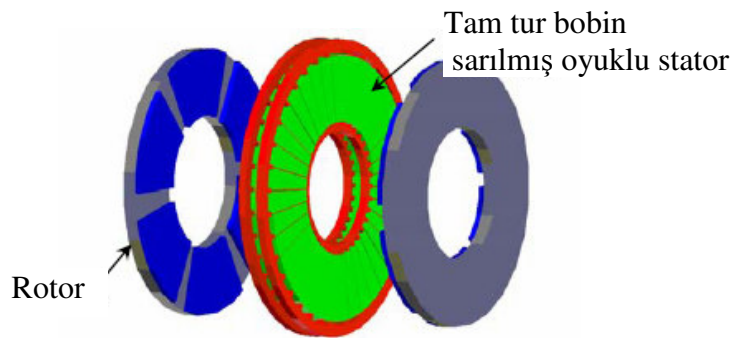
Rotorlar ve stator, göbek üzerindeki yerlerine monte edilmiştir. Montaj yapılırken dikkat edilmelidir. Farklı kutuplar karşılıklı geldiğinden dolayı çok güçlü bir çekim oluşmaktadır.



Resim 4.19. Stator ve rotorların birleştirilmiş hali

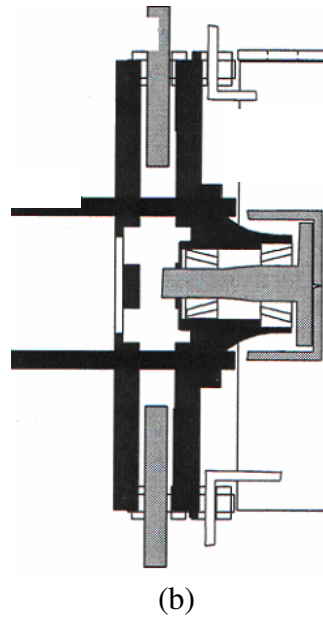
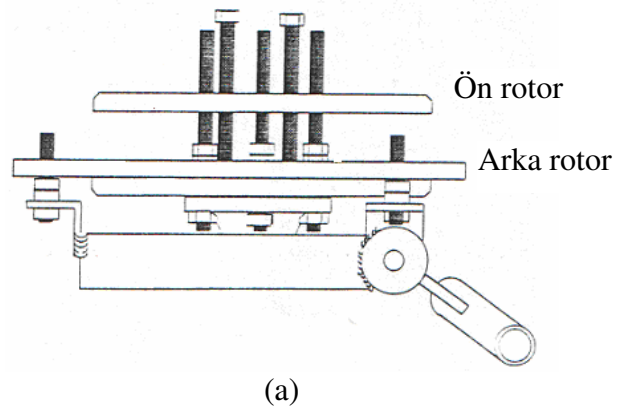
Yerleştirme sonucunda resimde görülen vidalar statoru sabit tutmaktadır. Rotorlar ise doğrudan kanatlara monte edilmekte ve dairesel hareketi alarak dönmektedir. Sistemde bobinler sabit durmakta manyetik akı dönme hareketi yaparak güç üretilmektedir.

Hazırlanan rotorlar ve stator şekilde görüldüğü gibi göbek üzerine yerleştirilecektir. Stator ön ve arka rotorlar arasında kalacaktır.



Şekil 4.21. Stator ve rotorların görünüşü (24)

Aşağıda jeneratör tasarım şekilleri değişik profillerden gösterilmiştir (27).



Şekil 4.22. Stator ve rotorların görünümü

a-Yatay görünüm

b-Dikey görünüm



Resim 4.20. Stator ve rotorların porye ve kanatlara bağlanmış şekli

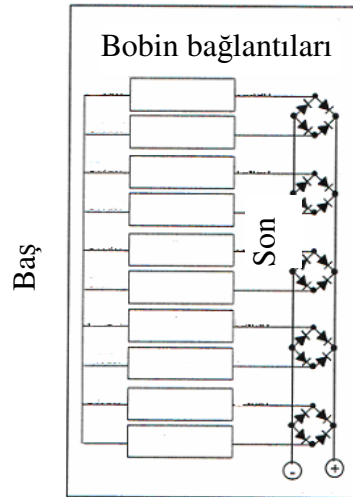
4.5. Doğrultucu Devresi Tasarımı ve İmalatı

Stator sargıları yıldız bağlanmış ve bobin uçları tek tek çıkarılmıştır. Stator tarafından alternatif gerilim üretilmektedir. 10 adet bobinden oluşan sistemde 5 adet köprü diyot ile doğru gerilime dönüştürülmüştür.

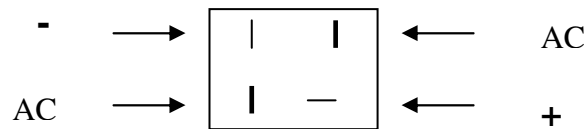


Resim 4.21. Tek fazlı köprü doğrultucular (35 A, 600V)

Bobin çıkışlarının doğrultucular üzerine bağlantı şeması aşağıda verilmiştir.

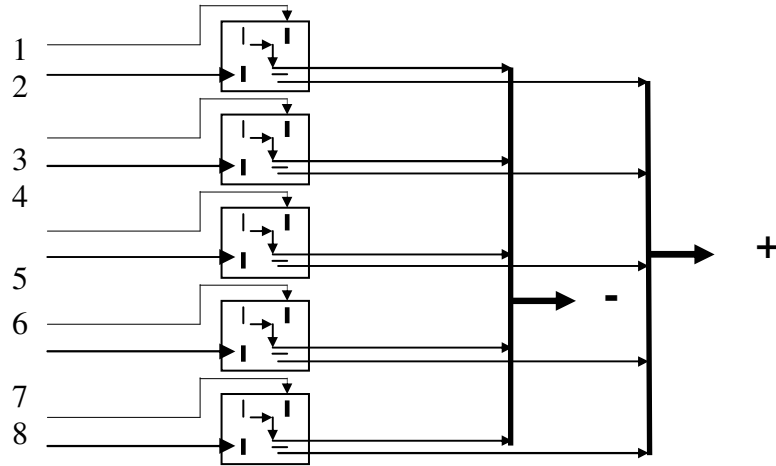


Şekil 4.23 Bobin çıkışlarının doğrultuculara bağlanma şekli



Şekil 4.24. Köprü diyot bağlantı uçları

Tek tek alınan bobin çıkışları köprü diyotlara aşağıda şekilde verildiği bağlanarak tam dalga doğrultulmuş ve + ile – uçlar birleştirilerek tek faz DC gerilim elde edilmiştir (27).



Şekil 4.25. Bobinlerin köprü diyotlara bağlanması ve çıkış uçları

Sıralı olarak bağlanan köprü diyotlardan şekilde görüldüğü gibi DC gerilim + ve – uçları alınmıştır. Bobin çıkış uçları ardışık olacak şekilde köprü diyotlara girilmiştir. Jeneratör çıkışından 900 watt civarında güç alınacağı hesaplandığı için köprü diyotlar 35 A seçilmiştir. Üzerinden yüksek akım geçeceği için köprü diyotlar ısınacaktır. Isınan köprü diyotların soğutulması için alüminyum soğutucu malzeme kullanılmıştır. 5 adet köprü diyot resimde görüldüğü gibi alüminyum soğutucu malzeme üzerine montajı yapılmıştır.



Resim 4.22. Köprü doğrultucuların alüminyum soğutucu üzerine monte edilmesi

Sonuç olarak aşağıdaki resimde verildiği gibi rüzgar türbini imal edilmiştir.



Resim 4.23. Rüzgar türbininin bitmiş görüntüsü

4.6. Depolama

Çıkışta elde edilen DC gerilim akülerde depolanmıştır. Çıkış gerilimi rüzgarın hızına göre değişeceğinden dolayı akü şarj edilirken şarj akımının kontrol altına alınması gerekir. Akü dolduğunda da akünün şarjının durdurulması gerekir. Akünün şarj-deşarj sayısı çok fazla olacağından uygun özellikli akü seçilmelidir. Günlük kullanım 1 kWh düşünülürse akü ihtiyacı;

Kapasitenin % 40'ının altına inecek kadar aküler boşaltılmamalıdır. Akü kapasitesinin % 60'ının kullanılacağı düşünülürse;

24 VDC akü grubu için $1000\text{Watt.saat} / 24\text{V} = 40\text{ Ah}$ demektir.

Buna göre; günlük akü kapasitesi

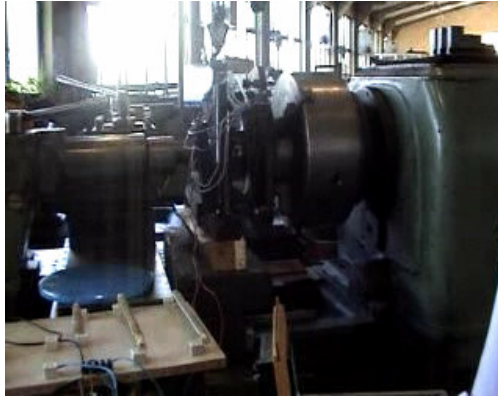
$$40 / 0,6 = 70\text{ Ah.}$$

Olacaktır.

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Deney Düzenegi ve Deneyin Yapılışı

Jeneratör, çeşitli sabit devirler verebilen bir torna tezgahına bağlanmıştır. Köprü diyotlardan çıkan DC çıkışa çeşitli rezistif yükler bağlanarak çıkış gerilimi ve akımı ölçülmüştür. Torna tezgahına bağlanan jeneratör görülmektedir.



Resim 5.1. Torna tezgahına bağlanan jeneratör görüntüsü

Akım ve gerilim değerlerini ölçmek için kullanılan ölçü aletleri görülmektedir.



Resim 5.2. Ölçü aletleri

Jeneratörü yüklemek için rezistif yük kullanılmıştır. Belirli yüklerde güç değerlerini belirlemek için yüklerin direnç değerleri aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$P = U \times I = I^2 \times R \text{ ise;} \quad [5.1]$$

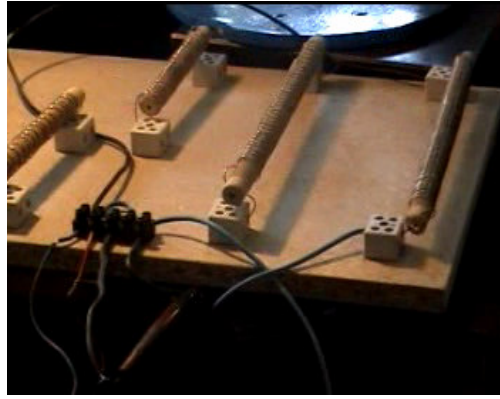
$$100 \text{ Watt} = 24 \text{ volt} \times I$$

$$I = 4,16 \text{ A}$$

yerine konursa;

$$(4,16)^2 \times R = 100 \text{ Watt}$$

$$R = 5,76 \, \Omega \text{ bulunmuştur.}$$



Resim 5.3. Rezistif yükler için hazırlanan deneysel platform görüntüsü

Krom-nikel rezistansın özgül direnci $= 1,12 \, \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ dir.

$$R = \frac{L \rho}{S} \quad [5.2]$$

telin uzunluğu,

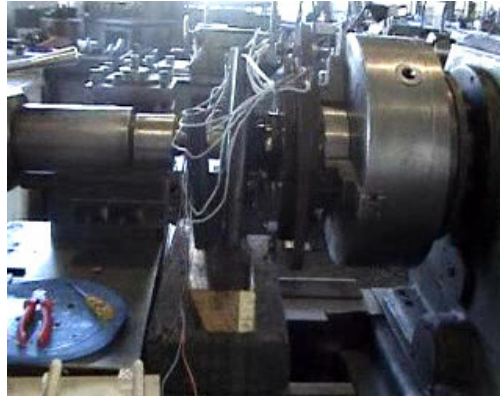
$$L = \frac{R \cdot S}{\rho} \quad [5.3]$$

$$L = (5,77 \times 0,785) / 1,12 = 4,04 \text{ m}$$

Krom-nikel rezistans tel 4,04 m kullanılmıştır. Aynı şekilde diğer yükler için kullanılan telin direnç değerleri ve uzunlukları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

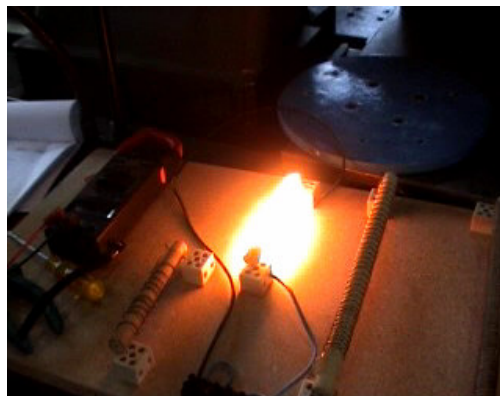
Çizelge 5.1. Rezistif yükler için direnç, kesit ve uzunluk değerleri

YÜKLER	DİRENÇ (Ω)	KESİT (mm^2)	UZUNLUK (m)
100 W	5,77	0,785	4,04
200 W	2,88	0,785	2,02
300 W	1,92	0,785	1,34
400 W	1,44	0,785	1,01
500 W	1,15	0,785	0,80
600 W	0,96	0,785	0,67
700 W	0,82	0,785	0,57
750 W	0,76	0,785	0,53
1000 W	0,57	3,14	1,59



Resim 5.4. Deneysel veriler alınacak duruma getirilmiş deney düzeneği

Deneysel veriler alınabilecek hale getirilmiş sistem görülmektedir.



Resim 5.5. Jeneratörün yüke bağlı 400 devir/dk ile dönmesi ve alınan güç görüntüsü

Jeneratör sabit devir verebilen torna tezgahına bağlanmıştır. Torna tezgahı, dakikada 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400 devirlerde döndürülebiliyor. Deneysel veri alabilmek için hazırlanan rezistif yükler 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 750, 1000 Watt'tır. Bütün devir sayılarında, hazırlanan yüklerin tamamı bağlanmıştır. Okunan değerler kaydedilmiştir (31, 35, 42, 43).

5.2. Deneysel Sonuçlar

Deney yapıldıktan sonra alınan veriler tablolar halinde sunulmuştur.

Çizelge 5.2. 100 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
100 W	50	1,0	6,0	6,00
100 W	63	1,35	6,8	9,18
100 W	80	1,75	8,8	15,40
100 W	100	2,3	11,4	26,22
100 W	125	2,95	15,2	44,84
100 W	160	3,75	19,6	73,50
100 W	200	4,7	24,8	116,56
100 W	250	5,8	31,2	180,96
100 W	315	6,5	40,0	260,00
100 W	400	8,0	50,0	400,00

Çizelge 5.3. 200 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
200 W	50	1,5	5,0	7,50
200 W	63	2,0	7,0	14,00
200 W	80	3,0	9,0	27,00
200 W	100	3,5	11,0	38,50
200 W	125	4,8	15,0	72,00
200 W	160	6,0	19,0	114,00
200 W	200	7,2	23,0	165,60
200 W	250	9,0	29,0	261,00
200 W	315	11,2	36,0	403,20
200 W	400	14,0	45,0	630,00

Çizelge 5.4. 300 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
300 W	50	2,0	4,8	9,60
300 W	63	2,9	5,6	16,24
300 W	80	4,0	7,4	29,6
300 W	100	5,0	9,6	48,0
300 W	125	6,2	12,8	79,36
300 W	160	7,9	16,8	132,72
300 W	200	9,9	21,2	209,88
300 W	250	12,2	26,8	326,96
300 W	315	15,0	33,6	504,00
300 W	400	18,0	43,0	774,0

Çizelge 5.5. 400 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
400 W	50	3,0	4,0	12,00
400 W	63	3,5	4,4	15,40
400 W	80	4,5	7,0	31,50
400 W	100	6,0	9,0	54,00
400 W	125	7,5	12,0	90,00
400 W	160	9,5	15,2	144,40
400 W	200	12,0	19,6	235,20
400 W	250	14,5	24,8	359,60
400 W	315	18,5	32,0	592,00
400 W	400	22,5	40,0	900,00

Çizelge 5.6. 500 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
500 W	50	3,2	3,2	10,24
500 W	63	4,2	4,8	20,16
500 W	80	5,5	6,4	35,20
500 W	100	7,2	8,4	60,48
500 W	125	9,2	11,0	101,20
500 W	160	12,0	14,4	172,80
500 W	200	15,0	18,8	282,00
500 W	250	18,0	23,2	417,60
500 W	315	22,5	30,0	675,00
500 W	400	27,0	37,0	999,00

Çizelge 5.7. 600 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
600 W	50	3,5	3,2	11,20
600 W	63	5,0	4,8	24,00
600 W	80	6,0	6,2	37,20
600 W	100	7,5	8,4	63,00
600 W	125	10,0	10,8	108,00
600 W	160	12,7	14,0	177,80
600 W	200	15,5	18,4	285,20
600 W	250	19,2	22,0	422,40
600 W	315	24,0	28,8	691,20
600 W	400	30,0	35,2	1056,00

Çizelge 5.8. 700 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
700 W	50	4,0	3,2	12,80
700 W	63	5,2	4,4	22,88
700 W	80	6,9	6,0	41,40
700 W	100	8,8	7,6	66,88
700 W	125	11,2	10,4	116,48
700 W	160	14,3	13,2	188,76
700 W	200	17,8	17,2	306,16
700 W	250	22,0	21,2	466,40
700 W	315	27,0	27,0	729,00
700 W	400	33,0	33,0	1089,00

Çizelge 5.9. 750 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
750 W	50	4,0	3,2	12,80
750 W	63	5,3	4,4	23,32
750 W	80	7,2	5,6	40,32
750 W	100	9,2	7,2	66,24
750 W	125	12,2	9,6	117,12
750 W	160	16,0	12,4	198,40
750 W	200	20,0	16,0	320,00
750 W	250	25,0	20,0	500,00
750 W	315	31,0	24,8	768,80
750 W	400	38,0	30,0	1140,00

Çizelge 5.10. 1000 Watt yük altında alınan akım, gerilim ve güç değerleri

YÜK	DEVİR	AKIM (A)	GERİLİM (V)	GÜÇ (WATT)
1000 W	50	5,0	2,8	14,00
1000 W	63	6,8	3,6	24,48
1000 W	80	9,0	5,0	45,00
1000 W	100	11,5	6,4	73,60
1000 W	125	15,3	8,8	134,64
1000 W	160	20,0	11,0	220,00
1000 W	200	25,0	14,0	350,00
1000 W	250	31,0	17,2	533,20
1000 W	315	38,0	21,2	805,60
1000 W	400	45,0	26,0	1170,00

Deney düzeneğinde alınan sonuçlar incelendiğinde, devir sayısı arttıkça jeneratör çıkışında alınan akım, gerilim ve sonuç olarak gücün arttığını görmekteyiz. Döner alan hızının artması çıkış gücünün artmasıdır.

Jeneratör farklı yüklerde aşağı yukarı aynı karakteristiği göstermiştir. Fakat jeneratör çıkışına bağlanan güç artırıldığında, çekilen akım artmasına rağmen gerilim değeri aynı oranda artış gösterememiştir. Yük arttıkça gerilimin artış ivmesi düşmüştür. Bunun sonucu olarak da aynı devirde farklı yükler jeneratöre bağlı iken farklı güç çıkışı elde edilmiştir

İmalatı gerçekleştirilen rüzgar türbini Konya merkez akyokuş mevkiinde 2,5 m'lik bir kule üzerine yerleştirilmiştir. Jeneratör çıkışı boştaki çok yüksek devirlere ulaşmaktadır. Jeneratör çıkışına bağlanan yük miktarına göre devir sayısı değişmektedir. Sağlıklı bir çalışma yani istenen güce ulaşmak için, yeterli yüksekliğe monte edilmelidir. Rüzgar türbini, rüzgar yönüne göre yönelmiş ve düşünülenin çok altında vibrasyon meydana gelmiştir.



Resim 5.6. Türbininin yüksek bir tepede görüntüsü



Resim 5.7. Türbininin yüksek bir tepede diğer görüntüsü



Resim 5.8. Türbininin yüksek bir tepede arkadan görüntüsü

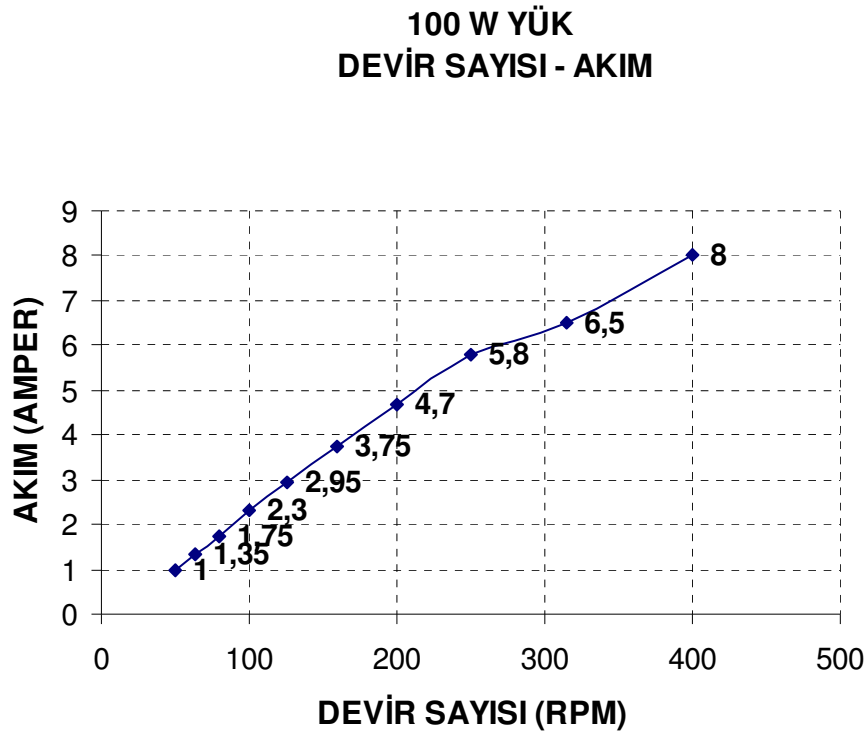


Resim 5.9. Türbininin yüksek bir tepede yandan görüntüsü

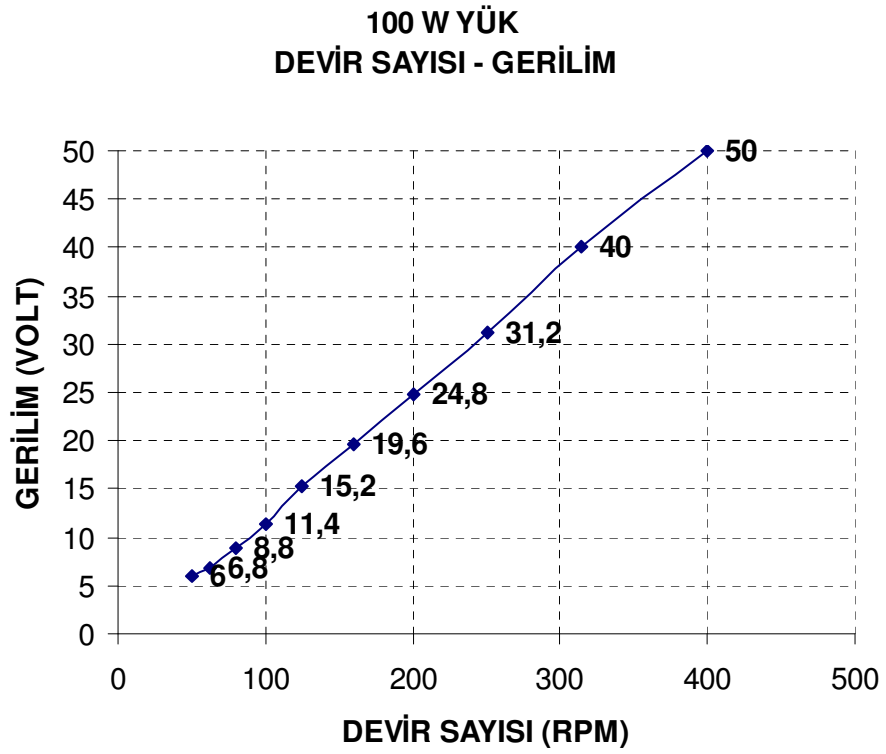


Resim 5.10. Türbininin yüksek bir tepede işletmede 21 W'lık ampul bağlı iken görüntüsü

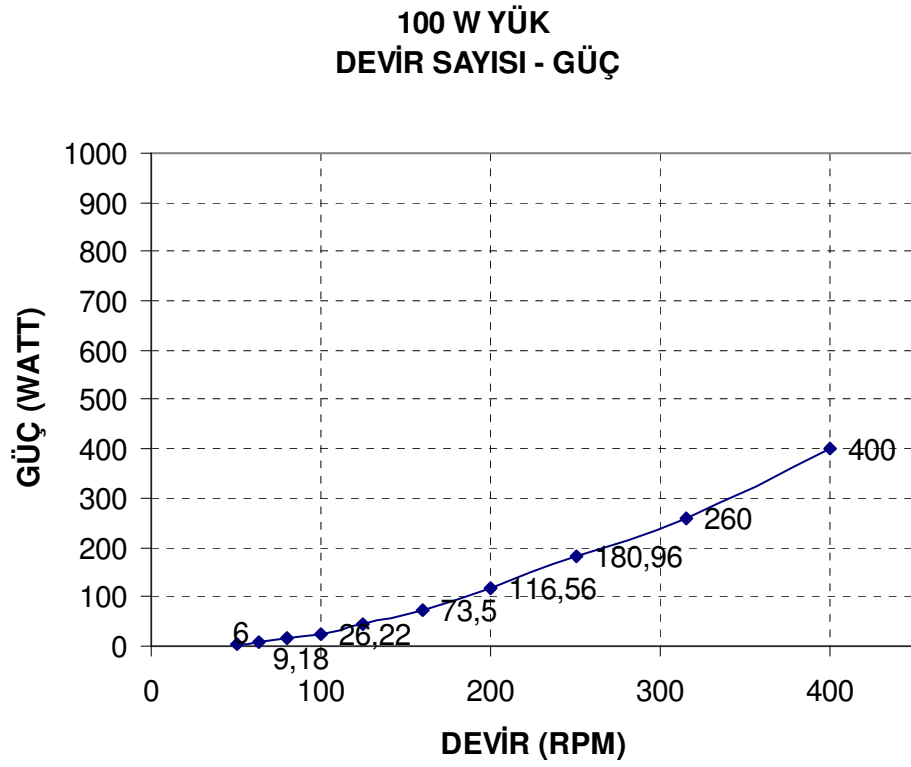
Deneyisel sonuçların daha iyi analiz edilmesi için grafik çizimler hazırlanmıştır.



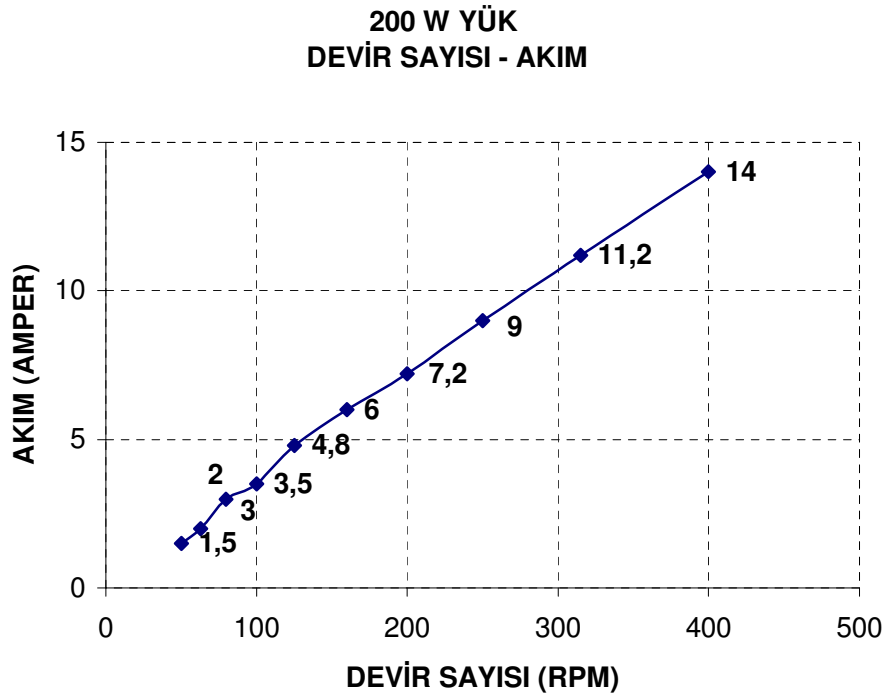
Şekil 5.1. 100 W yükte akım grafiği



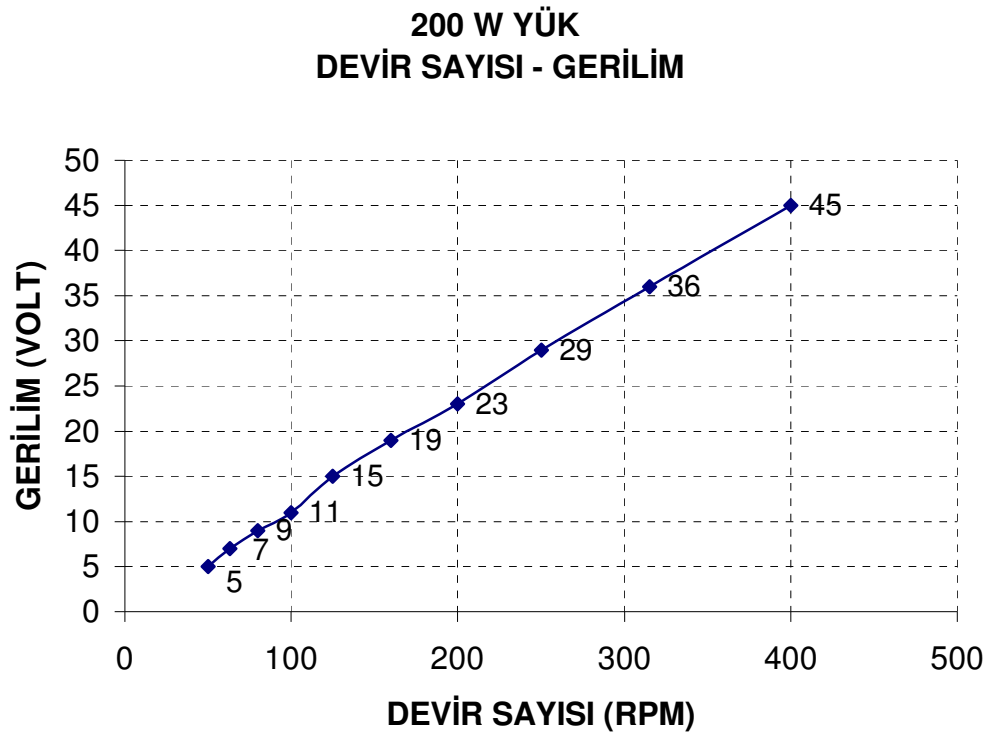
Şekil 5.2. 100 W yükte gerilim grafiği



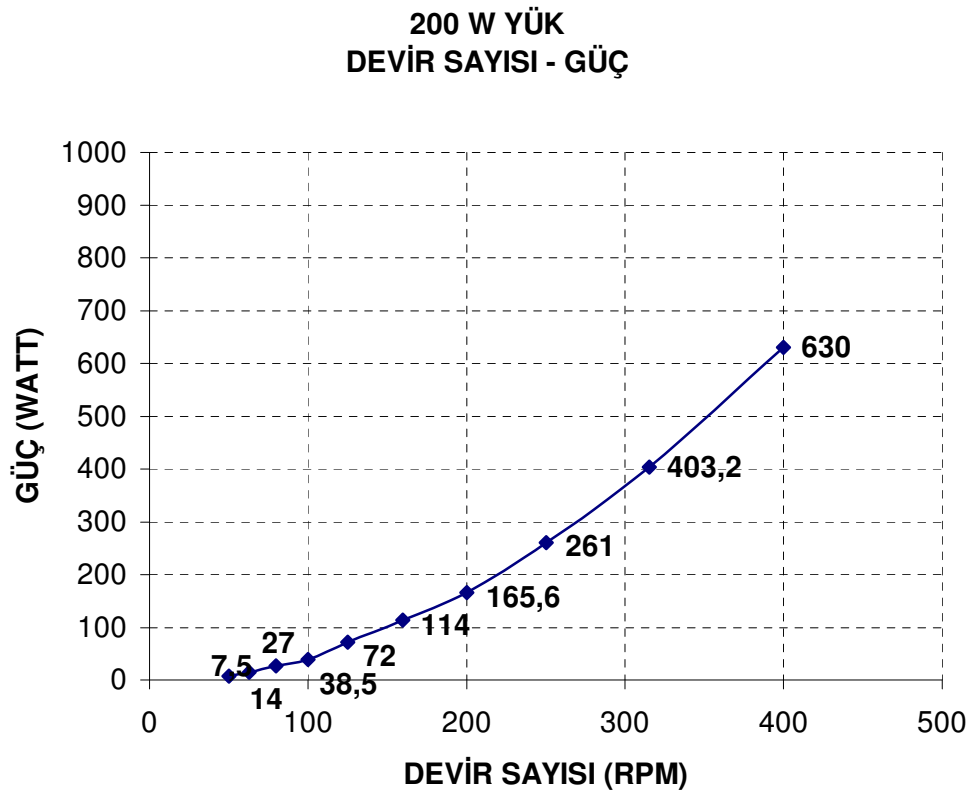
Şekil 5.3. 100 W yükte güç grafiği



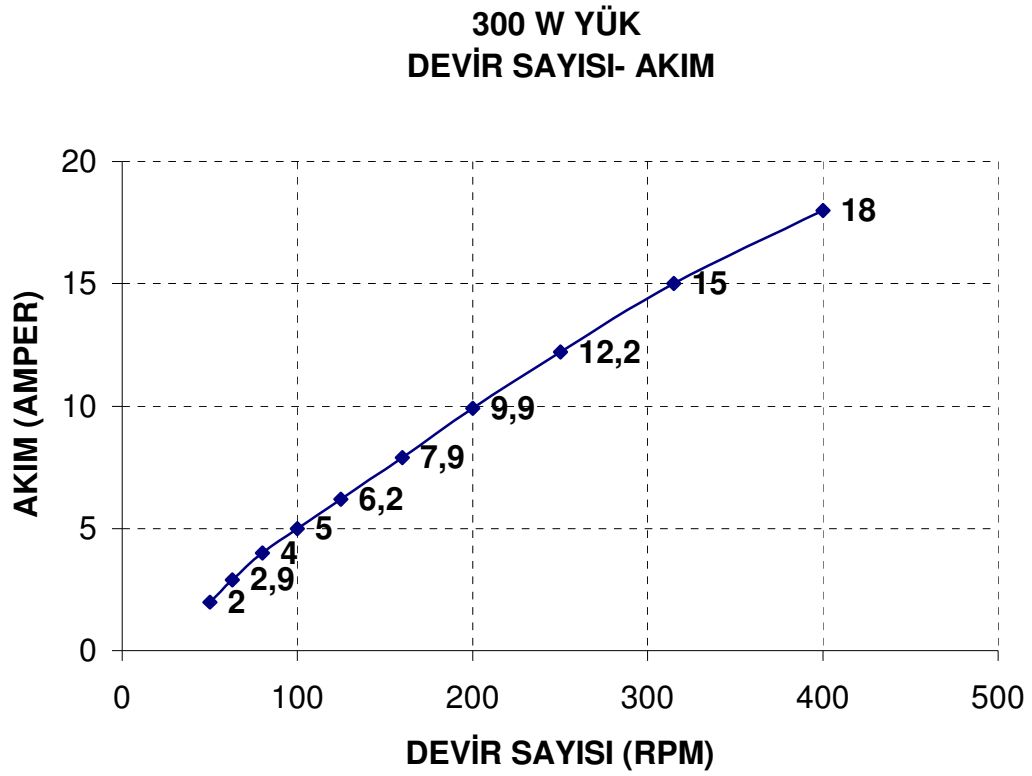
Şekil 5.4. 200 W yükte akım grafiği



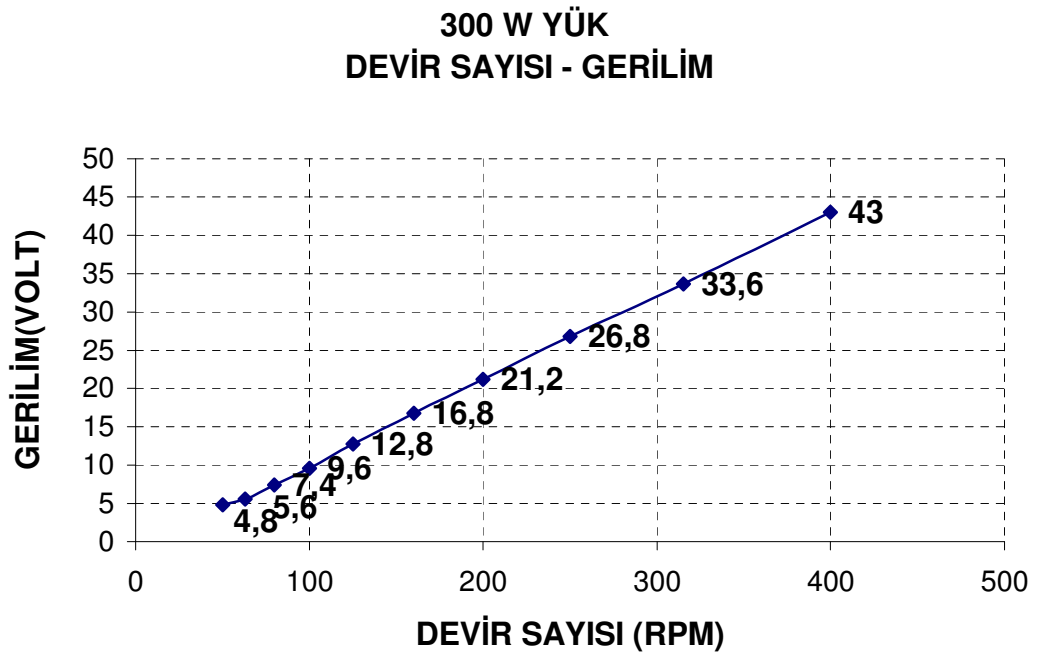
Şekil 5.5. 200 W yükte gerilim grafiği



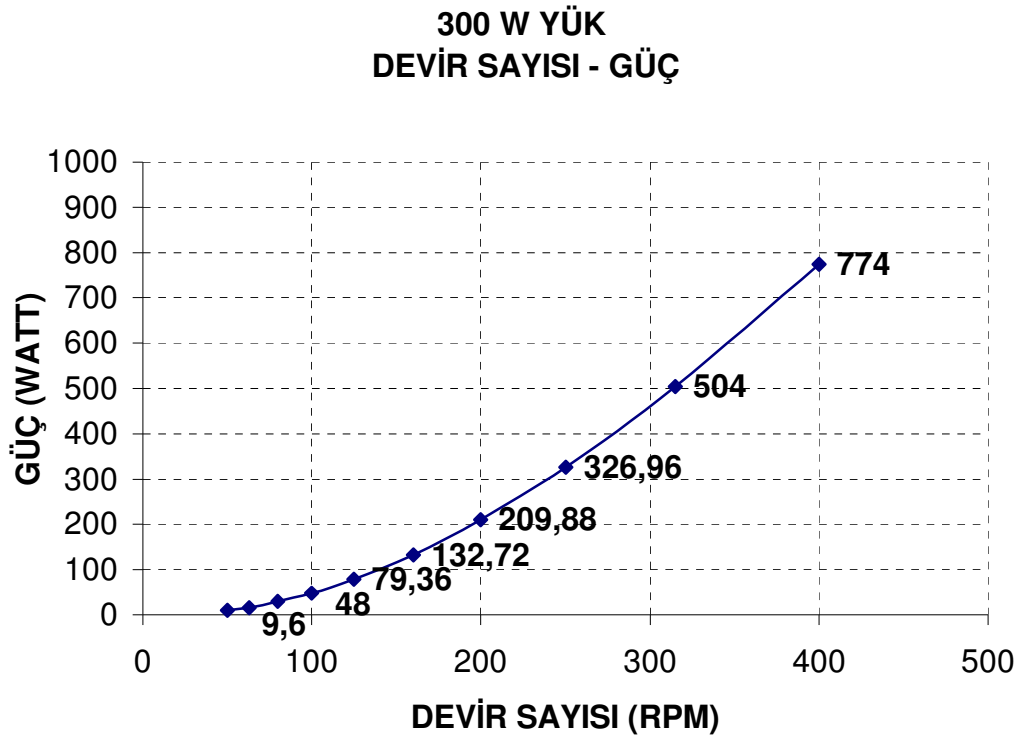
Şekil 5.6. 200 W yükte güç grafiği



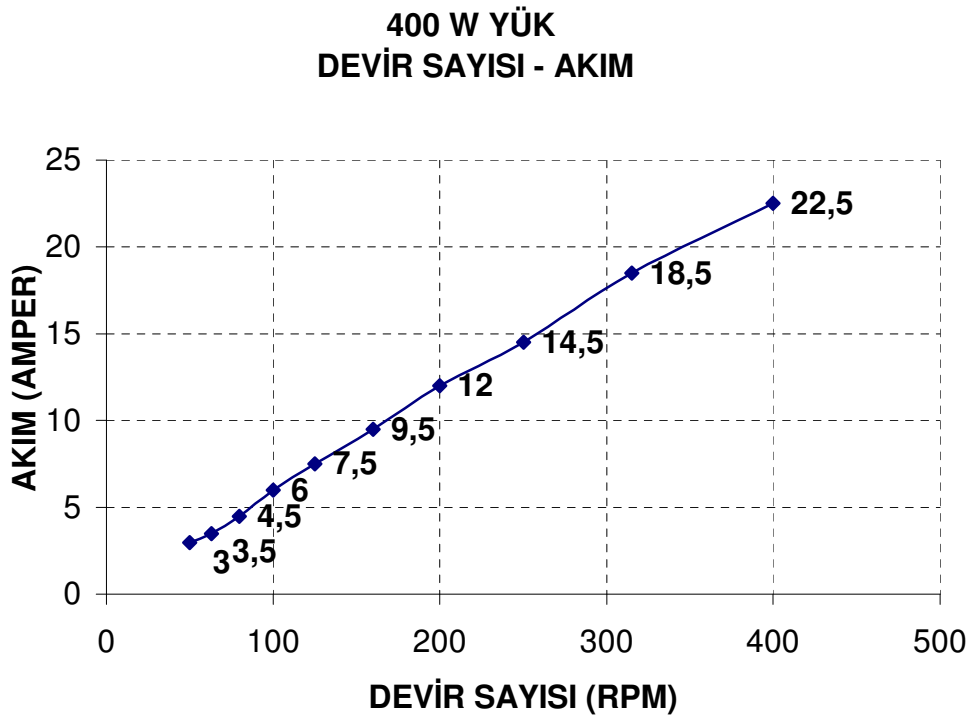
Şekil 5.7. 300 W yükte akım grafiği



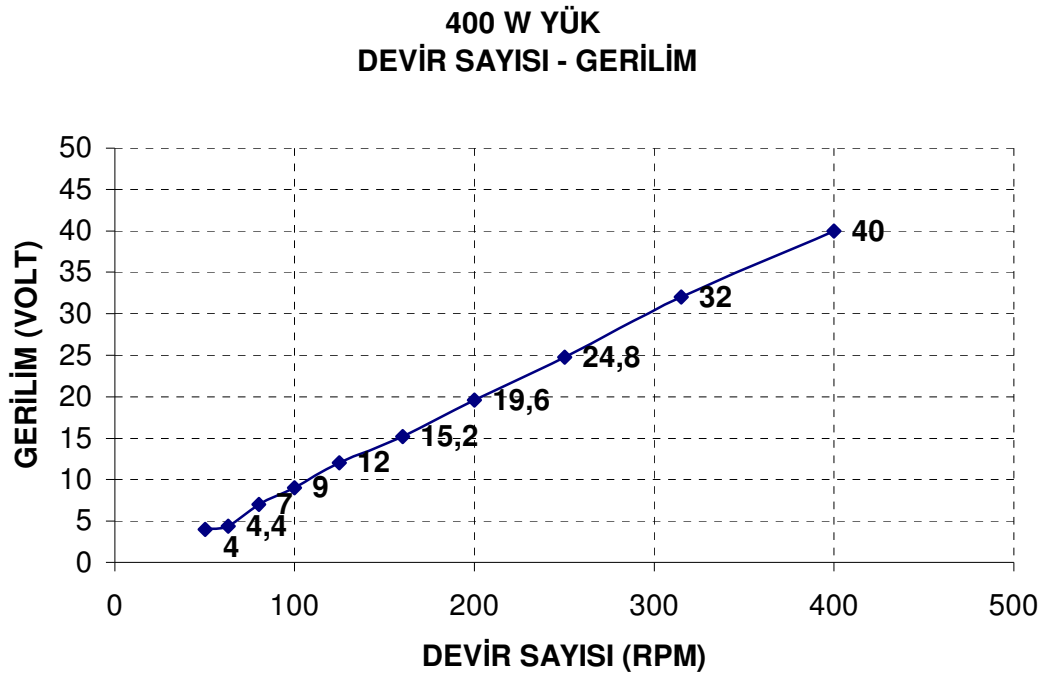
Şekil 5.8. 300 W yükte gerilim grafiği



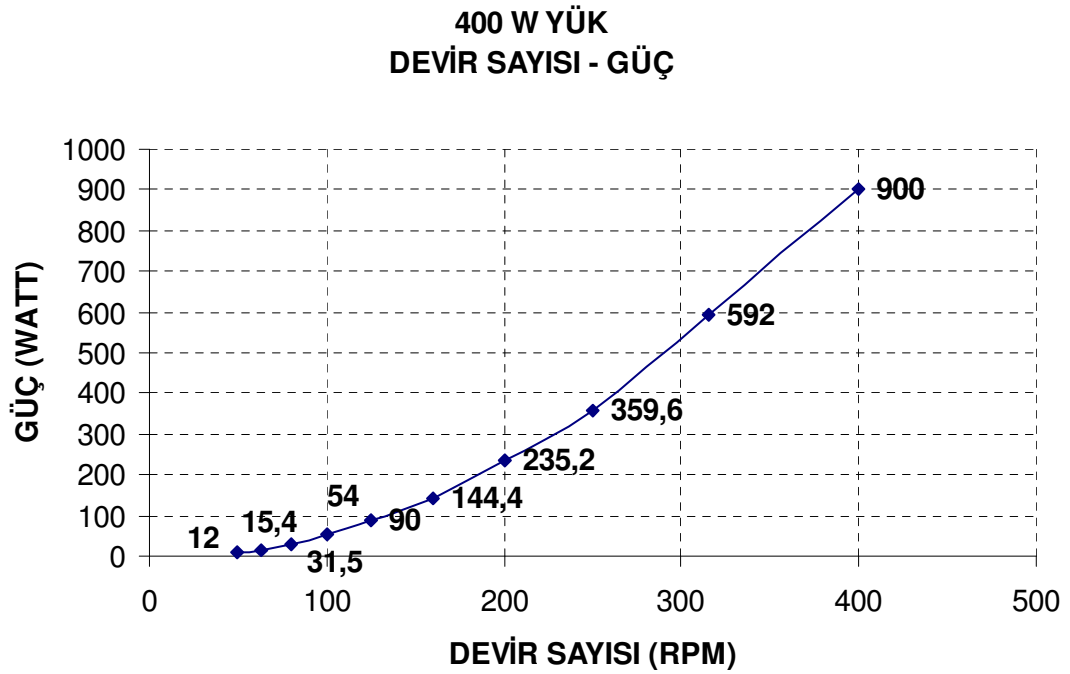
Şekil 5.9. 300 W yükte güç grafiği



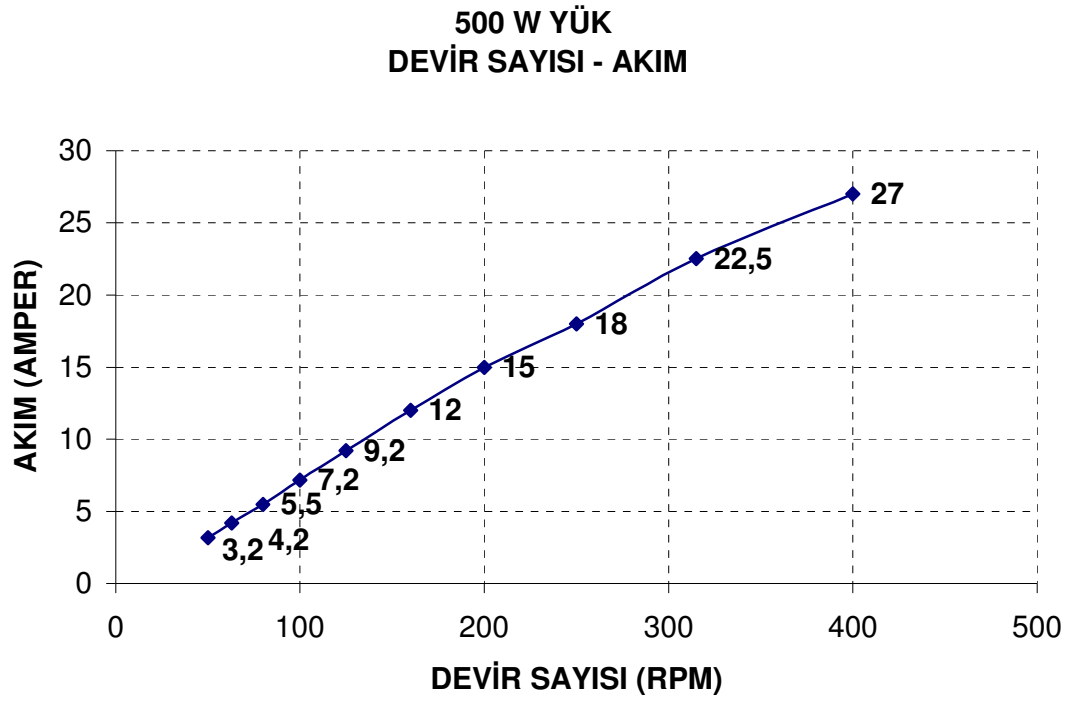
Şekil 5.10. 400 W yükte akım grafiği



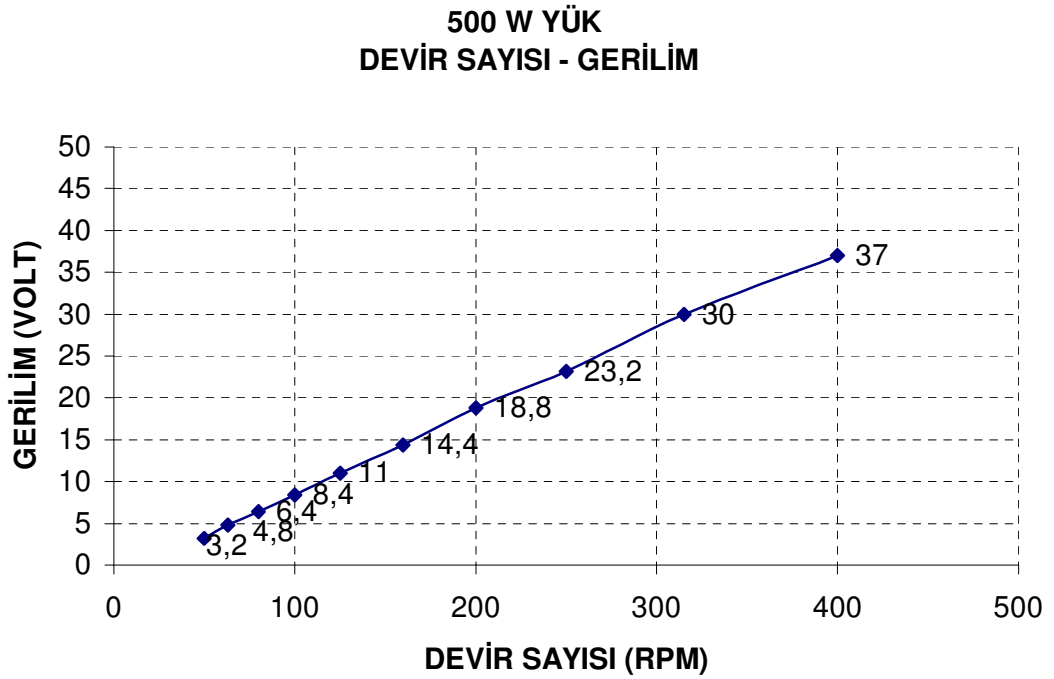
Şekil 5.11. 400 W yükte gerilim grafiği



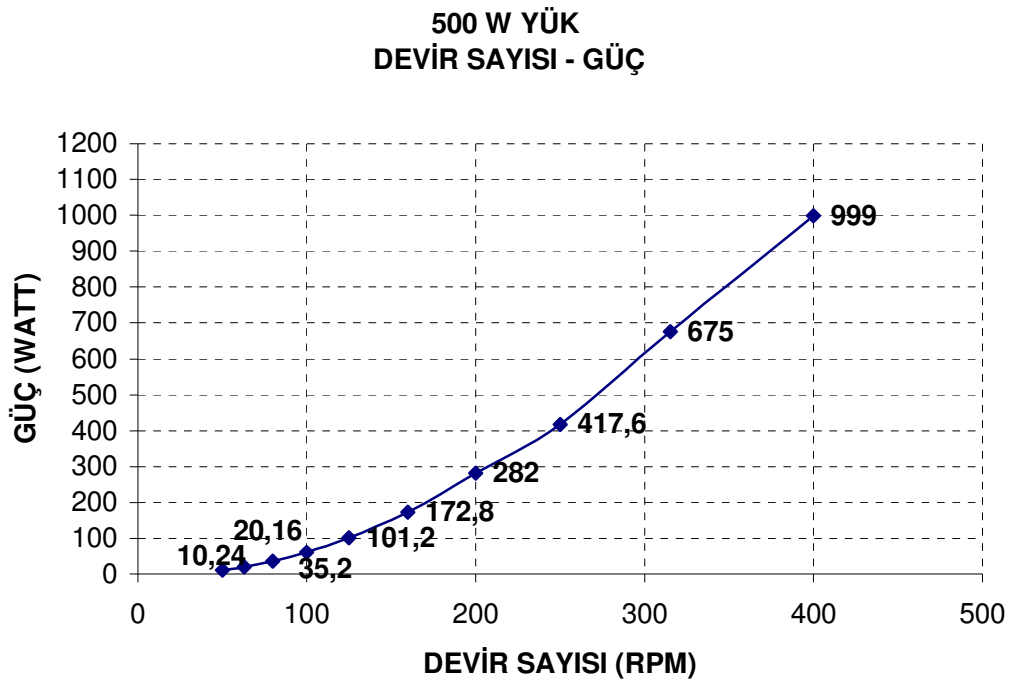
Şekil 5.12. 400 W yükte güç grafiği



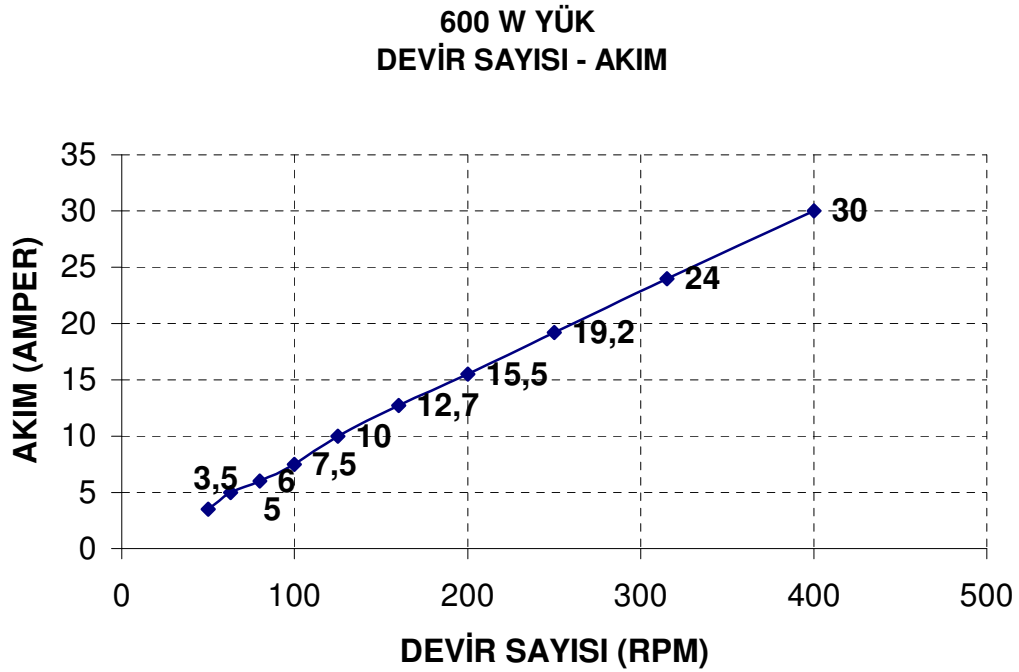
Şekil 5.13. 500 W yükte akım grafiği



Şekil 5.14. 500 W yükte gerilim grafiği

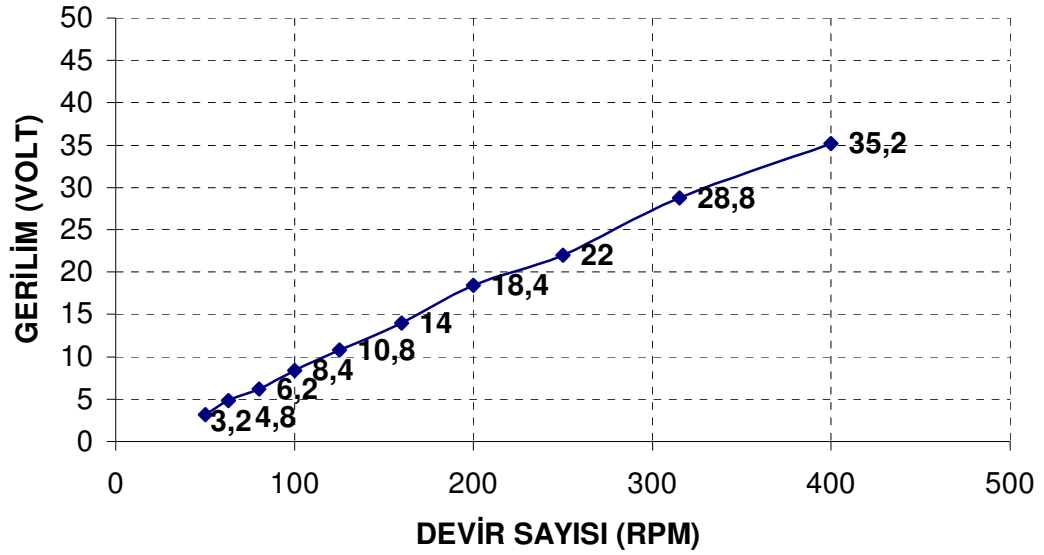


Şekil 5.15. 500 W yükte güç grafiği



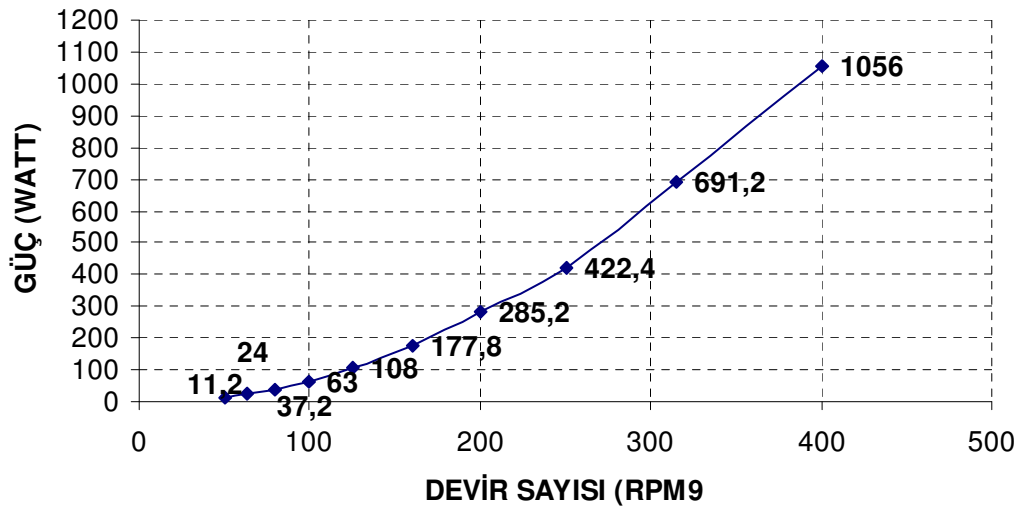
Şekil 5.16. 600 W yükte akım grafiği

**600 W YÜK
DEVİR SAYISI - GERİLİM GARFİĞİ**

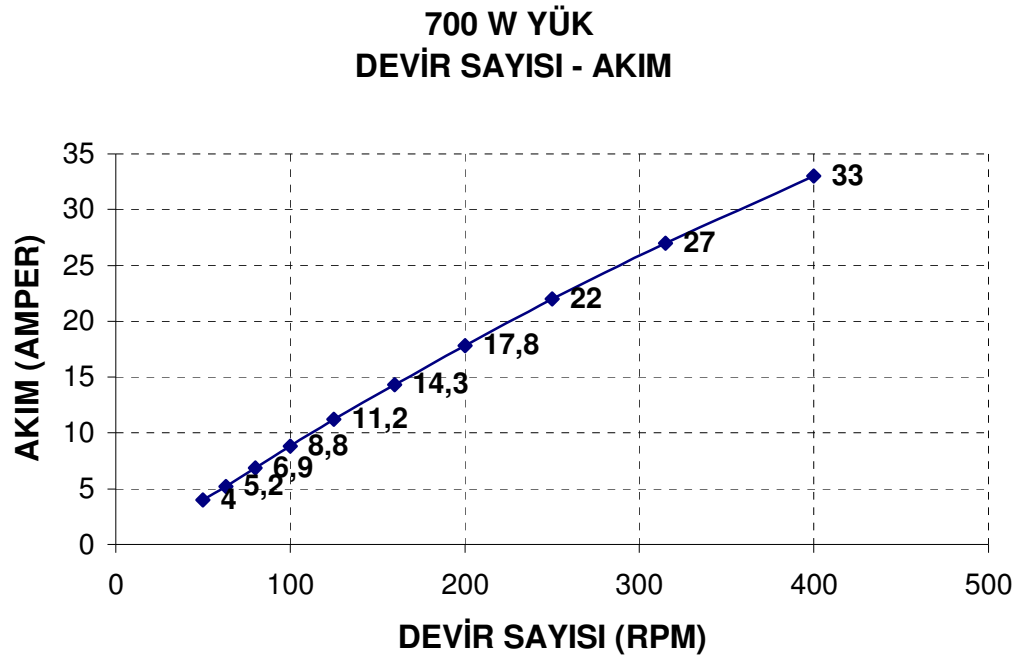


Şekil 5.17. 600 W yükte gerilim grafiği

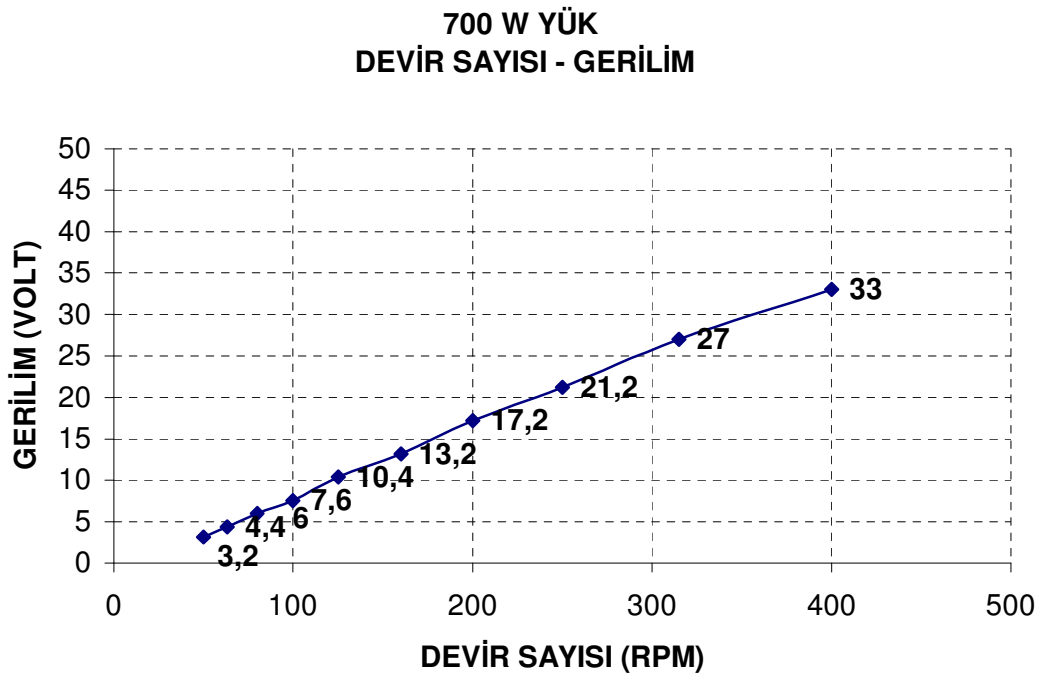
**600 W YÜK
DEVİR SAYISI - GÜÇ**



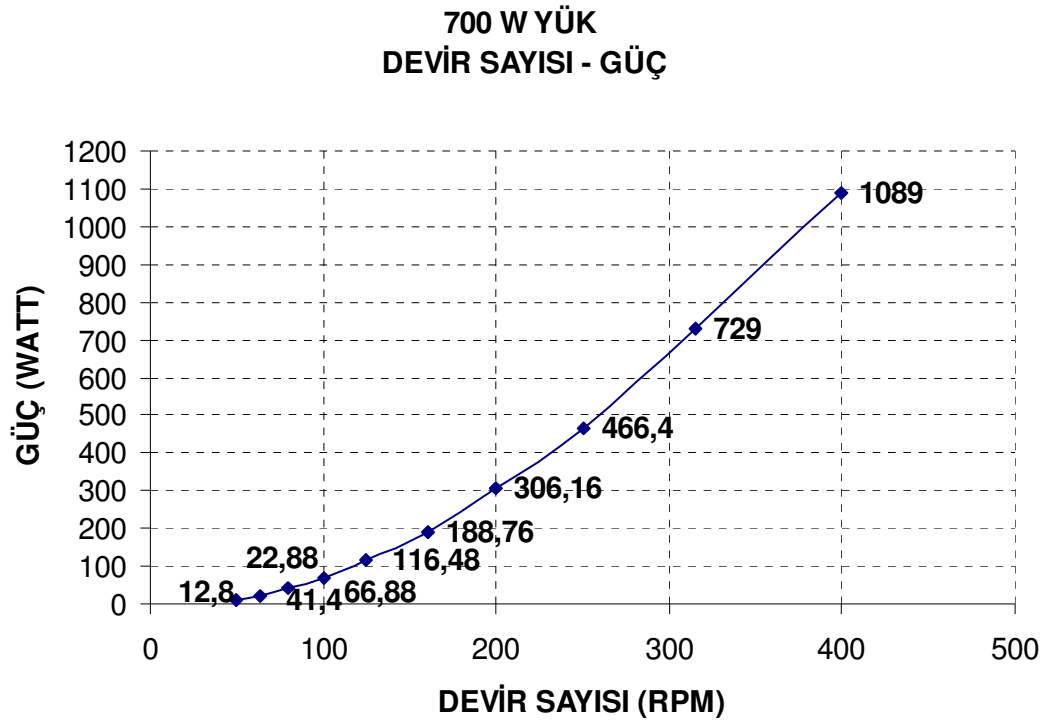
Şekil 5.18. 600 W yükte güç grafiği



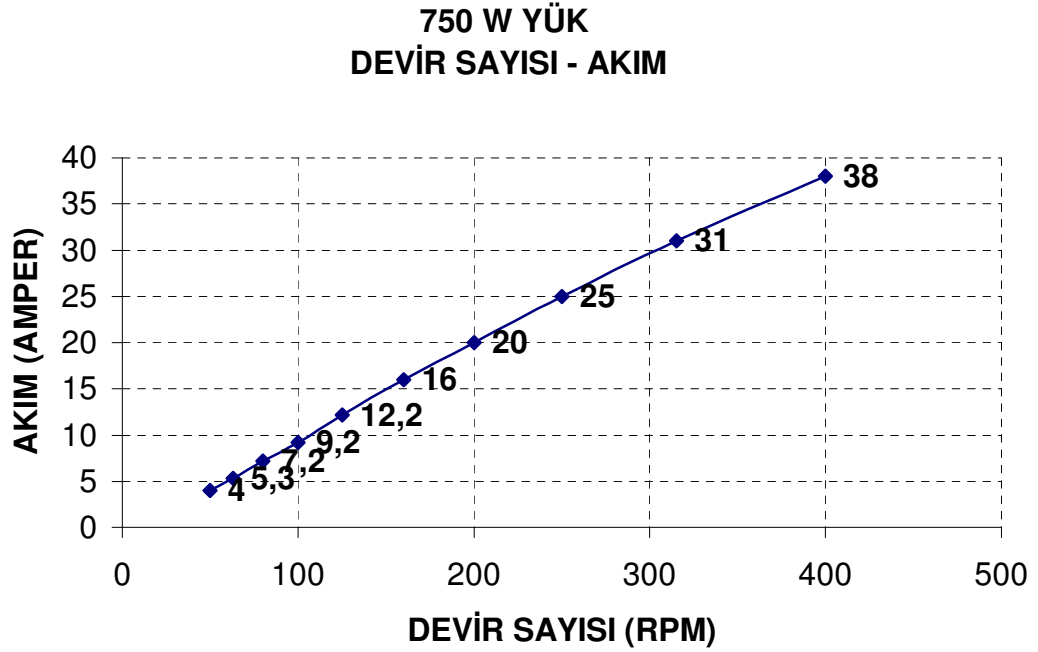
Şekil 5.19. 700 W yükte akım grafiği



Şekil 5.20. 700 W yükte gerilim grafiği

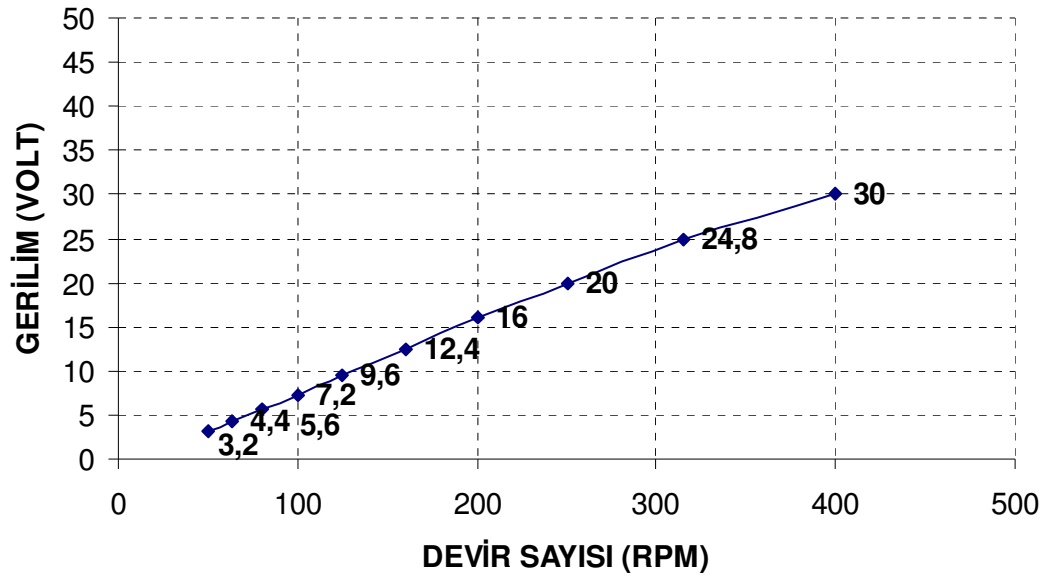


Şekil 5.21. 700 W yükte güç grafiği



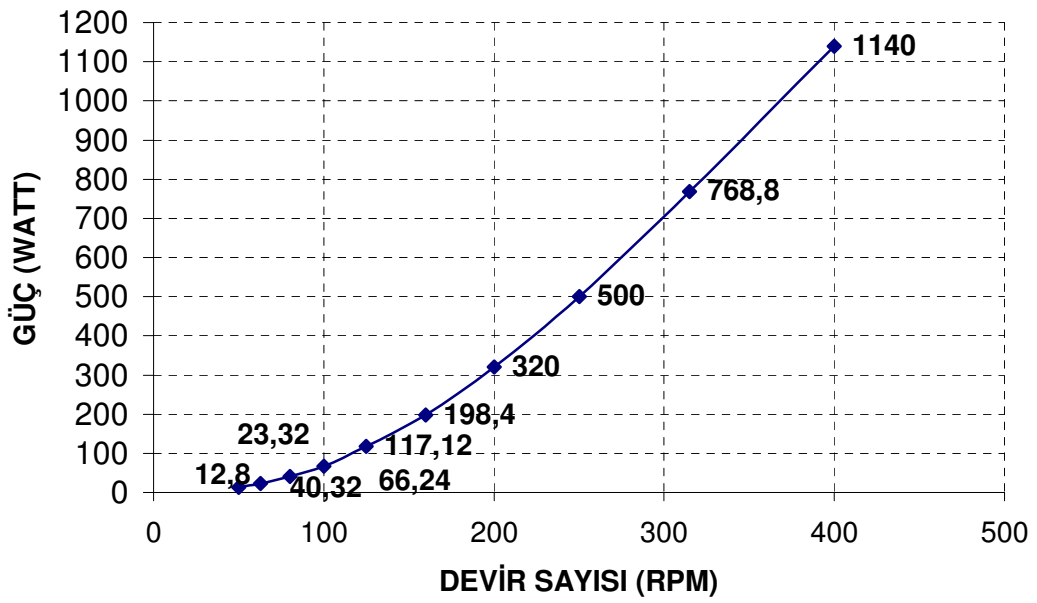
Şekil 5.22. 750 W yükte akım grafiği

750 W YÜK
DEVİR SAYISI - GERİLİM

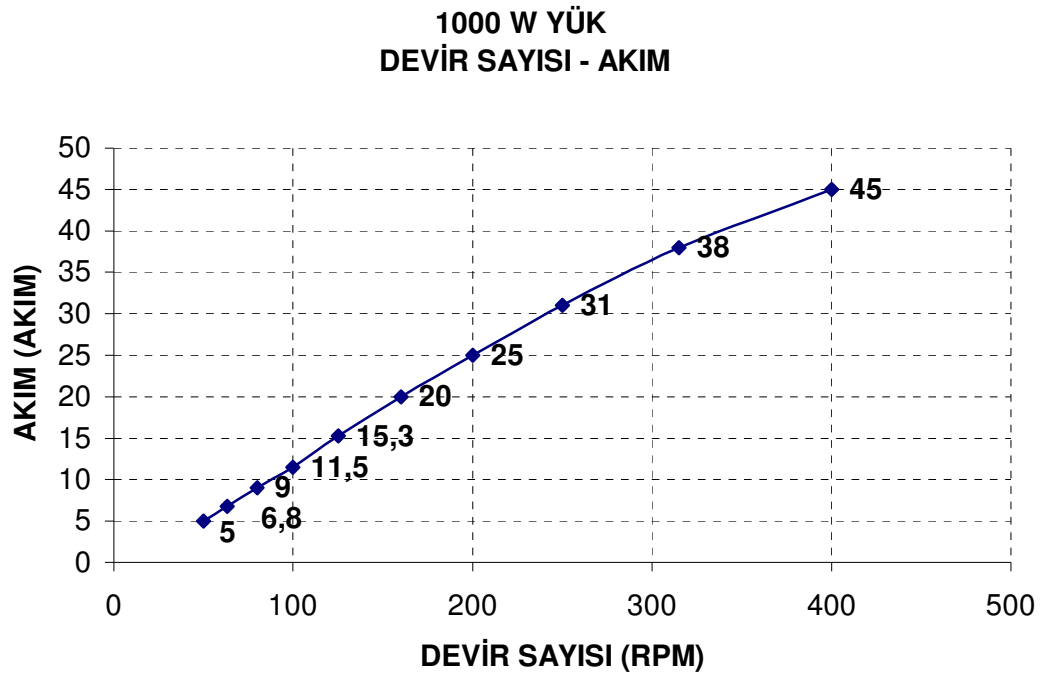


Şekil 5.23. 750 W yükte gerilim grafiği

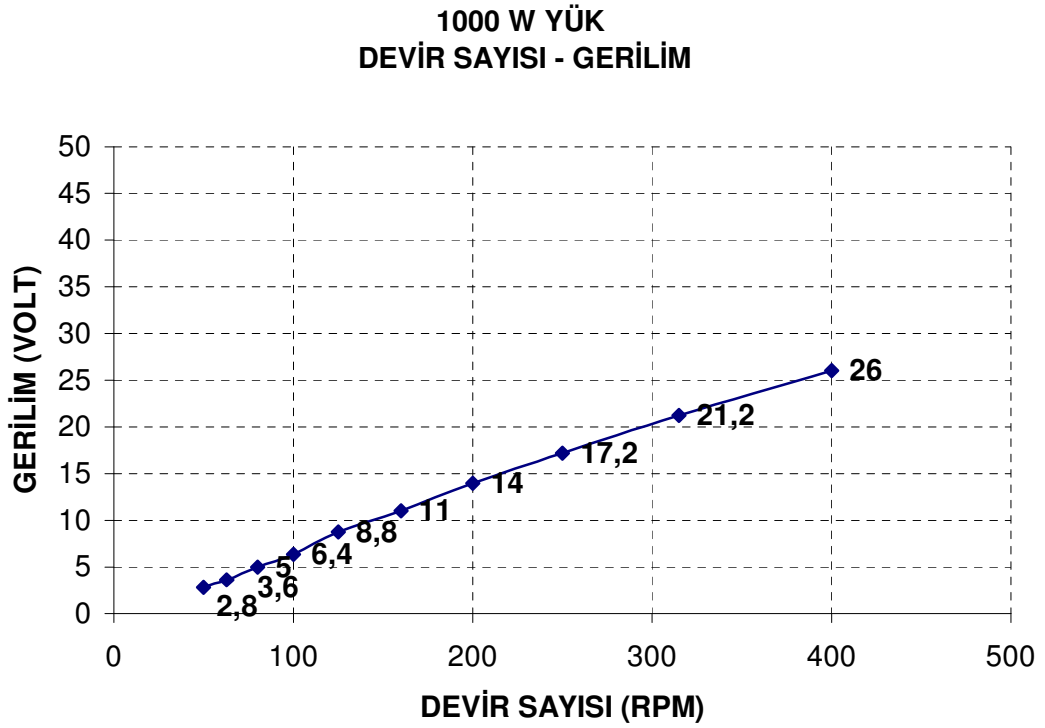
750 W YÜK
DEVİR SAYISI - GÜÇ



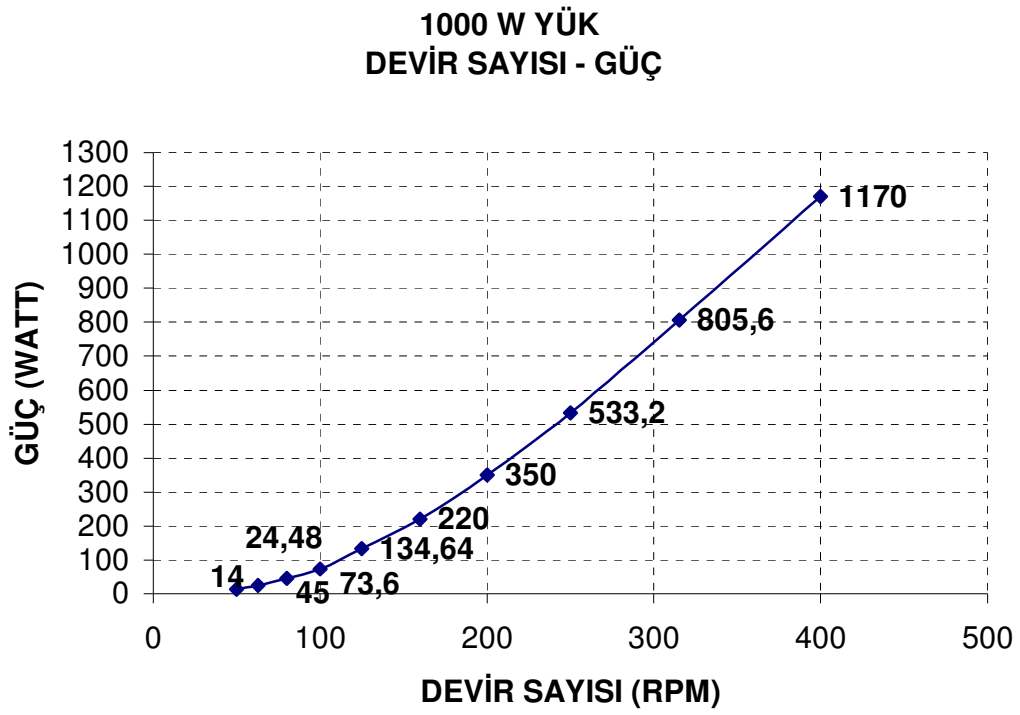
Şekil 5.24. 750 W yükte güç grafiği



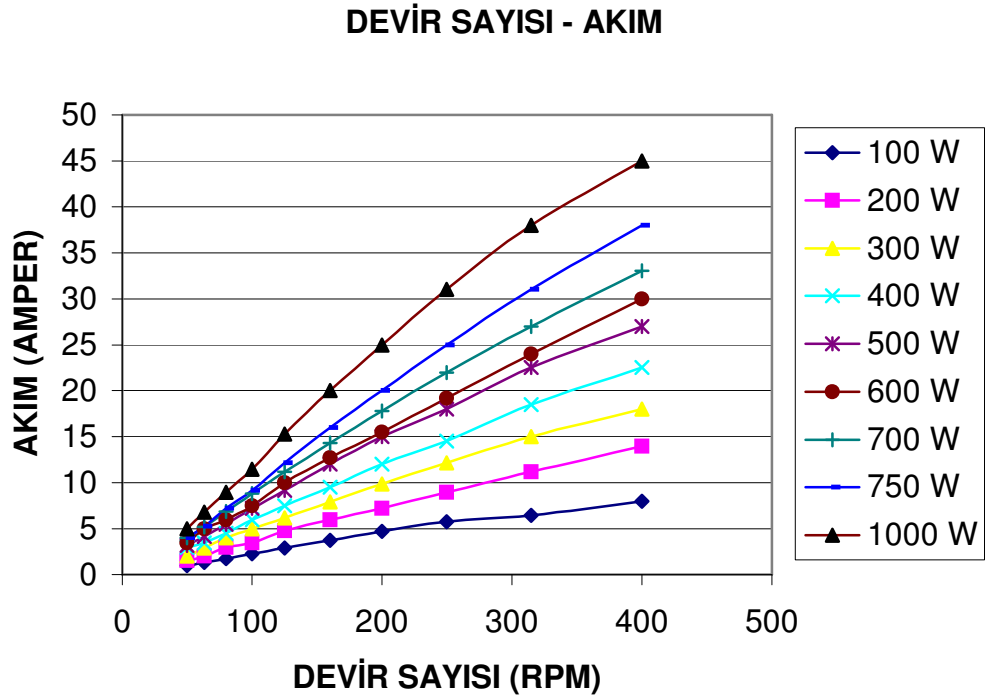
Şekil 5.25. 1000 W yükte akım grafiği



Şekil 5.26. 1000 W yükte gerilim grafiği

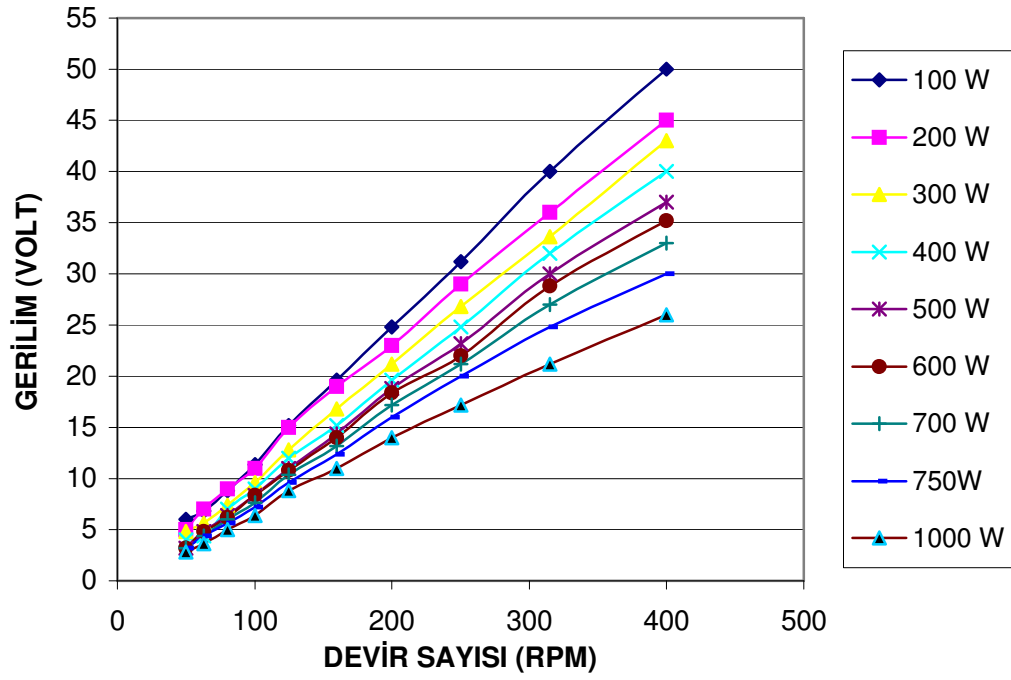


Şekil 5.27. 1000 W yükte güç grafiği



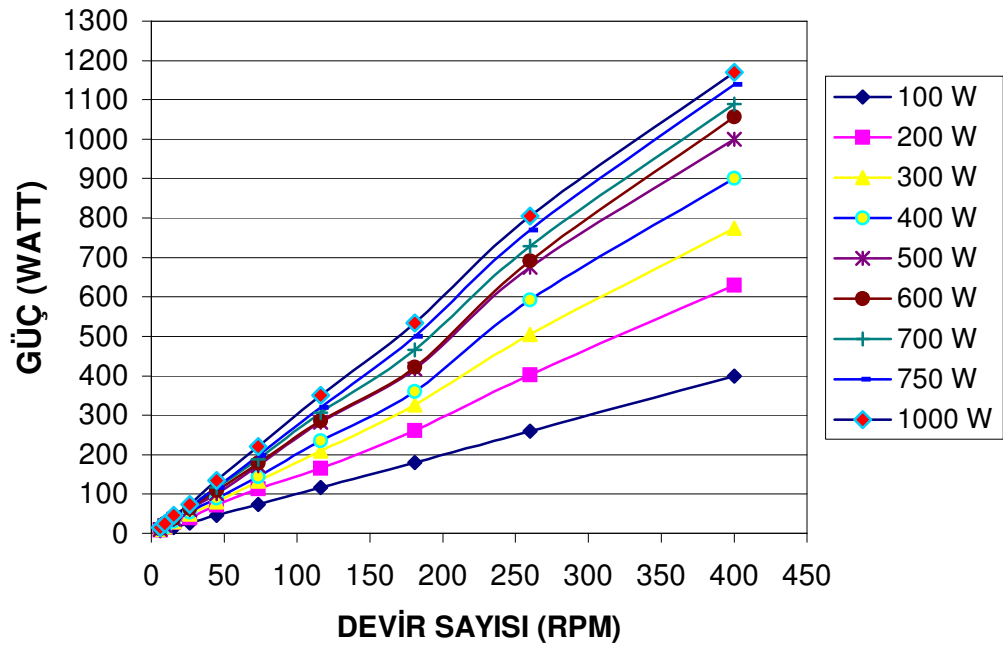
Şekil 5.28. Jeneratör yük-akım grafiği

DEVİR SAYISI - GERİLİM GRAFİĞİ

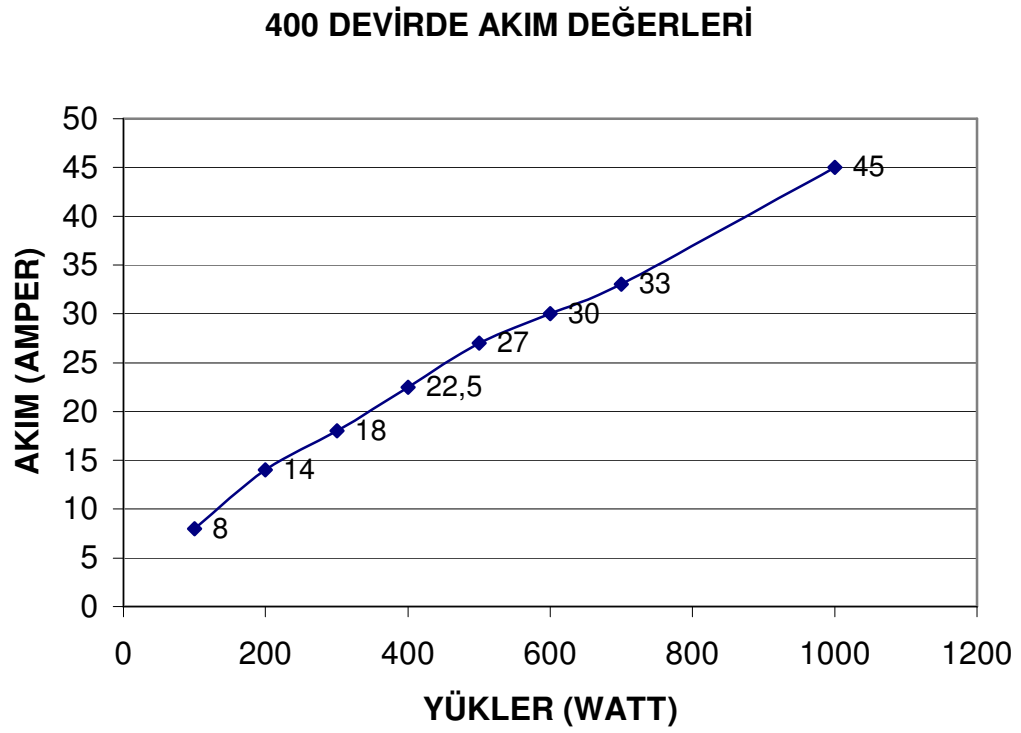


Şekil 5.29. Jeneratör gerilim-devir grafiği

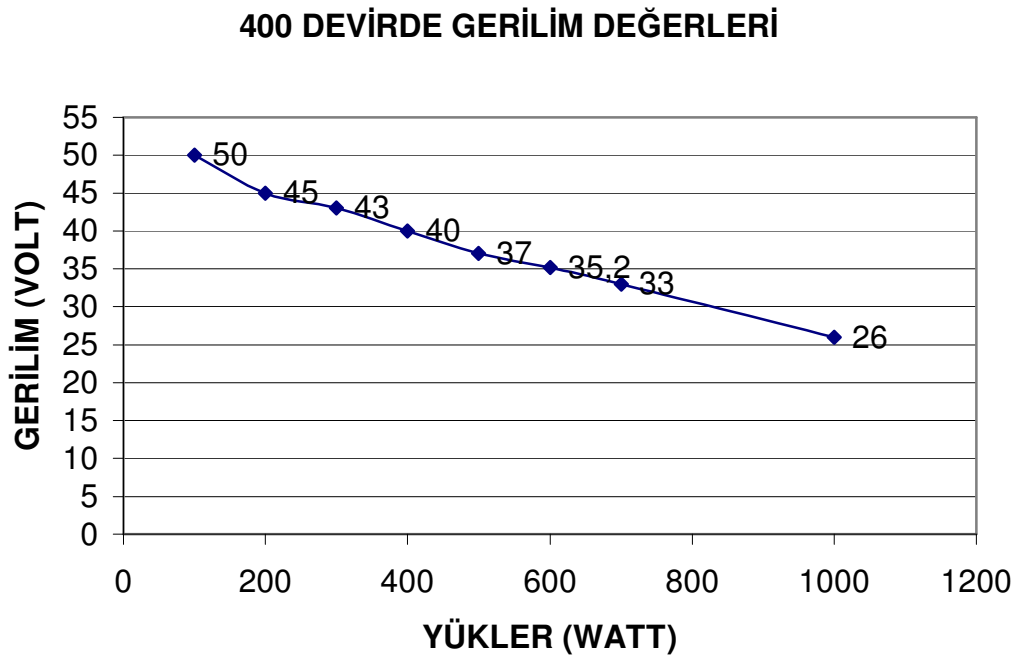
DEVİR SAYISI - GÜÇ



Şekil 5.30. Jeneratör güç - devir grafiği

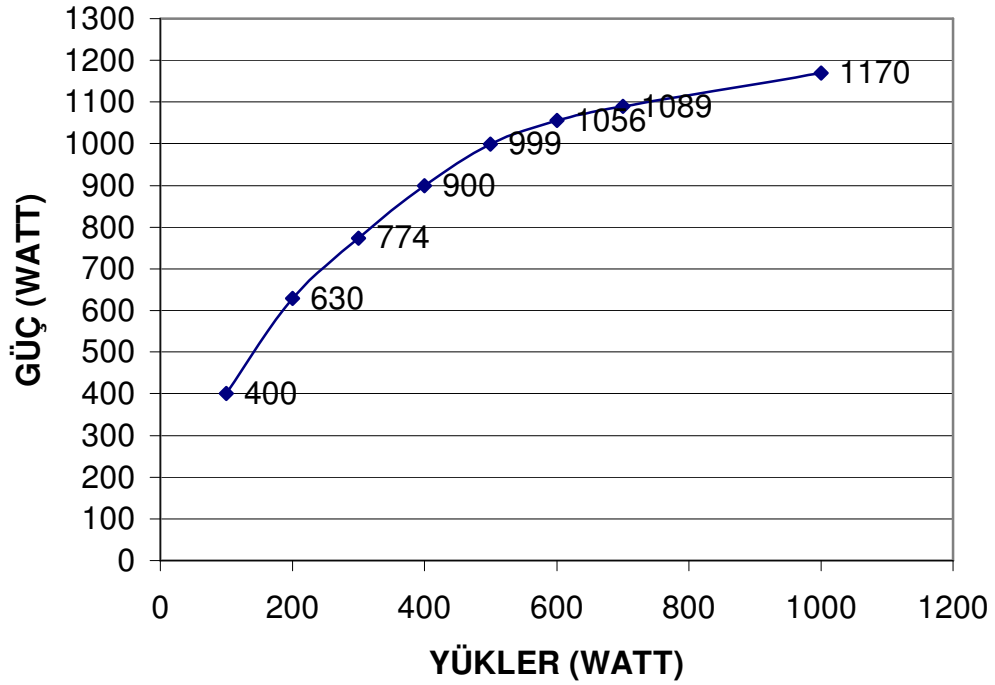


Şekil 5.31. Jeneratör 400 devir yük-akım grafiği



Şekil 5.32. Jeneratör 400 devir yük-gerilim grafiği

400 DEVİRDE GÜÇ DEĞERLERİ



Şekil 5.33. Jeneratör 400 devir yük-güç grafiği

5.3. Tartışma

Deney sonuçlarında amaçlanan değerler elde edilmiştir. Jeneratörün devir sayısı arttıkça akım ve gerilim değeri artmaktadır. Alınan veriler ve grafikler incelenecek olursa doğrusala yakın bir artış grafiği elde edilmiştir (29, 42).

Jeneratör çıkışına bağlanan yük değerine göre çıkışta maksimum 45 A ve 50 V'a kadar değerler alınmıştır. Jeneratöre bağlanan yükün cinsi ve büyüklüğüne göre farklı çıkış karakteristikleri elde edilir. Çalışmada, şimdiye kadar yapılan çalışmalarla benzer karakteristikler elde edilmiştir (31, 35, 42, 43).

Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29 incelendiğinde elde edilen sonuçların Chen J ve arkadaşlarının yaptığı ve verdikleri grafiksel sonuçlarla paralellik gösterdiği görülmüştür (43).

Gerçek ortamında rüzgar hızı değişken olacağından dolayı yine çıkışta farklı gerilim ve akım değerleri, jeneratöre bağlanan yüke göre farklılık gösterecektir.

Çalışmada, jeneratör çıkışı 24 volt olarak hesaplanmıştı. Fakat jeneratör boşta ve yüksek devirlerde dönecek olursa çıkış gerilimi daha yüksek seviyelere çıkacaktır. Bu akü şarj devresi için istenmeyen bir durumdur. 24 volt aküler 27 volt'un üstünde şarj edilecek olursa ömürleri kısa olur ve akü yapısını bozarlar. Bunu önlemek için şönt regülatör devresi kullanılmalıdır. Bununla birlikte rüzgar türbini istenilen rüzgar seviyesinin çok üstünde bir yerde kuruluysa veya jeneratör yükü çok az ise şönt regülatör devresi şarjı çok uzun süre kesecek istenilen şarj yapılamayacaktır. Türbin elektrik ürettiği halde gerilim seviyesi yüksek olduğu için şarj gerçekleşmeyecektir. Bunun için imalatı gerçekleştirilen türbinin uygun rüzgar hızı olan yere ve jeneratör çıkışına uygun büyüklükte yük oluşturacak şekilde akü kapasitesi belirlenmelidir.

Kanatlar ağaç malzemedan imal edildiği işletme ömrü sınırlı olacaktır. Rüzgar türbininin işletme ömrünü artırmak için kanatlar, rotor ve statorun daha modüler ve kompozit malzemedan yapılması gerekir. Kanatlarda oluşturulan gücün artırılması kanat çapı ve kanat profili ile ilgilidir. Kanat profili ne kadar düzgün olursa kanadın rüzgarı kesmesi o kadar düzgün olacak ve sonuçta kanat o kadar verimli olacaktır. Uluslar arası standartlarda belirlenen kanat profilleri mevcuttur. Bu kanat profilleri ile kanatlar tasarlanmış olabilseydi türbin daha verimli olacaktı. Bunun için kanatların daha verimli hale getirilmesi için kanatlar dökme kalıptan ve kompozit malzemedan imal edilebilir (39).

Rotor imalatında kullanılacak olan neodyum mıknatısların Türkiye'de imalatının çok sınırlı olması ve maliyetinin çok yüksek olmasından dolayı neodyum mıknatısları tedarik etmekte sıkıntı yaşanmıştır. Diğer ülkelerde özellikle Çin'de neodyum mıknatıs imalatı oldukça fazladır ve maliyeti de düşüktür. İstenilen ölçülerde ve nitelikte mıknatısı yurt içinde bulmamız mümkün olmadığından daha düşük fiyatlı ve yüksek nitelikli mıknatıslar yurt dışından temin edilmiştir.

Rotorlar ve stator arasındaki boşluğu en aza indirmek, manyetik akı yolunu kısaltacağından çok önemlidir. Hem dönen malzemelerin sürtünmesini önlemek hem de açıklığı minimuma indirmek için hassas çalışma yapılmalıdır. Stator kalıbı çok düzgün dökülmelidir. Rotor yapımında kullanılan çelik plakaların yüzeyi düzgün ve pürüzsüz olmalıdır. Rotorlar ve statorun tasarım şekline göre elde edilen gerilim çok düşmüş olabilir. Elde edilen gerilim seviyesini daha kararlı duruma getirmek için daha karmaşık jeneratör tasarımı yapılabilir. Çıkışta elde edilen güç seviyesi de jeneratör tasarımı ile ilgili olacaktır. Rotor yapısında tek rotor kullanılacağı gibi bu sayı artırılıp değişik ölçülerdeki mıknatıs blokları açılı olarak tasarlanabilir. Stator sargıları düz, toroidal, trapezoidal, romboidal gibi değişik şekillerde seri ve paralel bağlanarak farklı tasarımlar oluşturulabilir (3, 29-35, 38, 44, 45).

Çalışma elektriğin ulaşmasının maliyetinin yüksek olduğu uzak alan uygulamalarına yönelik ve batarya depolamada kullanılacağından dolayı çıkışta aküyü en verimli şekilde yüklemek için optimum DC gerilim gereklidir. Bunun için, doğrultucu çıkışlarına dalgalanmaları önlemek için kondansatör bağlanabilir. DC çıkış süzülerek daha düzgün gerilim elde edilmiş olur. Yine çıkış gerilimini belli bir seviyede tutmak için zener diyotlar bağlanarak gerilim sabitlenebilir. Ayrıca jeneratöre kondansatör bağlanarak, kapasitif uyartım sağlanabilir ve makine daha verimli hale getirilebilir (46).

Jeneratör çıkışında elde edilen gerilim seviyesi şönt regülatör devresi ile sadece aç-kapa kontrolü yapabilmektedir. Rüzgar türbininden maksimum verim alabilmek için ya devir sayısı kontrol edilmeli veya çıkış gerilimi işlenerek istenilen seviyeye ayarlanabilmelidir. Türbin devir sayısını kontrol etmek için, devir sayısı sürekli okunan elektronik-mekanik sistemler kullanılabilir. Kanatlar ekseninde dönebilecek şekilde imal edilerek kanat açıları değiştirilebilir ve devir sayısı sabitlenmeye çalışılabilir (47).

Yarı iletken güç elemanları kullanarak çıkış gerilim istenilen seviyeye ayarlanabilir. Türbinden maksimum gücü alabilmek için jeneratör farklı tasarlanarak kontrol

sağlanabilir. Amaç; farklı rüzgar hızlarında istenilen seviyede güç çıkışı elde ederek maksimum verimi almaktır (8).

Yataklamalar düzgün yapılmalı ve imalat yapıldıktan sonra türbinin balansı yapılarak vibrasyon önlenmelidir. Meydana gelen vibrasyon, türbinin mekanik kısımlarının zamanla hasar görmesine neden olacaktır. İşletme ömrünü azaltarak arızalara sebep olacaktır. Yataklamada kullanılan rulmanların değişik hava koşullarında zarar görmesini önlemek için yalıtımı yapılmalıdır (38).

Jeneratör çıkış akımına göre iletken kesitleri uygun seçilmelidir. Elde edilen DC gerilimin taşındığı mesafeye göre gerilim düşümü hesap edilmeli ısınmadan dolayı oluşan kayıplar minimuma indirilmelidir.

Rüzgar türbininin bağlandığı kule yeterli tepe kuvvetine sahip olmalı ve güvenliği sağlanmalıdır.

Jeneratörde meydana gelebilecek kısa devre durumunda akü ve şarj devrelerinin korunması için acil kapama anahtarı yapılmalıdır. Akü geriliminin jeneratörden dolaşmasını önlemek için şarj devresine ters diyot bağlanmalıdır.

Rüzgar enerji sistemleri, dizel, güneş veya diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte ikili veya üçlü birleşik sistemler oluşturularak kullanılabilir (48, 49).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, bir evin ihtiyacını karşılayabilecek güçte bir rüzgar türbini gerçek boyutlarında imal edilmiştir. Kanatlar rüzgarı amaçlanan şekilde karşılayabilmekte ve yeterli torku üreterek jeneratöre aktarmaktadır. Kanatların ve jeneratörün yataklanması yapılmış ve vibrasyon en aza indirilmiştir. Jeneratör tasarlandığı gibi eksenel akı yollu sabit neodyum mıknatıslarla 14 kutuplu yapılmıştır. Stator 10 adet bobinden oluşmakta ve çıkışta 5 faz gerilim elde edilmiştir. İstenilen güç çıkışı elde edilmiştir. Elde edilen AC gerilim köprü diyotlarla doğrultularak istenilen seviyede DC gerilim elde edilmiştir. Köprü diyotların ısınmadan dolayı hasar görmesini önlemek için alüminyum soğutucu üzerine monte edilmiş ve istenilen soğutma sağlanmıştır. Şönt regülatör devresi ile akü şarj gerilimi kontrol altına alınarak şarjın uygun koşullarda olması sağlanmıştır.

Küçük boyutlu bir rüzgar türbin imalatı başarı ile gerçekleştirilerek sistemin komple deneysel sonuçları alınmıştır. Yapılan bu imalat ile eksenel akı yollu sabit neodyum mıknatısla elektrik üretmenin daha kolay ve verimli olduğu anlaşıldı. Eksenel akı yollu sabit mıknatıslı makinenin yapım ve tasarımının kolaylığı gösterilmiş ve manyetik gücü çok yüksek neodyum mıknatısın imalatçı sayısının artması ve fiyatının düşmesiyle, rüzgar türbin ve jeneratörlerinde kullanılmasının daha avantajlı ve verimli olacağı görülmüştür.

Bu konuda çalışma yapacak kişiler, kanatları daha verimli hale getirmek için fiber veya kompozit malzeme kullanabilirler. Kanatların bu şekilde yapılması hem seri üretimi kolaylaştırmakta hem de kanatların verimini ve kullanılabilir ömrünü artırmaktadır. Kanat profili, istenilen şekilde elde edileceğinden dolayı jeneratöre elde edilen tork ve hız istenilen seviyede olacaktır.

Jeneratör tasarımında, değişik rotor ve stator uygulamaları daha verimli hale getirebilirler. Tek rotorlu çift statorlu veya çok aşamalı rotor ve statordan oluşan sistemler tasarlanabilir. Rotorda mıknatıs tasarımı geliştirilerek akı yolunun şekli ve akı yolundaki bozulmalar düzeltilebilir. Farklı mıknatıs geometrileri ile farklı rotor

tasarımları elde edilebilir. Yine aynı şekilde stator da bobinler farklı sayı ve şekillerde sarılarak istenen çıkış gerilim kontrol edilebilir. Statoru nüvesiz yaptığımız bu çalışmada, statora nüve eklenerek akı yolunun şekli düzeltileceği gibi akı şiddetinin zayıflaması da önlenmiş olacaktır. Sonuç olarak endüklenen gerilim ve güç artacaktır. Ayrıca jeneratör yüklemelerinde ısınan statorun soğutulması için nüve soğutucu olarak da tasarlanarak iki yönlü avantaj sağlanacaktır.

Türbin kontrol sistemlerinde, yarı iletken güç elemanlarından faydalanarak daha verimli rüzgar türbinleri imal edebilirler. Jeneratör çıkış gerilimi, kontrol mekanizması iyileştirilerek ve sabit hızlı sisteme yaklaştırılarak, direk AC olarak kullanılabilmesi için yarı iletken güç elemanları kullanılabilir. Gerilim şeklinin değiştirilmesinden ve depolanmasından kaynaklanan gerek maliyet gerekse işletme kayıplarından arındırılmış olacak ve sistem daha verimli hale gelecektir.

Kanat hızlarını aktif olarak kontrol etmek için komplike kanat tasarımları ve elektronik elemanlar kullanabilirler. Bunun için kontrol uçlarına konan sensörler aracılığı ile çok sık olarak alınan veriler, mikroişlemciler ile analiz edilerek bir kontrol sinyali üretilmekte ve kanat hızına aktif olarak müdahale edilerek, hızın istenilen sınırlarda kalması sağlanmaktadır. Burada yarı iletken güç elemanları ve çok özellikli kontrol sistem ve elemanları kullanılarak sistem komple verimli hale getirilerek optimum çalışma noktasına yaklaşılmaya çalışılabilir.

Çıkış gerilimini AC'den DC'ye ve ev gereçlerinde kullanabilmek için tekrar AC'ye çevirmekle harcanan kayıpları ortadan kaldırmak için direk AC üreten, şebekeye bağlı sistemler tasarlanabilir.

Sonuç olarak ortaya konulan bu çalışma, gerek profesyonel gerekse amatör olarak yapılan diğer rüzgar türbinleri ile karşılaştırılırsa, bazı avantaj ve dezavantajlarının olduğunu görürüz. Aynı çıkış gücünü verebilen ve yurt dışında imal edilip yurt içinde satışı yapılan rüzgar türbinleri 3000 euro civarında satılmaktadır. Bu miktar, kontrol mekanizması ve kullanılabilirliğinin daha kolay olması gibi avantajlarına rağmen, 1 kW'lık bir rüzgar türbini için oldukça yüksek bir rakamdır. İmalatını

gerçekleştirdiğimiz rüzgar türbini ise 1 250 Yeni Türk Lirasına mal olmuştur. Dezavantajı ise kanatlarının ve jeneratör gövdesinin kompozit benzeri malzemeden olmayışından dolayı veriminin daha düşük ve kullanım ömrünün daha az olmasıdır. Türkiye’de sınırlı olarak yapılan imalatlarla karşılaştırıldığında ise maliyetimizin daha düşük olduğunu söyleyebiliriz.

Sonuç olarak, dünyada yükselen değer yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisinin, Türkiye’de kullanımı ve paralel olarak ilginin, yatırımın, teknolojinin ve imalatının, özellikle Avrupa ve diğer ülkelerden çok geride olmasından dolayı rüzgar türbin sistemlerinin imalatının yapılabilirliği hakkında bu konuda çalışacak kişilere güzel bir örnek sağlanmışır.

KAYNAKLAR

1. BTM Consult., “Rüzgar gücü 12”, *Ewea ve Greenpeace*, Keskin, M., Brüksel, 7-21 (2004).
2. Chen, Z., Spooner, E., “A modular, permanent-magnet generator for variable speed wind turbines”, **In Proceedings on Electrical Machines and Drives**, 5(3): 453-457 (1995).
3. Spooner, E., Williamson, A., “Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications”, **IEE Proc.Electr.Power Appl.**, 143(1): 1-8 (1996).
4. Chalmers, B. J., Wu, W., Spooner, E., “An axial flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system”, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 14(2): 251-257 (1999).
5. Shepherd, D. G., “Historical Development Of The Windmill”, Wind Turbine Technology, Spera D, A., **Asme Press**, New York, 1-43 (1998).
6. Altındış, A., “Yenilenebilir enerji kaynaklarından; rüzgar enerjisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-2, 25-27,33-34 (2001).
7. Divone, L. V., “Evolution Of Modern Wind Turbines”, Wind Turbine Technology, Editor, Spera, D, A., **Asme Press**, New York, 82-86 (1998).
8. Nayar, C.V., Islam S.M., Sharma, H., “Power Electronics For Renewable Energy Sources”, Power Electronics Handbook, Rashid, M. H., **Academic Press Series in Engineering**, USA, 562-571 (2001).
9. WWEA, “Worldwide Wind Energy Capacity at 47.616 MW –8.321 MW added in 2004 Spain, Germany and India are leading markets – Australia- Pacific shows highest growth rate”, (**WWEA**), Bonn, 1-4 (2005).
10. Ersoy, H., “Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarının dünü bugünü incelenerek elektrik enerjisine olan katkının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 50-53 (1997)
11. Türksoy, F., “Rüzgar verisi ölçümü ve analizi”, **Rüzgar Enerjisi Sempozyumu**, İzmir, 87-88, 95-98,101-102 (2001).
12. Gourieres, D. L., “Wind Power Plants Theory and Design”, **Pergamon Press**, New York, 17-18, 76-77 (1982)
13. Gipe, P., “Wind Energy Basics”, **Chelsea Green Publishing Company**, England, 7-9, 13-15, 25-26, (1999).

14. Patel, M. R., "Wind And Solar Power Systems, **CRC Press**, Washington, 35-41, 85-86, 93-98 (1999).
15. Walker, J. F., Jenkins, N., "Wind Energy Technology", **Jhon Wiley & Sons**, New York, 11-15, 20-23 (1997).
16. Charlier, R. G., Justus, J. R., "Ocean Energies Environmental, Economic And Technological Aspects Of Alternative Power Sources", **Elsevier**, Amsterdam, 25-26, (1993).
17. Wilson, R. E., "Aerodynamic Behavior Of The Wind Turbines", Wind Turbine Technology, Editor, Spera D, A., **Asme Press**, New York, 215-220, 223-224 (1998).
18. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Rüzgar enerjisi, Ankara, 1-20, (2000).
19. Kocaman, B., "Elektrik Enerjisi Üretim Santralleri", **Birsan Yayınevi**, İstanbul, 177-180 (2003).
20. Lissaman, B. S., "Wind Turbines Airfoils And Rotor Wakes". Wind Turbine Technology, Editor, Spera D, A., **Asme Press**, New York, 285-286 (1998).
21. İnternet: Rotterdam, Netherlands, Wikipedia the free ancylopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_equation (2005).
22. İnternet: Rotterdam, Netherlands, Wikipedia the free ancylopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Lift_%28force%29 (2005).
23. Hansen, L. H., Madsen, P. H., Blaabjerg, F., Chritensen, H. C., Lindhard, U., Eskildsen, K., "Generators and power electronics tachnology for wind turbines", **The 27th Annaual conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, Colorado, 2000-2005 (2001).
24. Aydin, M., Huang, S., Lipo, T. A., "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review," **Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation, and Motion (SPEEDAM) 2004**, Capri, Italy, 1-10 (2004).
25. Kehl, W., Kosenina, P., "The induction generator for windturbines", **İnternational Mediterranean Congress on Solar and Other New-Renewable Energy Resources**, Antalya, 435-438 (1988).
26. İnternet: Rotterdam, Netherlands, Wikipedia the free ancylopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Air_density (2005).
27. Piggott, H., "How To Build A Wind Turbine", **A Centre for Alternative Technology Publication**, Powys, İngiltere, 1-54 (2004)

28. Söderlund, L., Eriksson, T. J., Salonen, J., Vihriälä, H., Perala, R., "A permanent magnet generator for wind power applications", **IEEE Transactions on Magnetics**, 32(4): 2389-2392 (1996).
29. Wang, R. J., Kamper M. J., Westhuizen K. V., Gieras, J. F., "Optimal design of a coreless stator axial flux permanent-magnet generator", **IEEE Transaction on Magnetics**, 41(1): 55-63 (2005).
30. Bumby, J. R., Martin, R., Mueller, M. A., Spooner, E., Brown, N. L., Chalmers, B. J., "Elektromagnetic design of axial-flux permanent magnet machines", **IEE Proc.-Electr. Power Appl.**, 151(2): 151-159 (2004).
31. Hwang, D. H., Lee, K. C., Kang, D. H., Kim, Y. J., Choi, K. H., Park, D. Y., "An moduler-type axial-flux permanent magnet sychronous generator for gearless wind power systems", **The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial electronics Society**, Korea, 1396-1399 (2004).
32. Aydın, M., Huang, S., Lipo, T. A., "Torque quality comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines", **The 27th Annaual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, Colorado, 1428-1434 (2001).
33. Hasan, T. S., Luk, C. K., Bhinder, F. S., Ebaid, M. S., "Modular design of high-speed permanent-magnet axial-flux generators", **IEEE Transaction on Magnetics**, 36(5): 3558-3561 (2000).
34. Caricchi, F., Crescimbin, F., Honorati, O., Bianco, G. L., Santini, E., "Performance of coreless-winding axial-flux permanent-magnet generator with power output at 400 Hz, 3000 r/min", **IEEE Transactions on Industry Applications**, 34(6): 1263-1269 (1998).
35. Muljadi, E., Butterfield, C. P., Wan, Y. H., "Axial-flux modular permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind-turbine applications", **IEEE Transactions on Industry Applications**, 35(4): 831-835 (1999).
36. Keppola, H., Perala, R., Söderlund, L., Vihriälä, H., "Preliminary test results of an axial flux toroidal stator wind power generator", **ICEM 2000 - International Conference on Electrical Machines**, Espoo, Finlandiya, 1480-1484 (2000).
37. Fengxiang, W., Wenpeng, Z., Ming, Z., Baoguo, W., "Design consideration of high-speed PM generators for micro turbines", **37th IAS Annual Meeting**, Pittsburgh, 158-162 (2002).
38. Aydın, M., Huang, S., Lipo, T. A., "A new axial flux surface mounted permanent magnet machine capable of field control", **In Proc. of IEEE IAS Annual Meeting**, Pittsburgh, 1250-1257 (2002).

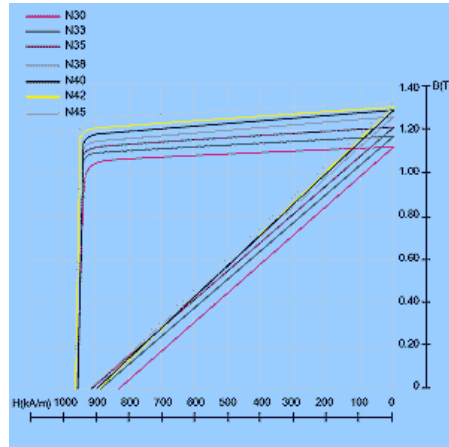
39. Hill-Cottingham, R.J., Coles, P. C., Eastham, J. F., Profumo, F., Tenconi, A., Gianolio, G., Cerchio, M., “[Plastic structure multi-disc axial flux PM motor](#)”, **Industry Applications Conference 37th IAS Annual Meeting**, Pittsburgh, 1274-1280, (2002).
40. Rovio, T., Vihriala, H., Söderlund, L., Kriikka, J., Hyppönen, M., “Axial and radial flux generators in small-scale wind power production”, **EWEC 2001**, Kopenhag, 1094-1097 (2001).
41. Peşint, M. A., “Senkron Makineleri Ve Alternatif Akımın Doğrultulması”, **MEB**, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 19-20 (1996).
42. Adegas, F. D., Pena, G. M., Ale, J. A. V., Simioni, G. S., “Power curve of small wind turbine generators-laboratory and field testing”, **World Climate & Energy Event**, Rio de Janeiro, 367-372 (2003).
43. Chen, J., Nayar, C. V., Xu, L., “Design and finite element analysis of an outer-rotor permanent-magnet generator for directly coupled wind turbines”, **IEEE Transaction on Magnetics**, 36(5): 3802-3809 (2000).
44. Muljadi, E., Green, J., “Cogging torque reduction in a permanent magnet wind turbine generator”, **21st Amerikan Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium**, Nevada, 1-5 (2002).
45. Lombard, N. F., Kamper, M. J., “Analysis and performance of an ironless stator axial flux pm machines”, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 14(4): 1051-1055 (1999).
46. Chen, Z., Spooner, E., Norris, W. T., Williamson, A. C., “Capacitor-assisted excitation of permanent-magnet generators”, **IEE Proc.-Electr. Power Appl.**, 145(6): 497-507 (1998).
47. Popa, L. M., Blaabjerg, F., Boldea, I., “Wind turbine generator and simulation where rotational speed is the controlled variable”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 40(1): 3-10 (2004).
48. Bialasiewicz, J. T., Muljadi, E., Drouilhet, S., Nix, G., “Hybrid power systems wirh diesel and turbine generation”, **Proceedings of the American Control Conference**, Pennsylvania, 1705-1709 (1998).
49. Karlis, A., Dokpoulos, P., “Small power fed by hydro, photovoltaic, wind turbines and diesel generators”, **ICECS’96**, Nagoya, 1013-1016 (1996).

EKLER

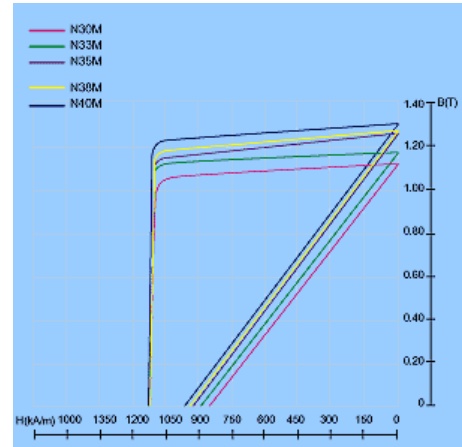
EK-1

Demagnetization Curves (Rare-Earth Neodymium)

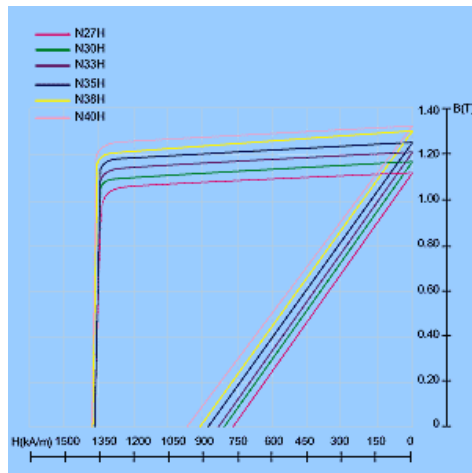
N Grade Demagnetization



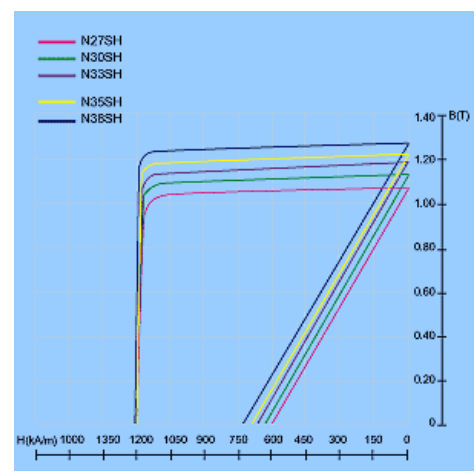
NM Grade Demagnetization Curve



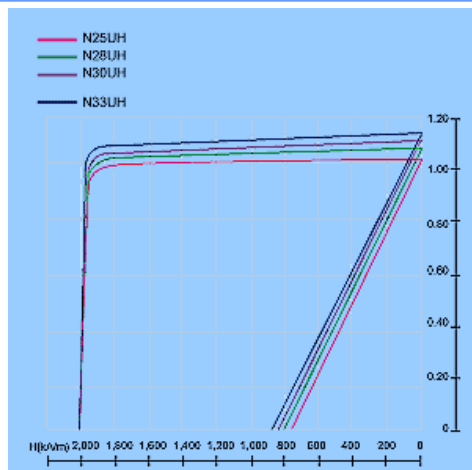
NH Grade Demagnetization Curve



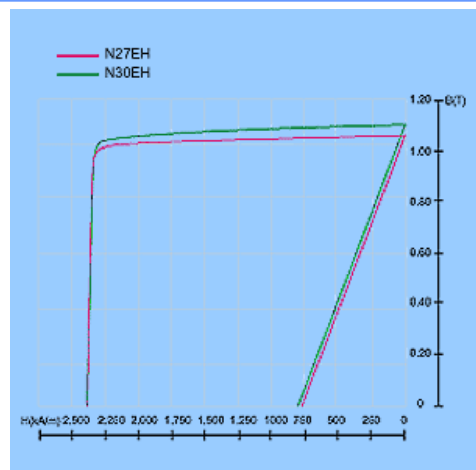
NSH Grade Demagnetization Curve



NUH Grade Demagnetization Curve



NEH Grade Demagnetization Curve



EK-2



SINGLE PHASE BRIDGE RECTIFIER

MB3505 THRU MB3510

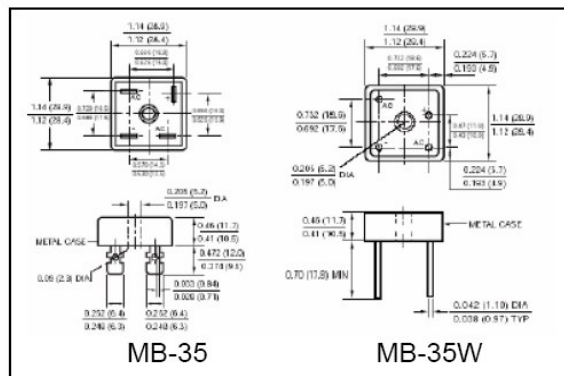
VOLTAGE RANGE
CURRENT50 to 1000 Volts
35.0 Ampere

FEATURES

- UL recognized under component index, file Number E127707
- High forward surge current capability
- Metal package provides low thermal resistance
- High isolation voltage from case to lugs
- High temperature soldering guaranteed: 260°C / 10 seconds
- Available in either lug package (MB3505) or wire lead package (MB3505W)

MECHANICAL DATA

- Case: Metal
- Terminal: Plated 0.25" (6.35mm) lug or Plated lead 0.040" (1.02mm) diameter
- Polarity: Polarity symbols marked on case
- Mounting: Thru hole for #10 screw, 20 in-lbs Torque max.
- Weight: 1.02 ounce, 29.0 gram (MB-35)
0.93 ounce, 26.4 gram (MB-35W)



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

- Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified
- Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load
- For capacitive load derate current by 20%

	SYMBOLS	MB 3505	MB 351	MB 352	MB 354	MB 356	MB 358	MB 3510	UNIT
Maximum Repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum RMS Voltage	V_{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	Volts
Maximum DC Blocking Voltage	V_{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum Average Forward Rectified Current, At $T_C = 55^\circ\text{C}$ (Note 1 and 2)	I_{AV}	35							Amps
Peak Forward Surge Current									
8.3ms single half sine wave superimposed on rated load (JEDEC method)	I_{FSM}	400							Amps
Rating for Fusing ($t < 8.3\text{ms}$)	I^2t	664							A^2s
Maximum Instantaneous Forward Voltage drop per Bridge element 17.5A	V_F	1.1							Volts
Maximum DC Reverse Current at Rated $T_A = 25^\circ\text{C}$	I_R	10							μA
DC Blocking Voltage per element $T_A = 100^\circ\text{C}$		1.0							mA
Isolation Voltage from case to lug or lead	V_{ISO}	2500							Volts
Typical Thermal Resistance (Note 1 and 2)	$R_{\theta Jc}$	2.0							$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating Junction Temperature	T_J	(-65 to +150)							$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Rang	T_{STG}	(-65 to +150)							$^\circ\text{C}$

Notes:

- Unit mounted on 9" x 3.5" x 4.6" (23cm x 19cm x 11.8cm) AL finned plate
- Bolt down on heat-sink with silicon thermal compound between bridge and mounting surface for maximum heat transfer efficiency with #10 screw

EK-3**TEKNİK TARAMA**

Aydın M, Huang S, Lipo TA (2004), axial akılı sabit mıknatıslı disk jeneratörlerin yapıları, dizaynları ve çalışma şekilleri hakkında detaylı bilgi vermişlerdir. Makine üzerinde manyetik akı yollarını belirtmişlerdir. Manyetik akı yoğunluğu oldukça artan mıknatısların imal edilmesinden dolayı sabit mıknatıslı makinelerin daha gözde olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca axial akılı makinelerin daha verimli ve daha yüksek kapasiteye sahip jeneratörler imal edilebileceğini ifade etmişlerdir. Jeneratör büyüklüklerinde axial makinelerin daha küçük olduğunu belirtmişlerdir (24).

Söderlund L, Eriksson JT, Salonen J, Vihriala H, Perala R (1996), yaptıkları çalışmada 5 ve 10 kW'lık 14 sabit mıknatıs (Ndfeb) kutuplu rotor, 42 bobinli statordan oluşan rüzgar jeneratörünü analiz etmişlerdir. Düşük rüzgar hızları ve dişli kutusu içermeyen çalışmalarda çok kutuplu jeneratörler kullanıldığını ifa etmişlerdir. Sabit mıknatıslı jeneratörlerde manyetik akı yoğunluğu daha fazla olan Ndfeb mıknatısları kullanmışlardır (28).

Wang RJ, Kamper MJ, Westhuizen KV, Gieras JF (2005), çalışmalarında nüvesi (çekirdeksiz) statorlu, axial akılı sabit mıknatıslı makineyi incelemişler ve prototipini yaparak hesapladıkları değerler ile buldukları deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Nüvesiz makineleri, geleneksel makinelerde oluşan çekirdek kayıplarının olmamasından dolayı daha verimli olduğunu analiz etmişlerdir (29).

Bumby, J.R., Martin, R., Mueller, M.A., Spooner, E., Brown, N.L., Chalmers, B.J., (2004) çalışmalarında, axial akılı sabit mıknatıslı makinenin küçük ve orta büyüklükteki sistemlerde, neodyum mıknatısın fiyatının düşmesi ile daha avantajlı ve verimli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında dışta iki adet rotor ve içte nüve üzerinde stator bobinlerini kullanarak 20 ve 40 kW'lık iki adet deneysel jeneratörü test edip sonuçlarını analiz etmişlerdir. Faz sayısının çok olması, hava aralığı alan etkisi, düşük indüktans gibi sebeplerden dolayı axial akılı makinelerde ölçümlerin daha karışık ve zor olduğunu belirtmişlerdir (30).

Hwang DH, Lee KC, Kang DH, Kim YJ, Choi KH, Park DY (2004), yaptıkları çalışmada, çift axial akılı sabit mıknatıslı 10 KVA gücündeki makineyi 300 rpm devirde test etmişlerdir. Makinede 24 bobin kullanmışlar ve yıldız bağlı 3 faz elde ederek sonuçları almışlardır (31).

Aydın M, Huang S, Lipo TA (2001), birlikte yaptıkları çalışmada internal ve external axial akılı makineleri karşılaştırmışlardır. Elektromanyetik darbe şeklindeki torku minimize etmeye çalışmışlardır. Axial akılı makinelerin değişik alternatiflerini inceleyerek tork darbe faktörlerini karşılaştırmışlardır (32).

Hasan TS, Luk CK, Bhinder FS, Ebaid MS (2000), çalışmalarında, axial akılı ve yüksek hızlı sistemin prensiplerini, yapılabilişliğini incelemişlerdir. 50 KVA, 420 V, 3 faz ve 50 000 rpm devirli jeneratörün demonstrasyonunu yaparak sonuçları tartışmışlardır (33).

Caricchi F, Crescimbeni F, Honorati O, Bianco GL, Santini E (1998), çalışmalarında axial akılı makine kullanmışlar ve statorlarını trapezoidal ve romboidal sararak değişik bir dizayn şekli denemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın teorik ve pratik sonuçlarını analiz etmişlerdir (34).

Muljadi E, Butterfield CP, Wan YH (1999), çalışmalarında, çok modüllü axial akılı makine üzerinde toroidal sarımlı stator dizayn ederek, test sonuçlarını analiz etmişlerdir (35).

Keppola H, Perala R, Söderlund L ve Vihriala H (2000), çalışmalarında Ndfeb mıknatısa sahip sabit mıknatıslı çok kutuplu 100 kW güce sahip olan jeneratörü dizayn etmişlerdir. Axial akılı toroidal stator sabit mıknatıslı senkron jeneratörün deneysel sonuçlarını analiz etmişlerdir (36).

Fengxiang W, Wenpeng Z, Ming Z ve Bauguo W (2002), yaptıkları çalışmada mikro türbinler için sabit mıknatıslı yüksek hızlı jeneratörün dizayn ilişkilerini incelemişlerdir (37).

Aydin M, Huang S, Lipo TA (2002), çalışmalarında yüzey axial akılı, torus tip makinelerde alan kontrollü yapmaya çalışmışlardır. Kutup sayısı ile güç yoğunluğu optimizasyonu simüle ederek yapmışlardır (38).

Hill-Cottingham RJ, Coles PC, Eastham J F, Profumo F, Tenconi A, Gianolio, G, Cerchio M (2002), yaptıkları çalışmada, çok sayıda diskli axial akılı makinelerde nüvesi stator kullanmışlar ve plastik mekanik yapıları hakkında modelleme çalışması yapmışlardır (39).

Rovio T, Vihriala H, Söderlund L ve Kriikka (2001), küçük ölçekli rüzgar güç sistemlerinde axial, radial akılı jeneratörleri incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında her iki yapıdaki jeneratörü karşılaştırmışlardır. Radial akılı makinenin yüksek tork istediğini belirtmişlerdir. Axial akılı makinenin çok basit ve oldukça sağlam olduğunu, daha ekonomik ve kararlı olduğunu belirtmişlerdir (40).

Adegas FD, Pena GM, Ale JAV, Simioni GS (2003), çalışmalarında imalatçıların yaptıkları küçük çaplı birkaç rüzgar türbinini 7,35 kW gücündeki bir fan yardımıyla laboratuvar ortamında değişik test yöntemleri kullanarak test etmişleri ve imalatçılar verilen katalog değerlerini karşılaştırmışlardır. Türbin jeneratörlerini yüklemek için çıkış gerilimine göre rezistif yükler ampul veya akü bağlayarak değerleri kaydetmişlerdir (42).

Chen J, Nayar CV, Xu L (2000), yaptıkları çalışmada direk akuple edilmiş, dış rotorlu sabit mıknatıslı makineyi dizayn ve finite element analizini yapmışlardır. Çok kutuplu ve düşük hızlı sistem tasarlayarak sonuçlandırmışlardır (43).

Muljadi E ve Green J (2002), yaptıkları çalışmada, sabit mıknatıslı küçük rüzgar türbin jeneratörlerinde kavrama torkunu (cogging torque), bozucu titretilici veya başlangıç torkunu yükselten bu etkiyi incelemişlerdir. Bozucu ve zorlayıcı bu torkun sabit mıknatıslı jeneratörlerde, jeneratörün geometrisinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Torku minimuma indirmek için hava aralığı, genişliği ve açılarını

iyileştirmeye çalışmışlardır. Değişik hava aralığı, genişliği ve açılardaki sonuçları vermişlerdir (44).

Lombard NF, Kamper MJ (1999), çalışmalarında, demir nüvesiz axial akılı ve sabit mıknatıslı makinenin performansını ve analizini yapmışlardır. Deneysel sonuçlarını aldıkları makinenin karakteristiklerini vermişler ve sonuçların analizini yapmışlardır (45).

Chen Z, Spooner E, Norris WT, Williamson AC (1998), çalışmalarında Sabit mıknatıslı makinenin çıkışına kapasitif yük bağlayarak daha sonra doğrultucularla DC gerilim elde etmiş ve değişik değerlerde kapasitif yüklerin makinenin çalışma koşullarına etkisini incelemişlerdir. Çıkış güç karakteristiğinin önemli ölçüde değiştiğini grafiksel ve teorik hesaplarla göstermişlerdir (46).

Popa LM, Blaabjerg F ve Boldea I (2004), yaptıkları çalışmada rüzgar türbin jeneratörünü Matlab-Simulink ve Digsilent programlarını kullanarak modellemişler ve simüle etmişlerdir. 0,5 MVA ve 2 MVA jeneratörleri yumuşak başlatma ile güç faktörünü iyileştirmek için kondansatör ve statik var sistem (SVAR) kullanmışlardır. Çalışmaları neticesinde her iki jeneratörün aktif güç, reaktif güç, hız ve akım verilerini yumuşak başlatarak analiz etmişlerdir (47).

Bialasiewicz JT, Muljadi E, Drouilhet S, Nix G (1998), çalışmalarında hibrit sistemler olarak adlandırılan, dizel jeneratör ile rüzgar jeneratörünü birlikte çalıştırmak için simülasyon yapmışlardır. Çalışmalarında 200 kW'lık dizel jeneratör ile 50 kW'lık rüzgar jeneratörünü simüle etmişlerdir (48).

Karlis A ve Dokopoulos (1996), yaptıkları simülasyon çalışmalarında 663 KVA hidro jeneratör, 300 KVA diesel jeneratöre , 500 kW rüzgar türbinine yük bağlayarak sonuçlar elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada rüzgar türbinini devreye alarak ve çıkartarak geçici durumları ve endüktif yüklerde sistem cevaplarını vermişlerdir (49).

ÖZGEÇMİŞ

Seyfullah UĞUZ, 1976 yılında Ankara'nın Polatlı ilçesinde doğdu. İlk ve Orta öğrenimini Polatlı'da tamamladı. Liseyi Ankara Laborant Meslek Lisesinde 1993 yılında tamamladıktan sonra Konya Selçuk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinde lisans öğrenimini 1998 yılında tamamladı. Halen Konya Köy Hizmetleri Müdürlüğünde Mühendis olarak görev yapmakta ve evlidir.