

**RÜZGAR TÜRBİNİNDE  
ROTOR TASARIMI VE ANALİZİ**

**2009  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE EĞİTİMİ**

**Sami YANIK**

# **RÜZGAR TÜRİNİNDE ROTOR TASARIMI VE ANALİZİ**

**Sami YANIK**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Haziran 2009**

Sami YANIK tarafından hazırlanan “RÜZGAR TÜRBİNİNDE ROTOR TASARIMI VE ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim KADI

.....

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 22/06/2009

Unvanı, Adı SOYADI

İmzası

Başkan: Prof. Dr. İbrahim KADI (K.B.Ü)

.....

Üye : Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA (K.B.Ü)

.....

Üye : Doç. Dr. Mustafa YAŞAR (K.B.Ü)

.....

Tarih .../.../2009

KBÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

*Sami YANIK*

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **RÜZGAR TÜRBİNİNDE ROTOR TASARIMI VE ANALİZİ**

**Sami YANIK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Eğitimi Anabilim Dalında**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İbrahim KADI**

**Haziran 2009, 76 Sayfa**

Yeryüzündeki fosil yakıt rezervlerinin gün geçtikçe azalması nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda çok fazla önem kazanmıştır. Rüzgar enerjisi Türkiye için en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir.

Yapılan bu çalışmada; pervane tipi, yatay eksenli, önden rüzgarlı, iki kanatlı rüzgar türbini imal edilmiş olup; rüzgar hızının sürekli değişmesinden dolayı elektrik frekansının dalgalanması ve şiddetli rüzgarlarda türbin kanatlarının ve kanat yuvalarının hasar görmesi sorunları üzerine yeni bir sistem geliştirilmiştir.

Geliştirilen sistemde; mekanik olarak türbin kanatlarının rüzgara yapmış olduğu açığı değiştirmekle rüzgarın şiddetine göre türbin devrini ve dolayısıyla üretilen elektriğin frekansını sabit tutmak hedeflenmiştir. Ayrıca şiddetli rüzgar karşısında sistem kanat açıları kontrolüyle türbin devri yavaşlatılabilmektedir.

Tasarımı ve imalatı yapılmış olan ‘‘Kanat Kontrol Mekanizması’’ rüzgar türbininin devriyle meydana gelen merkezkaç kuvvetini kullanarak aktif hale gelmektedir. Mekanizmada bulunan çekme yaylarının yay katsayısına göre devreye geçen sistem, pratikte sekiz farklı yayla deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deneyde 2,86N ile 9,38N arasında çekme katsayılarına sahip yaylar kullanılmıştır. Deney sonuçlarında yay sabiti 2,86N olan yayla kanat kontrol mekanizması rüzgar türbinini yaklaşık 250 d/d’ya kadar sabitleirken, yay sabiti 9,38N olan yayla yapılan deneyde ise sistemi 580 d/d’ya kadar sabitlediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; elektrik üretiminde kullanılan yatay eksenli, iki kantlı rüzgar türbinlerinde rüzgar hızına göre sürekli değişebilen elektrik frekansının sabitlenmesi mekanik bir sistemle çözülebilirliği öne sürülmüştür. Teorik ve pratiksel deneyleri yapılarak sabitlenmek istenilen devre göre yay seçimi tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** : Rüzgar türbini, Rüzgar enerjisi, Kanat kontrol mekanizması, Simülasyon analizi.

**Bilim Kodu** : 626.08.01

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **ROTOR DESIGN AND ANALYSIS FOR A WIND TURBINE**

**Sami YANIK**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Education**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İbrahim KADI**

**June 2009, 76 Pages**

Renewable energy sources have gained much importance due to decreasing fossil fuel reserves. Wind energy is known to be one of the most important renewable energy resources of Turkey.

In this study; a new system of propeller type, horizontal axis, upwind wind turbine was designed and produced to eliminate the frequency fluctuation of the electricity due to continually changing wind velocity, and damage to the turbine blades and blade housing that can be caused by the high winds.

Developed system aims to hold the turbine rotation and thus the frequency of the electricity generated constant by mechanically manipulating the angle of turbine blades to the wind. Besides, turbine rotation speed can be slowed down by the control of the blade angles of the system experiencing a high wind.

The Blade Control Mechanism designed and made is activated using the centrifugal force developed by the rotation of wind turbine. System which is activated according

to the spring constant of the extension springs in the mechanism was tested with eight different springs. In the experiments, springs having extension constants between 2,86N and 9,38N were used. It was determined that with the springs with 2,86N and 9,38N extension coefficients the wind turbine was held constant up to 250 1/min and 580 1/min respectively.

As a result; it is argued that a mechanical system can be used to fix the frequency of the electricity generated by a two blade wind turbine which is subjected to vary according to the wind velocity. The proper spring choice for each rotation speed desired was determined by theoretical calculations and experiments.

**Keywords** : Wind turbine, Wind energy, Wing control mechanism, Simulation analysis.

**Science Code** : 626.08.01



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü desteği sunan ve kıymetli zamanını bana ayırmaktan çekinmeyen, bilimsel bakış açımın gelişmesinde bilgilerinden sonsuz faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. İbrahim KADI'ya, görüşleriyle çalışmama yön veren Doç. Dr. Mustafa YAŞAR ve Murat KOŐAR'a, Tasarım ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı hocalarıma, deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım ve öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
RÜZGAR TÜRBİNLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	10
2.2. RÜZGARIN TANIMI.....	10
2.3. RÜZGAR ENERJİSİNİN KULLANILDIĞI ALANLAR.....	12
2.3.1. Elektrik Üretimi.....	13
2.3.2. Su Pompalama .....	14
2.3.3. Sıkıştırılmış Hava Depolama .....	14
2.3.4. Isı Depolama .....	15
2.3.5. Atalet Depolama .....	15
2.3.6. Hidrojen Depolama.....	15
2.3.7. Rüzgar Enerjisinin Avantajları .....	16
2.3.8. Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları .....	17
2.4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI.....	17
2.4.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri .....	19

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.4.2. Rüzgarı Önden Alan Türbinler .....	21
2.4.3. Rüzgarı Arkadan Alan Türbinler .....	21
2.4.4. Tek Kanatlı Rüzgar türbinleri .....	22
2.4.5. Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	22
2.4.6. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri .....	23
2.4.7. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri .....	23
2.4.8. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	23
2.4.9. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri .....	25
BÖLÜM 3 .....	26
MATERYAL VE METOT .....	26
3.1. DENEYDE KULLANILAN RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIM AŞAMALARI .....	26
3.1.1. Rüzgar Türbininin Matematiksel Modellenmesi .....	27
3.2. İMALATI YAPILAN DENEY SİSTEMİNİN TANITILMASI.....	31
3.2.1. Rotor (Gövde).....	31
3.2.2. Rotor Mili .....	32
3.2.3. D.C. Motor.....	33
3.2.4. Güç Ünitesi (Motor kontrol ünitesi) .....	33
3.2.5. Kanat Kontrol Mekanizması.....	34
BÖLÜM 4 .....	39
DENEYSEL ÇALIŞMA .....	39
4.1. DENEYSEL ÇALIŞMANIN AMACI.....	39
4.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA İZLENEN YÖNTEM.....	40
4.3. DENEYİN YAPILIŞI.....	41
4.3.1. Pratik Deney Aşamaları .....	41
4.3.2. Teorik Deney Aşamaları.....	42
4.4. DENEYSEL BULGULAR.....	51

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 5 .....	61
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	61
KAYNAKLAR .....	64
EKLER.....	69
EK AÇIKLAMALAR A .....	70
DENEYSEL ÇALIŞMANIN MONTAJ VE YAPIM RESİMLERİ .....	70
ÖZGEÇMİŞ .....	74

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Al-Dimaşki tarafından tasvir edilen DE yel değirmeninin rotor kısmı .....	5
Şekil 2.2. İlk elektrik üreten rüzgar türbini .....	6
Şekil 2.3. Rüzgar gücünden elektrik enerjisi üretimi için kullanılan ilk türbinler .....	6
Şekil 2.4. 200 kW'lık Gedser ve 125 kW'lık Smith-Putnam rüzgar türbinleri .....	7
Şekil 2.5. Hutter's rüzgar türbini .....	8
Şekil 2.6. Türbin 600 kW mekanik yapısı .....	13
Şekil 2.7. Önden ve arkadan rüzgar alan yatay eksenli rüzgar türbinleri. ....	20
Şekil 2.8. Dikey eksenli Savonius ve Darrieus türbinlerinin birlikte kullanıldığı bir rüzgar türbini. ....	24
Şekil 3.1. Sistemin modellenmiş genel görünüşü. ....	27
Şekil 3.2. İmal edilmiş sistem ve montaj resmi. ....	31
Şekil 3.3. Hareketli kanat sistemi .....	32
Şekil 3.4. Rotor milinin deney tezgahına bağlantısı .....	33
Şekil 3.5. Güç ünitesi (Motor kontrol ünitesi). ....	34
Şekil 3.6. Kanat kontrol mekanizması ve sistemin hareketli haldeki simülasyon modeli .....	34
Şekil 3.7. Kanat kontrol mekanizması montaj resmi. ....	35
Şekil 3.8. Ayar mekanizması montaj ve perspektif resmi .....	36
Şekil 3.9. KKM'da deneye tabi tutulan çekme yayları. ....	37
Şekil 4.1. Kanat kontrol mekanizması, ayar bileziği. ....	41
Şekil 4.2. ANSYS\Workbench analiz aşamaları .....	43

## Sayfa

Şekil 4.3. ANSYS\Workbench kontak ve bağlantılar.....	43
Şekil 4.4. ANSYS\Workbench kontak ve bağlantılar.....	44
Şekil 4.5. ANSYS\Workbench’de malzeme özelliklerinin tanımlanması. ....	45
Şekil 4.6. ANSYS\Workbench’de Mesh uygulan parçalar.....	46
Şekil 4.7. a. Kilitleme mekanizması kesit görünüşü. b. Baskı yayının bilyeye dört farklı noktadaki etkileri.....	47
Şekil 4.8. Kilitleme mekanizmasında oluşan kuvvetler. ....	48
Şekil 4.9. Analiz sonucu oluşan gerilimler. ....	52
Şekil 4.10. Yay sabitesi $c = 2,86$ N/mm olan analiz sonucu gerilimleri.....	53
Şekil 4.11. Deney 1: Yay sabitleme katsayısı 2,86 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	55
Şekil 4.12. Deney 2: Yay sabitleme katsayısı 3,29 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	55
Şekil 4.13. Deney 3: Yay sabitleme katsayısı 4,58 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	56
Şekil 4.14. Deney 4: Yay sabitleme katsayısı 5,99 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	57
Şekil 4.15. Deney 5: Yay sabitleme katsayısı 6,18 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	57
Şekil 4.16. Deney 6: Yay sabitleme katsayısı 6,23 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	58
Şekil 4.17. Deney 7: Yay sabitleme katsayısı 8,34 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	59
Şekil 4.18. Deney 8: Yay sabitleme katsayısı 9,38 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası. ....	59
Şekil A.1. Deney sisteminin perspektif görünüşü.....	71
Şekil A.2. Deney sisteminin montaj resmi..... <b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>	2
Şekil A.3. Deney sisteminin antedi. ....	733

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Rüzgar Ölçeği .....	11
Çizelge 2.2. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması ve kullanım yerleri .....	19
Çizelge 3.1. Rüzgar türbini model parametreleri .....	28
Çizelge 3.2. Kanat sayısı ile hız katsayısı arasındaki ilişki.....	28
Çizelge 3.3. Denejde kullanılan yayların özellikleri .....	37
Çizelge 4.1. Kilitleme mekanizması baskı yayı değerleri.....	46
Çizelge 4.2. Rotor devrine göre Rüzgar hızları.....	51
Çizelge 4.3. Kanat kontrol mekanizmasının aktif olduğu devirler. ....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- A : Rotor kanatlarının süpürdüğü alan ( $m^2$ )
- $\alpha$  : Pürüzlülük katsayısı
- $C_P$  : Güç katsayısı
- $C_D$  : Sürükleme katsayısı (drag coefficient)
- $C_L$  : Kaldırma katsayısı (lift coefficient)
- D : Sürükleme kuvveti (N)
- $f_1$  : Senkron frekans
- $f_2$  : Rotorda endüklenen gerilimin frekansı
- $f_r$  : Rotorun dönme hızına eşdeğer frekans
- f : ( $P_n, P_d$ )  $P_n$  ve  $P_d$  'nin bir fonksiyonudur.
- $F_N$  : Döndürme momenti
- $F_s$  : Sürtünme momenti
- $f_w$  : Weibull olasılık dağılım fonksiyonu
- $F_w$  : Weibull olasılık Kümülatif dağılım
- I : Rüzgar ısrarlılığı
- $I_s$  : Sargı akımı
- L : Kaldırma kuvveti (N)
- $\lambda$  : Uç hız oranı
- n : Rüzgarın toplam esme sayısı
- $n_r$  : Rotor hızı
- $n_s$  : Döner alan hızı
- N : Rüzgarın toplam esme sayısı (Veltörel rüzgar şiddetinde)
- P : Güç (W)
- $P_v$  : Rüzgarın gücü (W)
- $\rho$  : Havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
- R : Rüzgar türbin rotorunun yarıçapı (m)



- T : Rüzgar türbini tarafından üretilen tork  
 $\tau$  :Yüzey gerilmesi  
u : Yüzey gerilmesi ile ilgili sürtünme hızı(m/s)  
 $\mu$  : Ortalama rüzgar hızı (m/s)  
 $\mu$  : Sürtünme katsayısı  
 $\eta$  : Verim  
 $\bar{V}$  : Rüzgar şiddetlerin aritmetik ortalaması  
v : Rüzgar hızı (m/s)

### **KISALTMALAR**

- RT : Rüzgar türbini  
DE : Düşey eksenli  
FEM : Finite element method  
FEA : Finite element analysis  
EY : Eksplisit yöntem  
IY : İmplicit yöntem  
PC : Personel computer  
BKIN : Bilinear kinematic hardening  
BISO : Bilinear isotropic hardening  
NŞA : Normal şartlar  
KKM : Kanat kontrol mekanizması

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Hareketin ve işin kaynağı olan enerji fiziksel bir sistemin iş yapabilme yeteneğidir. Dünyada insanlar ve tüm canlıların en temel ihtiyaçlarından en lüks ihtiyaçlarına varıncaya kadar; örneğin ulaşım, beslenme, ısınma vb. tüm gereksinimlerini karşılamak için enerjiye ihtiyaç duyarlar.

Dünyadaki artan nüfus ve gelişen sanayi ile enerji kaynakları sürekli kullanılmaktadır. Enerji gereksinimimizin büyük bir kısmı petrol, kömür, doğal gaz gibi fosil yakıt kaynaklarından karşılanmaktadır.

Fosil yakıt kaynakları belirli coğrafi bölgelerde sınırlı olarak bulunmakta ve kullandıkça azalmaktadır. Belirli bir ömrü olduğu bilinen bu kaynaklara seçenek olarak yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları önemini arttırmakta ve kullanımı için de yeni AR-GE ve teknolojileri gündeme getirmektedir. Güneş, rüzgar ve jeotermal gibi yenilenebilir enerjilerin ve hidrojen gibi yeni enerjilerin depolanmasında yeni yöntem ve malzemelerin geliştirilmesi bu enerjilerin kullanılmasını gündeme getiren en önemli faktörlerdir.

Azalan fosil yakıtlara olan ekonomik bağımlılık ve geleneksel enerji üretim sistemlerinin kötü çevresel etkileri, önümüzdeki yıllarda sürdürülebilir bir enerji ekonomisi oluşturabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ilginin artmasına neden olmuştur. Rüzgar enerjisi, yakın geçmişte büyük bir genişleme kaydederek dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağı haline gelmiştir (Energy Foundation, 2001; Muljadi and Butterfield, 2001).

Rüzgar türbinlerinin en büyük dezavantajı, sürekli değişken olan rüzgar hızının yük tarafında gerilim ve güç dalgalanmalarına neden olmasıdır. Bu problem, uygun güç dönüştürücüleri ve kontrol stratejileri kullanılarak çözülebilir. Diğer bir önemli problem de, rüzgarın bulunmadığı ancak tüketici talebinin hala devam ettiği

durumlarda kullanılmak üzere rüzgar türbinleri tarafından üretilen enerjinin depo edilme problemi (Khan and Iqbal, 2005; Köse ve Özgören, 2005).

Sabit hızlı sistemlerde, sadece rotor hızının küçük değişikliklerine müsaade edilir. Bu sistemin yapı ve performansı kanat eğim kontrolü gibi mekanizmaların mekaniksel karakteristiğine bağlıdır. Ayrıca türbülans ve kule şekli, güçteki değişimler olarak görülen dalgalanma yüklerini hızlı bir şekilde etkiler. Bu değişimler, şebekeye bağlı rüzgar türbinleri için istenmeyen bir özelliktir. Güçteki bu değişimler, rüzgar türbininin ömrünü kısaltan mekaniksel baskılara neden olur ve güç kalitesini azaltır. Bu nedenle rüzgar türbinleri optimum performansında çalıştırılmazlar ve genellikle rüzgardan maksimum güç elde edilemez (Uyar vd, 2005).

Rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar sürüklenme (drag) ve kaldırma (lift) kuvvetleridir. Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine  $90^\circ$  dik geldiği durumda iken; minimum sürüklenme kuvveti de hava akışı cismin yüzeyine paralel iken meydana gelir. Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır (Wilson, 1998).

Literatür araştırmalarından alınan bu açıklamalar ve problemlerden yola çıkarak; yapılan bu çalışmada, rüzgar türbinlerinin en büyük sorunlarından olan, sürekli değişken rüzgar hızının yük tarafında gerilime ve güç (frekans) dalgalanmalarına neden olması ve şiddetli rüzgarlar karşısında türbinlerin yıpranması sorununu çözmek amacıyla mekanik bir model geliştirip teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### RÜZGAR TÜRBİNLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları rüzgarı meydana getirmektedir. Rüzgar, yüksek basınç alanından alçak basınç alanına yer değiştiren havanın dünya yüzeyine göre bağlı hareketidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı rüzgar enerjisine çevrilebilmektedir. Bu enerji yerel coğrafi farklılık ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir. Rüzgar enerjisinde; rüzgarın hızı, yönü ve esme saat sayısı gibi özellikleri değerlendirilir. Rüzgarın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgarın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Meteorolojik ve topoğrafik açıdan rüzgarın olabileceği yerleri şöyle sıralayabiliriz:

- Basınç gradyanının yüksek olduğu yerler,
- Yağışların sürekli esen rüzgara paralel olduğu vadiler,
- Yüksek, engebesiz tepe ve platolar,
- Yüksek basınç gradyanlı düzlükler ve sürekli rüzgar alan az eğimli vadiler,
- Güçlü jeostrofik rüzgar alanlarının etkisinde kalan tepe ve zirveler,
- Jeostrofik rüzgar ve termal gradyan alanına sahip kıyı şeritleri.

Topoğrafya rüzgarın yönü, hızı ve dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsileleri, tepe ve kayalıklar, rüzgar profillerini büyük ölçüde etkiler (EİM, 1992).

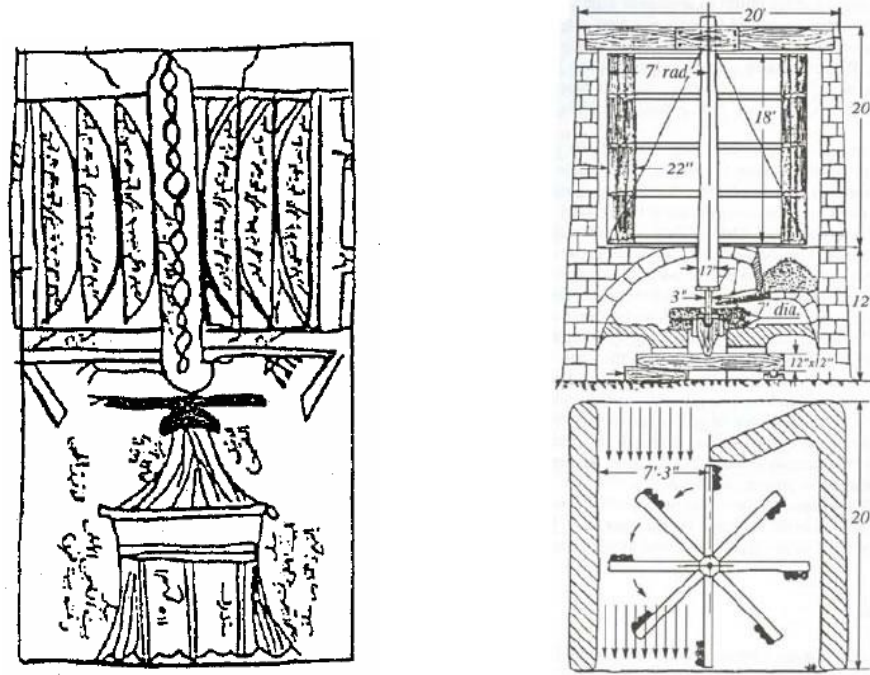
Dünyanın yeryüzüne göre bağlı hava hareketine rüzgar denir. Rüzgar atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi çevrime uğramış güneş enerjisidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin

çok küçük bir kısmı rüzgar enerjisine çevrilebilmektedir. Bu enerji yerel coğrafi farklılık ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir. Rüzgarın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgarın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Rüzgar enerjisinden genel olarak mekanik enerji üretimi ve elektrik enerjisi üretimi şeklinde yararlanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin shaft gücünden faydalanılarak elde edilen mekanik enerji, elektrik üretme, su pompalama, tahıl öğütme, kesme, sıkıştırma ve yağ çıkarma alanlarında kullanılmaktadır (Köse ve Özgören, 2005; Büyükmert, 2006).

Rüzgar türbinleri tarihçesi ile ilgili değişik dokümanlara rastlanmakla birlikte, en eski rüzgar iş makinesi olan yel değirmeninin, bundan 3000 yıl önce İskenderiye yakınlarında yapıldığı tahmin edilmektedir. Türkler tarafından ilk defa M.S. 640 yılına doğru imal edilen yel değirmeni tipleri, haclı seferleri sırasında Avrupa'ya geçmiştir. Yel değirmenleri 1105 tarihinde Fransa'da görülmeye başlanmış 1143 de İngiltere'de ilk yel değirmeni yapılmıştır. XIX. Yüzyıl sonlarına doğru Almanya'da rüzgar ile çalışan iş makineleri görülmeye başlandı. Yel değirmenleri Çin'de M.S. 750–850 yıllarında pirinç tarlalarının sulanmasında kullanılmıştır (Özgener, 2002).

1300 yılları civarında Al-Dimaşki (1256–1326) isimli Suriyeli bir evren bilimcisi aşağıdaki Şekil 2.1'de verilen çizim ve tasviri vermiştir. Altı üstlü iki odadan yapılmış olan bu binanın üst tarafında değirmen taşları alt tarafında ise bunları döndüren rotor (kepçeli dönen düşey silindir) kısmı vardır. Kepçeler 6–12 tane olup tüm silindir boyunca uzanmaktadır (Şen, 2002; Şahin et al, 2005).



Şekil 2.1. Al-Dimaşki tarafından tasvir edilen DE yel değirmeninin rotor kısmı (Shepherd, 1998).

İlk olarak doğuda kullanılan düşey eksenli yel değirmenleri, Batılılar tarafından geliştirilmiş ve yatay eksenli hale getirilmiştir. Yatay eksenli ilk yel değirmeni örneği 1180 yılında Normandiya Krallığı (İskandinavya Vikinglerinin kuzey Fransa'da kurduğu Krallık) zamanına aittir. 1882 yılında New York'da elektrik santrali kurulmuş ve daha sonra da elektrik enerjisi kullanımı yaygınlaştırılmıştır (Özgener, 2002, Engin et al, 2004).

1888 yılında Charles F. Brush (Amerikalı bilim adamı) elektrik üretebilen ilk rüzgar türbini yapmıştır. Bu türbin dünyanın en geniş türbinidir. Rotor çapı 17 m ve 144 adet tahtadan imal edilmiştir. Bu türbin 20 yıl hizmet vermiştir. Büyüklüğünün yanında ürettiği enerji sadece 12 kW kadardır (<http://www.windpower.org/en/-pictures/brush.htm>, 2005; <http://www.telosnet.net.com/wind/20th.html>, 2005).



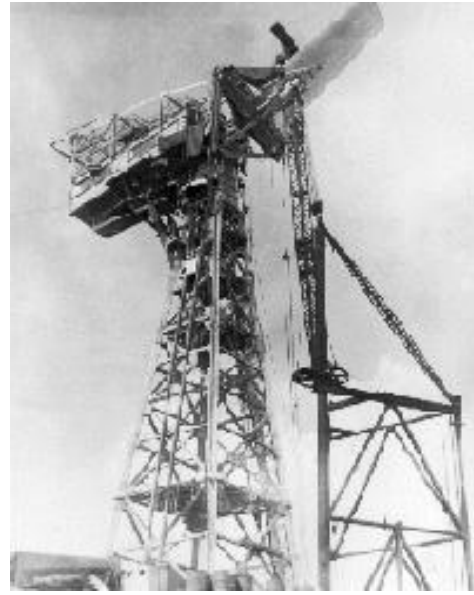
Şekil 2.2. İlk elektrik üreten rüzgar türbini (<http://www.windpower.org/en/pictures/brush.htm>, 2005).

Daha geliştirilmiş rüzgar elektrik enerjisi de Danimarkalı Profesör Paul La Cour tarafından 1891 yılında üretilmiştir. Doğru akım elde eden Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etmiş ve bu şekilde rüzgar enerjisini depolamıştır (Özgener, 2002).



Şekil 2.3. Rüzgar gücünden elektrik enerjisi üretimi için kullanılan ilk türbinler (<http://www.windpower.org/en/pictures/brush.htm>, 2005).

1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeni ile rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları bir kenara bırakılmıştır. Rüzgar enerjisinin bir kenara itilmişliği, enerji sıkıntısı nedeniyle 2. Dünya Savaşı'na kadar sürmüştür. Rüzgar enerjisi kullanımının tarihsel gelişimine; 1942 yılında üretilen 17,5 m pervane çaplı 50 kW nominal güçlü rüzgar türbini ve 1957 yılında üretilen 24 m pervane çaplı ve 200 kW nominal güçlü rüzgar türbini örnek verilebilir (Özgener, 2002).



Şekil 2.4. 200 kW'lık Gedser ve 125 kW'lık Smith-Putnam rüzgar türbinleri (<http://www.powergeneurope.com>, 2009).

İkinci Dünya Savaşı yıllarında rüzgar enerjisinde büyük gelişmeler oldu. Danimarkalı bir şirket olan F.L Smith 2 ve 3 kanatlı rüzgar tribünleri inşa etmiştir. Bunların en büyüğü 1941 yılında Vermont'da inşa edilen 1.25 megawatt Smith-Putnam makinesidir. Yatay eksenli, 2 kanatlı ve 175-foot rotor çapına sahiptir (Tümerdem, 2002).

Almanya'da Profesör Ulrich Hutter, yatay eksenli modern türbinleri geliştirdi. Bunlar, daha hafif ve yüksek verim sağlamak için cam elyafı (fiberglass) ve plastik kanatlar ile değişik açı kontrolünü yapan uçak kanatlı (airfoil) tiptir (<http://www.telosnet.net.com/wind/20th.html>, 2005).





Şekil 2.5. Hutter's rüzgar türbini (<http://www.telosnet.net.com/wind/20th.html>, 2005).

1960'lı yıllardan sonra rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ekonomik nedenlerle azalma göstermiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz) kullanılarak yapılan termik santraller ön plana geçmiştir. Fakat 1970'li yıllarda meydana gelen petrol krizi insanoğlunu tekrar değişik enerji kaynakları aramaya itmiştir (Özgener, 2002).

1979–1985 yılları arasında uygun devlet kredileri ile 4500'den fazla 1 ile 25 kW arasında değişen güçlerde rüzgar santralleri yapılmıştır. Aynı dönemde çeşitli özellikte 1000 adet uzaktan kontrollü sistem tesis edilmiştir. Elektriğin birim fiyatı yüksek olduğundan, 1980–1981 yıllarında, endüstriyel ve teknolojik gelişmeler sonucu 55 kW kapasiteli Rüzgar türbinleri (RT) yapılıp, üretimine başlanmıştır. Rüzgar endüstrisi daha çok yaygınlaşmış ve Risoe National Laboratuvarı yardımı ile Avrupa Rüzgar Atlasının gelişmesine paralel olarak elektrik birim fiyatlarında önemli ölçüde azalmalar meydana gelmiştir (Nurbay, 2005).

En küçük RT'ler 1982 yılında Kaliforniya piyasasına girdiğinde, Danimarka'da uzun süredir kullanılmaktaydı. Kaliforniya'da 1979–1985 yılları arasındaki devlet yardımı programı etkisini göstermiş ve 1981 yılında 150 adet olan küçük RT sayısı, 1985 yılı

sonlarında 16 000'e ulaşmıştır. Kaliforniya'daki bütün RT'lerin %75'ine ortak olan Danimarkalı üreticiler, 55 kW'lık RT'ler için bir endüstri kurmuşlardır. Danimarkalı RT üreticileri, bugün bile dünya çapındaki piyasada en büyük üretici olma özelliğini elinde bulundurmaktadır. 1985 yılında 25 m kanat çapında ve 250 kW gücündeki RT prototipi Kaliforniya'da yapılmış ve kısa bir zaman içinde piyasaya sürülmüştür. Danimarka da ise piyasayı canlı tutmak amacıyla ev tipi RT'ler tekrar geliştirilerek piyasaya sürülmüştür. Bugün bile 0,1–10 kW arasında bağımsız çalışan çeşitli güçlerde ev tipi RT'ler imal edilmektedir (Öger, 2006).

Küçük RT'lerin gelişmesine paralel olarak, 1976–1980 yılları arasında piyasanın talebi üzerine birkaç ülke büyük RT'ler için yatırım yapmıştır. Almanya ve dünyada, büyük RT'lerin geliştirilmesi için milyon marklar harcanmış, fakat teknik problemlerle karşılaşılıp olumsuz düşünceler ortaya çıkınca, destek azalmıştır. İkinci büyük RT üretimi maliyet ve performans bakımından başarılı olmasına rağmen tüketiciler tarafından ilgi görmemiştir. Böylece büyük RT'lerin geliştirilmesi mümkün olmamıştır.

1989 yılından itibaren Almanya'da RT teknolojisi hızla gelişmiştir. Rotor çapı 25 m, çıkış gücü 150-250 kW olan RT'ler imal edilmiş ve bunu rotor çapı 30-35 m, çıkış gücü 300 kW'dan büyük türbinler izlemiştir. Bu türbinler 2–3 yıl piyasaya egemen olmuştur. 1992 Ağustos ayında ilk Tacke-Windtechnik'in yaptığı 500 kW'lık RT çalışmaya başlamıştır. Bunu ENERCON'un ve diğer Avrupalı üreticilerin ürettiği türbinler takip etmiştir. 500 kW'lık RT'nin gelişmesi için 37 m kanat çapında rotor imalatına başlanmıştır. Bunu 46 m çapında ve 600 kW gücünde ve özellikle iç bölgelerde, düşük rüzgarlı alanlarda kullanılmak üzere dizayn edilmiş RT'ler izlemiştir. Tacke-Windtechnik'in yaptığı 500 kW'lık RT'den dört yıl sonra 1996 yılı sonlarına doğru ENERCON 66 m çaplı 1,5 MW gücünde RT üretmeye başlamıştır. Bu ilerlemeyi; 66 m çaplı ve 1,65 MW gücündeki türbinler izlemiştir. Artık günümüzde karadaki uygulamalar için 70 m, 80 m hatta 100 m rotor çaplı ve 2 MW ve üzeri güçlerdeki bir RT görmek olağan dışı değildir.

## 2.1. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar türbinleri, rüzgarın döndürme kuvvetini kanatları yardımıyla elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Havanın özgül kütlesi oldukça az olduğundan rüzgardan elde edilecek enerji esas olarak rüzgar hızına bağlıdır. Rüzgar hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile doğru orantılı olarak artar. Rüzgar santrali kurulması planlanan bir bölgenin en az bir yıllık rüzgar ölçümlerinin yapılması tavsiye edilmektedir. Ortalama rüzgar hızı topoğrafik özelliklere göre yıldan yıla değişiklik gösterebilir. Rüzgar hızındaki değişikliklerden dolayı, rüzgardan elde edilecek olan enerji potansiyeli de değişiklik gösterir. Bu yüzden belli bir bölgede, rüzgardan üretilecek elektrik enerjisinin planlanan üretim miktarı belirlenirken, yıllık ortalama rüzgar hızı, “Weibull dağılımı” ile hesaplanmış rüzgar hızı dağılımının kullanılması daha uygundur (Daradeli, 2001). Rüzgar türbinleri ana milin dönüş eksenine göre yatay eksenli ve düşey eksenli olarak imal edilirler. Bu iki tipten yaygın olarak kullanılan yatay eksenli türbinlerdir.

## 2.2. RÜZGARIN TANIMI

Rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları rüzgarı meydana getirmektedir. Rüzgar, yüksek basınç alanından alçak basınç alanına yer değiştiren havanın dünya yüzeyine göre bağlı hareketidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı rüzgar enerjisine çevrilebilmektedir. Bu enerji yerel coğrafi farklılık ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir. Rüzgar enerjisinde; rüzgarın hızı, yönü ve esme saat sayısı gibi özellikleri değerlendirilir. Rüzgarın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Nayar, 2001).

Dünyadaki enerji kaynaklarının tamamı güneş tarafından oluşturulmaktadır. Rüzgar; güneş enerjisinin yeryüzüne ulaşması sonucunda ortaya çıkan bir kuvvettir. Güneş tarafından dünyaya gönderilen enerjinin yaklaşık % 1-2’si rüzgar enerjisidir (Daradeli, 2001). Karaların, denizlerin ve atmosferin kendine özgü özgül ısıları vardır. Buldukları coğrafik konumlara göre ısıları değişmektedir. Yüzeyde oluşan sıcaklık farkı, basınç farklılıklarına bunun sonucu da rüzgar oluşumuna sebep olur.

Yüksek basınçtan, düşük basınca hareket eden havaya rüzgar denir.

Rüzgar hızı (Akbıyık, 2004):

$$V_g = \frac{1}{f\rho} \frac{\partial\rho}{\partial n} \quad (2.1)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

$p$  : Havanın yoğunluğu,

$f$  : Enlemin fonksiyonu olan Coriolis parametresi (2.2),

$\partial\rho$  : İki nokta arasındaki basınçtaki farklılık,

$\partial n$  : İki nokta arasındaki mesafe.

(2.1)'deki denklemde bulunan  $f$  (Enlemin fonksiyonu olan Coriolis parametresi);

$$f = 2\omega \sin\varphi \quad (2.2)$$

$\varphi$  : Enlem,

$\omega$  : Dünyanın açısal hızı ( $7,269 \cdot 10^{-5}$  rad/s).

Çizelge 2.1. Rüzgar Ölçeği (<http://www.telosnet.net.com/20th.html>, 2005)

RÜZGAR ÖLÇEĞİ	
RÜZGAR HIZI (m/s)	NİTELİĞİ
0 - 1,8	Sakin
1,8 - 5,8	Hafif
5,8 - 8,5	Orta
8,5 - 11	Taze
11 - 17	Güçlü
17 - 25	Fırtına
25 - 43	Güçlü fırtına
43 ve Üzeri	Kasırga

### 2.3. RÜZGAR ENERJİSİNİN KULLANILDIĞI ALANLAR

Rüzgar enerjisi bilindiği üzere, özellikle ülkemiz için en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Rüzgar türbin teknolojisindeki gelişmeler, elektrik enerjisi üretimi amaçlı rüzgar türbinlerinin kurulu güçlerinin yükselmesine, dolayısıyla birim enerji maliyetinin düşmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak, rüzgar türbinlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı gün geçtikçe artmaktadır (Çetin, 2001; Ata ve Çetin, 2008).

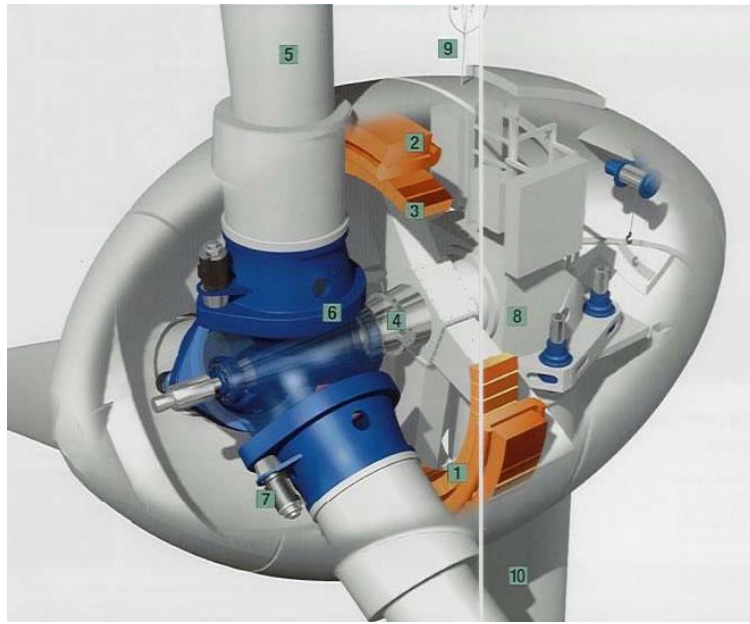
Rüzgar enerjisinden genel olarak mekanik enerji üretimi ve elektrik enerjisi üretimi şeklinde yararlanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin şaft gücünden faydalanılarak elde edilen mekanik enerji, su pompalama, tahıl öğütme, kesme, sıkıştırma ve yağ çıkarma alanlarında kullanılmaktadır. Rüzgar enerjili pompalama sistemlerinin elektrik veya dizelli pompalara göre birçok avantajları vardır. Karmaşık bir yapıya sahip olmadıkları için bakım ve onarım masrafları da yok denecek kadar azdır.

Rüzgar enerjisinden faydalanarak üretilen elektrik özellikle; enterkonnekte sistemin ulaşamadığı uzak yerleşim merkezlerinde, kırsal alanlarda, ormanlık ve dağlık bölgelerde, adalarda, deniz fenerlerinde, çiftliklerde, yangın kulelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde büyük güçlü rüzgar santralleri, elektrik şebekesine bağlı ve birden fazla türbin içeren rüzgar çiftlikleri biçimindedir. Rüzgar santrallinin ana yapı elemanı rüzgar türbinidir. Bir rüzgar türbini, çevredeki engellerin rüzgarı kesemeyeceği yükseklikte bir kule ve bunun üzerine yerleştirilmiş bir gövde ve rotordan oluşmaktadır. Kulenin yüksek olması, ayrıca yeryüzüne yakın rüzgar profilinin yüksek hızdaki kısmını kullanmaya da yarar. Rüzgarın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak, gövdedeki jeneratöre aktarılır. Elektrik üretim amaçlı modern rüzgar türbinlerinin çoğunluğu yatay eksenli olup rotor kanat sayıları bir ile üç arasında değişmektedir. Rotor çapları 1–75 m arasındadır. Rüzgar doğrultusuna yönelmeyi bir rüzgargülünün kumanda ettiği bir servo mekanizma sağlar. Aerojeneratörlerin gücü 100 W ile 1–3 MW arasında değişir. Danimarka başta olmak üzere Japonya, İspanya ve Amerika markalı türbinler 300, 450, 500, 600, 650, 750 kW güçlerinde sıkça kullanılmaktadır. Yüksek rüzgar gücüne sahip vadilerde 1 MW ile 1.5 MW gücünde türbinler kullanılmaktadır. Normal arazi şartlarında ise hem üretim hem de

maliyet açısından 600 kW'lık türbinler tercih edilmektedir.

### 2.3.1. Elektrik Üretimi

Rüzgar türbinleri sayesinde elde edilen elektrik enerjisi esas olarak, rüzgar itkisiyle dönen bir pervaneye bağlı bir alternatörden oluşur. Alternatördeki bir mıknatıs, içinde döndüğü sarımda bir elektrik gerilimi oluşturur ve sonuç olarak, bu iletken sarımda elektrik akımı meydana gelir. Daha sonra bu elektriğin gerilim ve akım düzeyi, trafo gibi araçlarla arzu edilen düzeylere ayarlanır.



Şekil 2.6. Türbin 600 kW mekanik yapısı (Akbıyık, 2004).

(1) Jeneratör kanatlarından gelen mekanik enerjiyi (2) stator ve (3) rotor arasında elektrik enerjisine dönüştürür. (4) ana mil kanatlarını taşır. (5) Kanatlar rüzgarın enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. (6) Kanat flanşı ve (7) Kanat çevirme motoru kanadın ideal açısını ayarlar. (8) Kabin çevirme motoru (9) Rüzgar ölçüm sensöründen gelen bilgilere göre kabin önünü rüzgara çevirir. (10) Kule pervaneyi rüzgarın fazla olduğu yükseklerle taşır.

Rüzgar türbinleri hareket halindeki havanın enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinalardır. Bu nedenle rüzgardan elektrik üretimi rüzgar enerjisi uygulamalarının temel yöntemlerinden biridir. Hareketli havadan mekanik enerji şeklinde elde edilen enerji, uygun bir bağlantı ve dişli kutusu içeren mekanik aktarıcı yoluyla elektrik

generatörüne aktarılır. Generatörden elektrik çıkışı, uygulamaya göre bir yüke ya da güç şebekesine bağlanır.

Türbin tarafından üretilen güç (Muljadi et al, 2000);

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 A \cdot C_p \quad (2.3)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada;

$v$  :Rüzgarın hızı (m/s)

$\rho$  :Özgül kütle ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  :Rotor kanatlarının süpürdüğü alan ( $\text{m}^2$ )

$P(v)$  :Rüzgarın gücü (W)

$C_p$  : Güç katsayısı.

### 2.3.2. Su Pompalama

Rüzgar enerjisinin shaft gücünden faydalanılarak elde edilen mekanik enerji, su pompalama, tahıl öğütme, kesme, sıkıştırma ve yağ çıkarma alanlarında kullanılmaktadır. Rüzgar enerjili pompalama sistemlerinin elektrik veya dizelli pompalara göre birçok avantajları vardır. Rüzgar enerjili su pompalama sistemlerinde hem düşük hem de yüksek hızlı türbinler kullanılabilir. Çok kanatlı rüzgar türbinleri düşük hızda çalışırlar.

### 2.3.3. Sıkıştırılmış Hava Depolama

Bu depolama pik yüklerin karşılanması için olduğu kadar, kesintili alternatif enerji (rüzgar, güneş gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlanacak enerji) uygulamalarına süreklilik kazandırmak için de kullanıma uygundur. Burada konvansiyonel gaz türbini, türbin ve kompresör olarak çalışmakta, hava akımı kontrol vanalarıyla yönlendirilmekte, basınçlı havanın geri kazanımı yeraltındaki boşlukla bağlantılı bir su kolonunun potansiyel enerjisi ile sağlanmaktadır. Söz konusu depolama sistemleri 200–500 MW'lık puant yük santralleri için kurulmaktadır (<http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec13.html>, 2005).

### **2.3.4. Isı Depolama**

Isı enerjisi yeraltında bir haftadan küçük kısa süreli depolanabildiği gibi, üç aydan büyük süreli mevsimlik olarak da depolanabilmektedir. Bu uygulamalar; ısı pompasız soğuk-ısı depolama, ısı pompalı soğuk-ısı depolama, güneş kolektörleri ile ısı depolama, termik-güç üniteleri ile ısı depolama, Değişken talep-arz sistemlerinde ısı depolama gibi beş değişik biçimde yapılabilmektedir. Isı pompasız soğuk-ısı depolama kış soğuğunu yazın kullanmak amacıyla yönelik olup; uygulamalar 31500 MWh kapasiteye çıkarılmıştır. Verimi daha yüksek olan ısı pompalı soğuk ısı depolamada, kışın ısıtma modunda kullanılan ısı pompası, yazın soğutucu görevi yapmaktadır. Bu teknik 1500 MWh kapasitesine kadar uygulanmıştır (Büyükmert, 2006).

### **2.3.5. Atalet Depolama**

Hızla dönen volanlar (Fly-Wheel) ile enerji depolama yeni bir fikir değildir. Son zamanlarda karma malzemelerden (metal+polyester reçine) volanlar yapılmıştır. Bununla birlikte enerji depolama olanakları sınırlı kalmıştır. Çünkü belli bir dönme hızının ötesinde volan parçalanabilmektedir. Magnetik yataklar üzerine yerleşmiş 15000 dev/dak hızla dönen bir volana 24 saat süreyle 400 Wh/kg'lık depolama yapmak kuramsal olarak mümkündür. Sistemin verimi yaklaşık % 80 dir.

### **2.3.6. Hidrojen Depolama**

Hidrojenin belki de en önemli özelliği, depolanabilir olmasıdır. Bilindiği gibi, günümüzde büyük tutarlarda enerji depolamak için hala uygun bir yöntem bulunmuş değildir. Eğer bugün hidroelektrik santrallerinden elde edilen enerjinin depolanması mümkün olsaydı, enerji sorununu bir ölçüde çözmek mümkün olabilirdi. Ancak, elektrik enerjisi için bilinen en iyi depolama yöntemi hala asitli akümülatörlerden başka bir şey değildir. Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak karbon tüplerde veya kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir (<http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec13.html>, 2005).

Agbossu ve Ark. dağlık bölgelerde kullanılmak için Rüzgar-Güneş-Hidrojen sistemi



geliştirmişlerdir. Buna göre elektroliz için gerekli olan elektrik 10 kW'lık rüzgar türbini ve 1 kW'lık güneş pilinden elde edilmiştir. Elektrik üretimi için yerli seviyede rüzgar ve güneş olduğunda hidrojen üretilmekte ve depolanmaktadır. Yeteri kadar rüzgar veya güneşin olmaması durumunda ise 5 kW'lık yakıt hücresinde üretilen hidrojen kullanılarak elektrik elde edilmektedir. Bu şekilde sürekliliği olan temiz bir elektrik üretim sistemi kurulmuş olmaktadır (Agbossou et al, 2000).

### **2.3.7. Rüzgar Enerjisinin Avantajları**

İlk etapta göz önünde bulundurulması gereken yenilenebilir enerji kaynaklarından biri Rüzgar Enerjisidir. Herhangi bir emisyonu olmayan, doğal kaynakları tüketmeyen, küresel ısınmaya katkısı olmayan, asit yağmurlarına neden olmayan, yerel (dışa bağımlı olmayan) ve çevreye duyarlı bir enerji kaynağı olan Rüzgar Enerjisi; özellikle 1990'lı yıllardan itibaren önemli bir gelişme göstermiş, Amerika ve Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yapılan araştırmalara göre; şu an yürütülmekte olan politikaların devam etmesi durumunda Dünya üzerinde, 2010 yılında 60.000 MW, 2020 yılında ise 180.000 MW'lık toplam rüzgar kurulu gücünün olacağı belirtilmektedir. Eğer çevresel kaygılar önemini artırarak enerji politikalarını yönlendirirse, toplam kurulu gücün 2010 yılında 100.000 MW'a, 2020 yılında ise 470.000 MW'a ulaşacağı tahmin edilmektedir (<http://www.cmo.org.tr/yayin/rapor/rapornukleer.php?altm=nukleer>, 2004).

Rüzgar enerjisi yenilenebilir, temiz bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisinin bazı üstünlükleri aşağıda sıralanmıştır.

- Enerji girdisi olarak kullanılan fosil yakıtlardan tasarruf sağlar.
- Atmosferde bol ve serbest olarak bulunur.
- Hammaddenin zamanla tükenmesi söz konusu değildir.
- Rüzgar santralleri için gerekli olan projeler basit ve rüzgar türbinlerin bakımı kolaydır.
- Rüzgar teknolojisi giderek ucuzlamaktadır.
- Temiz bir enerji kaynağıdır, emisyonu yoktur.

- Yerel bir enerji kaynağıdır, dışa bağımlı değildir.
- Yatırım alanının % 1'ini kullanır, bu alanlarda tarım ve hayvancılık faaliyetleri sürdürülebilir.
- Ucuz bir enerji kaynağıdır. Atıl alanlar kullanılabilir.
- Yüksek istihdam oluşturur (<http://www.cmo.org.tr/yayin/rapor/rapornukleer.php>, 2004; Önder, 2006).

Rüzgar türbinin kuruluşu sırasında harcanan enerjinin üç ay gibi kısa bir sürede üretilebilmesi özellikle bizim gibi kısa dönemde enerji talebi olan için önemli bir faktördür (ÇYDD, 2003).

### **2.3.8. Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları**

Türbinlerin sesli çalışmaları, yakın çevrelerinde yaşayan insanlar için rahatsız edicidir. Bu nedenle yerleşim merkezlerinden ve hassas hayvanat yaşam alanlarından uzakta kurulmaları gerekmektedir. Bölgesel olarak değişmekle birlikte, genelde düşük verimlidir.

Rüzgar enerjisinin dezavantajlarını:

- Görüntü kirliliği neden olabilir.
- Gürültü kirliliği oluşturabilir.
- Radyo ve TV sinyallerini bozabilir.
- Kuş göç yollarında, kuşlara zarar verebilir (<http://www.cmo.org.tr/yayin/rapor/rapornukleer.php>, 2004).

### **2.4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI**

Tarih boyunca çeşitli gelişmeler olan rüzgar makinelerinde kullanılan türbinler farklı tiplerdedir. Şimdiye kadar değişik nitelikte ve tipte geliştirilen bu RT'lerden bazıları günümüzde ticari hale gelmiştir. Rüzgar türbinleri ana milin dönüş eksenine göre üç gruba ayrılırlar. Bu iki tipten yaygın olarak kullanılan yatay eksenli türbinlerdir (Nurbay, 2005).






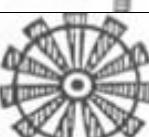
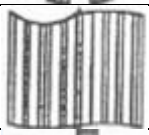

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri
- Eğik eksenli rüzgar türbinleri

Güç esaslarına göre;

- Mikro türbinler,
- Küçük rüzgar türbinleri,
- Büyük rüzgar türbinleri (Kocaman, 2003).

Çizelge 2.2’te Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması ve kullanım yerleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 2.2. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması ve kullanım yerleri (Wanga et al, 2007).

ROTOR TİPİ		$C_p$	RPM	TORK	KULLANIM YERİ
PERVANE TİPİ		0,42	Yüksek	Düşük	Elektrik Üretimi
DARRIEUS TİPİ		0,40	Yüksek	Düşük	Elektrik Üretimi
CYLOGIRO TİPİ		0,45	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
ÇOK KANAT TİPİ		0,35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
YELKEN KANAT TİPİ		0,35	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
FAN TİPİ		0,30	Alçak	Yüksek	Su Pompalama
SAVONIUS TİPİ		0,15	Alçak	Yüksek	Su Pompalama
HOLLANDA TİPİ		0,17	Alçak	Yüksek	Su Pompalama ve Değirmen

#### 2.4.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Geleneksel bir kullanım imkanı sunar. Maksimum güç elde etmek için rotorları rüzgara dik konumlandırılmalıdır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri önden rüzgar alan

ve arkadan rüzgar alan olmak üzere iki şekilde imal edilirler.



Şekil 2.7. Önden ve arkadan rüzgar alan yatay eksenli rüzgar türbinleri.

Rüzgar türbinleri farklı kanat yapısına 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 (Nayar et al, 2001).

Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanırlar. Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinlerinin ise, yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır.

Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise; eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, dümen sistemine gerek yoktur. Bu nedenle daha hafiftirler. Fakat büyük çaplı türbinlerde rüzgarın arkadan gelmesi tercih edilmez. Bunun nedeni ise; serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisini taşıyan kabloları burmasıdır. 1000 amper gibi yüksek akımlarla çalışan bu sistemde, akımın mekanik sistemlerle de toplanması sağlıklı değildir. Fakat küçük çaplı türbinlerde kolaylıkla uygulanabilirler.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri tarafından üretilen tork (Muljadi et al, 2000):

$$T = \frac{P}{W_s} \quad (2.4)$$

P : Türbin çıkış gücü,

$W_s$  : Rüzgar türbininin rotor hızı.

#### **2.4.2. Rüzgarı Önden Alan Türbinler**

Yaygın olarak kullanılan bu makinelerde rotor yüzü rüzgara dönüktür. En önemli üstünlüğü kulenin arkasında olacak rüzgar gölgeleme etkisine çok az maruz kalmasıdır, yani rüzgar kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak ve düz olsa bile kanadın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. Bu nedenle rüzgar çekilmesinden dolayı kanatların sert yapılması gerekir ve kanatların kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekir. Ayrıca, önden rüzgarlı makineler, rotoru rüzgara karşı döndürmek için rota mekanizmasına (yaw mechanism) gerek duyarlar (Nurbay, 2005).

Rotorun yüzü rüzgara doğru konumlandırılmış olan türbinlerdir. Daha yaygın olarak kullanılır. Çünkü bu türbinlerde jeneratörün arkasına yani rotora doğru yapacağı gölgeleme etkisi ortadan kalkmış olur. Fakat kulenin önünde ihmal edilebilecek düzeyde bir rüzgar gölgelemesi oluşur. Kanatlar kuleye göre eğilimli konumlandırılırlar. Kulenin silindirik yapılması bile kanadın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği gücü azaltır. Bundan dolayı kanatların sert malzemedan yapılması ve kuleye göre biraz uzakta konumlandırılması daha uygun olmaktadır (Önder, 2006).

#### **2.4.3. Rüzgarı Arkadan Alan Türbinler**

Bu makinelerin rotorları kule arkasında bulunur. Bunların önemli üstünlüğü rüzgara dönmek için rota mekanizmasına (yaw mechanism) gerek duymayışlarıdır. Eğer makine yatağı (nacelle) ve rotor uygun tasarlanırsa, makine yatağı (nacelle) rüzgarı pasif olarak izler. Daha önemli bir üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip olmasıdır. Bu, hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlüktür.

Böylece bu makinelerin avantajları; önden rüzgarlı makinelere göre daha hafif yapılması sonucu kule yükünün azalmasıdır. Ancak, kanat kuleden geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgarlı makinelerden daha çok zarar verir (Nurbay, 2005).

#### **2.4.4. Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri**

Tek kanatlı RT'nin yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede makine kütlesini ve rotorun döndürme momentini azaltmaktır. Ek olarak rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için, tek menteşe ile sabitleştirilip, 2 karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Diğer taraftan tek kanatlı rotorlarda, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için göbek (hub) çok iyi yapılmalıdır. Her birinin tesis gücü 630 kW olan ve rotor çapı 56 m üç tip RT Almanya'nın Wilhelmshaven yakınında çalışmaktadır. En önemli ticari dezavantajı, 120 m/sn civarındaki kanat uç hızının sebep olduğu rotorun aerodinamik gürültü seviyesidir. Bir kanatlı RT'nin kanat uç hızı, üç kanatlı RT ile karşılaştırıldığında, iki kat daha yüksektir ve daha fazla gürültü içermektedirler. Almanya halkı, gürültü ve görsel rahatsızlık nedeniyle bu RT'lerin piyasada kullanılmasına şans tanımamıştır (Nurbay, 2005).

#### **2.4.5. Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri**

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Birçok ülkede 10 ile 100 m rotor çaplı ölçülerde RT'ler tasarlanıp, Avrupa ve ABD'de çalışmaya başlamıştır. Bu ticari RT'lerden sadece birkaç tanesi prototip durumundan, seri üretime geçebilmiştir.

İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Ancak iki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için ilave teknik güç, maliyetin daha fazla artışına sebep olmaktadır (Nurbay, 2005). Ayrıca düşük şiddetteki rüzgar hızlarında pervane devreye girememektedir (Akbiyık, 2004).

#### **2.4.6. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri**

Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın her tarafında kullanılmaktadır. Üç kanat kullanımının asıl sebebi, dönme momentinin daha düzgün olmasıdır. Bu türbinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, kanatların bağlantı noktası (hub) içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı 70 m/sn altında olduğundan gürültünün düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli bir avantaj olup, halk tarafından kabulünü sağlamıştır (Nurbay, 2005).

#### **2.4.7. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri**

Çok kanatlı RT'ler (rüzgargülleri), RT'lerin gelişmemiş ilk örnekleridir. Yıllarca sadece su pompalamasında kullanılan bu türbinler, bu işlemdeki moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Çok kanatlı RT'ler düşük hızda çalışırlar. Türbin kanatlarının genişlikleri, pervane göbeğinden uçlara gidildikçe artış gösterir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlanarak, jeneratör mili devir sayısı artırılır ve otomobillerde uygulama alanı bulan jeneratörler kullanılır (Nurbay, 2005).

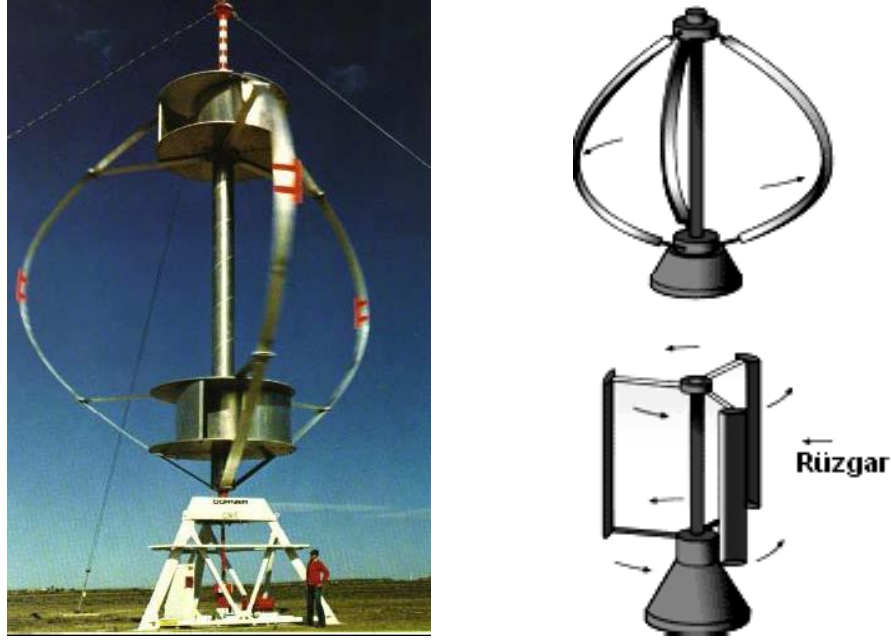
#### **2.4.8. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri**

Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. Dikey eksenli rüzgar türbinleri rüzgarı her yönden kabul edebilme üstünlüğüne sahiptir. Bu türbinler rüzgarı sürükler veya kaldırır. İlk harekete geçişleri güvenilir değildir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %35'dir. Türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duymazlar. Bu yüzden düşük rüzgar hızlarında çalışmak zorunda kalırlar ve rota mekanizmasına (yaw mechanism) ihtiyaçları yoktur. Düşük rüzgar hızları ve az miktarda su pompalamak için tasarlanmışlardır. Kanat sayısının artması malzeme ağırlığını da beraberinde getirdiğinden, yüksek rüzgar hızlarında verimsiz çalışır. Rotor çapı 5 m olan türbinden yaklaşık 0,5 kW güç elde edilir. Bu türbinleri yer yüzeyine bağlayabilmek için çelik halatlara gereksinim duyulmaktadır (Öger, 2006).

Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki tane



kanat vardır. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir. Rüzgarın tek yönden estiği düşünülürse; türbinin verdiği güç, sinüs şeklinde bir eğri oluşturur (Büyükmert, 2006).



Şekil 2.8. Dikey eksenli Savonius ve Darrieus türbinlerinin birlikte kullanıldığı bir rüzgar türbini (<http://www.windpower.org/en/-pictures/brush.htm>, 2005).

Dikey eksenli rüzgar türbinleri her istikametlidirler ve değişen rüzgar yönlerinde dönerler. Böylece rüzgarı her bir yönden kabul ederler. Dönüşün dikey eksenli, sürücünün toprak seviyesine dahi yerleştirilmesine izin vermektedir. Bu tipteki rüzgar türbinlerinin güç kat sayısı 0,15'ten azdır. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler (Şen, 2003).

Darrieus rüzgar türbinleri 1931 yılında Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiştir. 1970 ve 1980'lerde Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat dizaynları üzerine geniş çalışmalar yapılmıştır. Kanatları geometrik formlu aerodinamik profile sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma iner. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbin; 2 veya 3 kanatlı olur (Nurbay, 2005).

Bu türbinlerin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez. Böylece kule masrafı olmaz.
- Türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur. Yani dümen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.

Dezavantajları ise şöyledir:

- Yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgar hızları düşüktür.
- Verimi düşüktür.
- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir. İlk hareket motoruna ihtiyacı vardır.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir. Bu da pek pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir (Karadeniz, 2002).

#### **2.4.9. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri**

Dönme eksenleri düşeyle, rüzgar yönünde bir açı yapan RT'lerdir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır. Bu türbinlerin geniş bir uygulama alanı yoktur.

## BÖLÜM 3

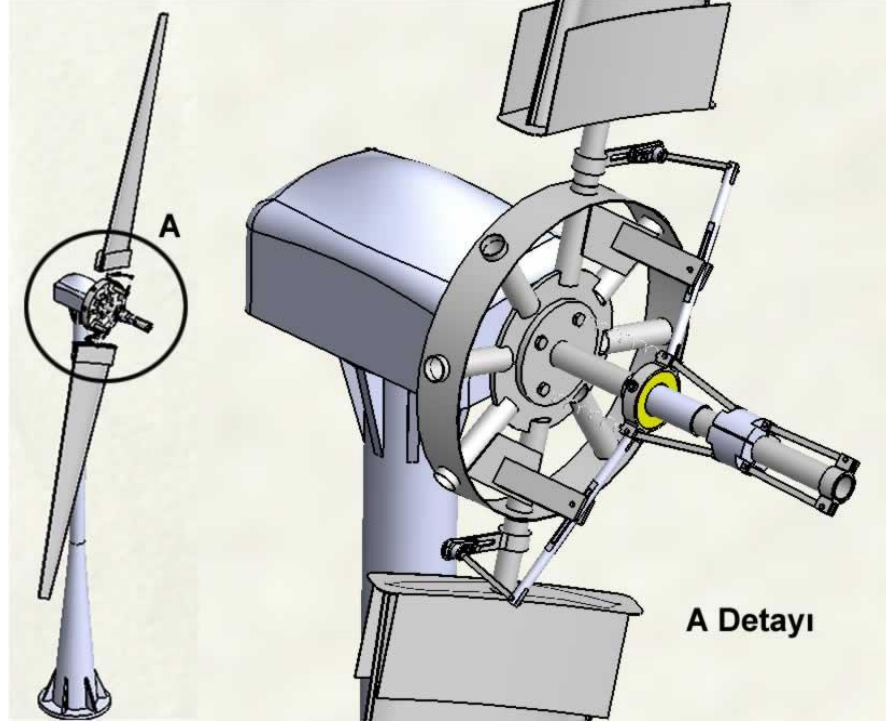
### MATERYAL VE METOT

#### 3.1. DENEYDE KULLANILAN RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIM AŞAMALARI

Bilindiği gibi, rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini yakalarlar. Bu durumda, rüzgar türbinlerinin, neden daha fazla kanadı olmadığı sorusu akla gelebilir. Çok veya geniş kanatlı, sert (esnek olmayan) yapılı rotoru olan bir rüzgar türbini, fırtınalı bir havada çok fazla kuvvete maruz kalır (burada, rüzgar gücünün, rüzgar hızının küpüyle orantılı olduğu akla gelmelidir). 50 yıl içinde, toplam 10 dakika, rüzgarın çok sert estiğini (fırtına) farz edersek, türbinlerin bu tür rüzgara karşı çok dayanıklı olmaları gerekir. Bu durum da maliyeti oldukça arttırmaktadır. Bu amaçla türbinler, az sayıda, uzun ve dar kanatlı olarak imal edilirler.

Rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat sayısı genellikle 2-24 arasındadır. Yüksek hız için tasarlanan türbinlerin kanat sayısı, düşük hızla çalışan türbinlerinkinden daha azdır. Kanat sayısı ile rotor devri arasında ters orantı vardır. Bunun yanı sıra rotorun momentiyle kanat sayısı doğru orantılıdır. Yani kanat sayısı arttıkça, rotor devri azalır tork yükselmektedir. Bu nedenle çok kanatlı sistemler güç gerektiren yerlerde (su pompalama, tahıl öğütme v.b.) az kanatlı sistemler de hız gerektiren yerlerde (elektrik üretimi v.b.) kullanılmaktadır.

Bu açıklamalar çerçevesinde yapılan bu çalışmada elektrik üretiminde en fazla verim elde edilebilen 2 kanatlı, önden rüzgarlı, yatay eksenli rüzgar türbini tercih edilmiştir. Sistem Solid Works'de modellenmiş olup, montaj hali Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sistemin modellenmiş genel görünüşü.

### 3.1.1. Rüzgar Türbininin Matematiksel Modellenmesi

Literatürde, rüzgar türbinleri ve rüzgar türbinleri tarafından tahrik edilen generatörlerle ilgili birçok çalışma (Battista et al, 2005; Delfino and Fornari, 2003; Abdin and Xu, 2000; Bilgili vd, 2003) mevcuttur. Bu çalışmada gerçekleştirilen modelde, farklı rüzgar hızlarının bir fonksiyonu olarak rüzgar türbini çıkış gücü temel alınmıştır. Rüzgar türbininin matematiksel modelinde kullanılan parametreler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Rüzgar türbini model parametreleri

$A$	Türbin süpürme yüzeyi [ $m^2$ ]
$C_p$	Türbin performans katsayısı
$C_{p\_pu}$	Türbin performans katsayısının birim sistem (p.u.) değeri
$k_p$	$C_{p\_pu} = 1$ ve $v_{wind\_pu} = 1$ p.u. için güç kazancı ( $k_p \leq 1$ )
$P_{m\_trb}$	Türbin mekanik güç çıkışı [W]
$P_{m\_pu}$	$\rho$ ve $A$ 'nın özel değerleri için nominal gücün p.u. değeri
$\beta$	Türbin bıçakları kanat açıklığı [derece]
$\lambda$	Rotor bıçakları tip hızının rüzgar hızına oranını (tip speed ratio)
$\rho$	Hava yoğunluğu [ $kg(m^3)^{-1}$ ]
$V_{rzg}$	Rüzgar hızı [ $m s^{-1}$ ]

**Çevrim Oranı:**

$$\lambda = \frac{V_\xi}{V} \quad (3.1)$$

$\lambda$  : Hız katsayısı (çevrim oranı)

$V_\xi$  : Türbin çarkının çevresel hızı (m/dk)

$V$  : Rüzgar hızı (m/s)

Çizelge 3.2. Kanat sayısı ile hız katsayısı arasındaki ilişki (Özerdem and Türkeli, 2002).

Kanat sayısı	Hız katsayısı ( $\lambda$ )
8-24	1
6-12	2
3-6	3
2-4	4
2-3	5

### **Çevresel Hız:**

Çevresel hız türbin çarkının en uç noktasının bir saniyede metre cinsinden almış olduğu yola denir. Rüzgarın hızı ile doğru kanat sayısı ile ters orantılıdır. Deneyde kullanılan rüzgar türbininin çevresel hız formülü;

$$V_{\ç} = V \cdot \lambda \quad (3.2)$$

### **Rotor Çevre Hesabı:**

Rotor çevre hesabında (rotor dönerken meydana getirdiği dairenin çevresi, rotor çevresidir);

$$L_{\ç} = \pi \cdot D \quad (3.3)$$

formülü kullanılmıştır.

Burada;

$L_{\ç}$  : Türbin çarkının çevresi (m)

$D$  : Rüzgar türbini rotor çapı (m)

### **Rotor Devri:**

Rotor devri (rotorun bir dakika içerisinde yapmış olduğu dönme sayısıdır);

$$n_R = \frac{V_{\ç}}{L_{\ç}} \quad (3.4)$$

Burada;

$n_R$  : Rotor devri (d/dk)

### **Süpürme Alanı:**

$$A_s = \pi \cdot r^2 \quad (3.5)$$

Buradan;

$A_s$  : Rotorun süpürme alanı ( $m^2$ )

$r$  : Rüzgar türbini rotor yarıçapı (m)

### **Rotorda Oluşan Güç:**

Ortamdaki serbest haldeki rüzgar rotor kanatlarına çarparak enerjisinin bir kısmını kanatlara bırakır ve buda rotorda dönme hareketi sağlar. Havanın yoğunluğu ve rotor çapı elde edilen enerjiyi doğrudan etkiler. Rotorda oluşan güç miktarı (6.6)'da verilen formül ile hesaplanmıştır (<http://www.samedgroup.com>, 2009).

$$P = \frac{1}{2} \rho A_s V^3 \quad (3.6)$$

Burada;

$P$  : Rotorda oluşan güç ( $W/m^2$ )

$\rho$  : Havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )

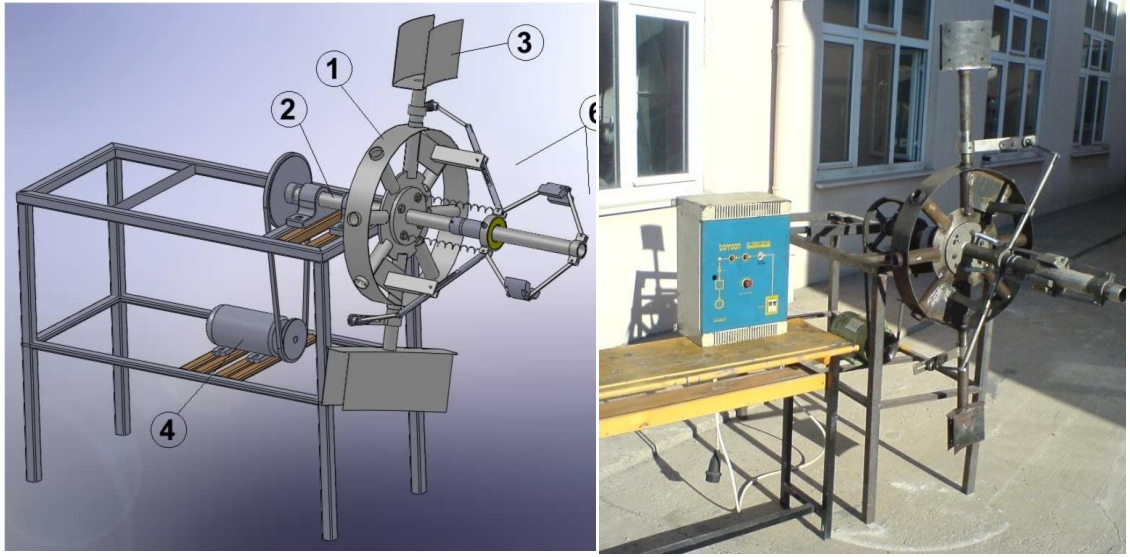
- Deniz seviyesinde  $15^\circ C$  standart atmosfer basıncında  $1,225 kg/m^3$  yoğunluktaki kuru havada  $1m^2$  alan için rüzgar gücü (<http://www.windpower.org/en/pictures/brush.htm>, 2005).

Hesaplamalar sonucunda tasarım ve imalat aşamalarında kabul edilen değerler;

- Türbin tipi : Yatay eksenli RT
- Kanat sayısı : 2
- Rotor çapı : 4,5 m
- Türbin çarkı çevresel hızı : 6000 m/dak
- Rotor çevresi : 14,13 m
- Rotor devri (max.) : 600 d/dk
- Süpürme alanı :  $15,89 m^2$
- Rotorda oluşan güç ( $cm^2$ ) :  $1126,91 W/cm^2$
- Rotor mil çapı : 50 mm

### 3.2. İMALATI YAPILAN DENEY SİSTEMİNİN TANITILMASI

Bu bölümde, rüzgar türbininin devrini kontrol edebilmek amacıyla geliştirilen deneysel ve teorik modeller tanıtılacaktır. Bu çalışmada kullanılan rüzgar türbini; yatay eksenli, yüksek hızlarda çalışan 2 kanatlı rüzgar türbinidir. Deney sistemi 6 ana unsurdan meydana gelmektedir (Şekil 4.2). Bunlar; (1) Rotor, (2) Rotor mili, (3) Kanat tutucu, (4) D.C. Motor, (5) Güç ünitesi, (6) Kanat kontrol mekanizması.



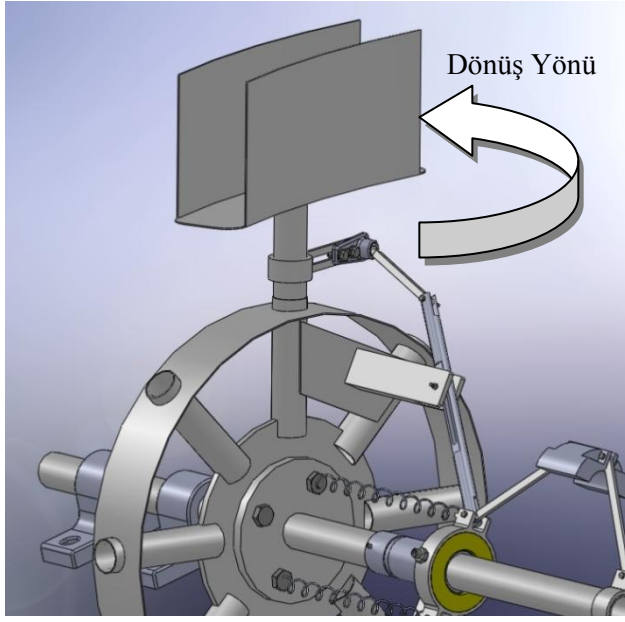
Şekil 3.2. İmal edilmiş sistem ve montaj resmi.

#### 3.2.1. Rotor (Gövde)

Hesaplamalar çerçevesinde rotor çapı 4,5 m olarak imal edilmiştir. İmal edilen rotorun malzemesi ise; sacdan oluşan kısım Fe 37, ortada bulunan disk ise (tüm yük üzerine geldiğinden) dayanımı daha fazla olan Fe 45'den imal edilmiştir. 8 kanat montaj edilebilecek şekilde imal edilen rotor, (hesaplamalar sonucunda) verim ve hızın yüksek olduğu göze alınarak 2 kanat takılarak deneye tabi tutulmuştur.

Rotor üzerinde bulunan kanat yuvaları 45 mm'dir. Her bir yuvaya vida dişi açılmıştır. Hassas olarak imal edilen vida dişleri sayesinde kanatlar kolaylıkla dikey konumda hareket yapabilmektedir (Şekil 3.3).

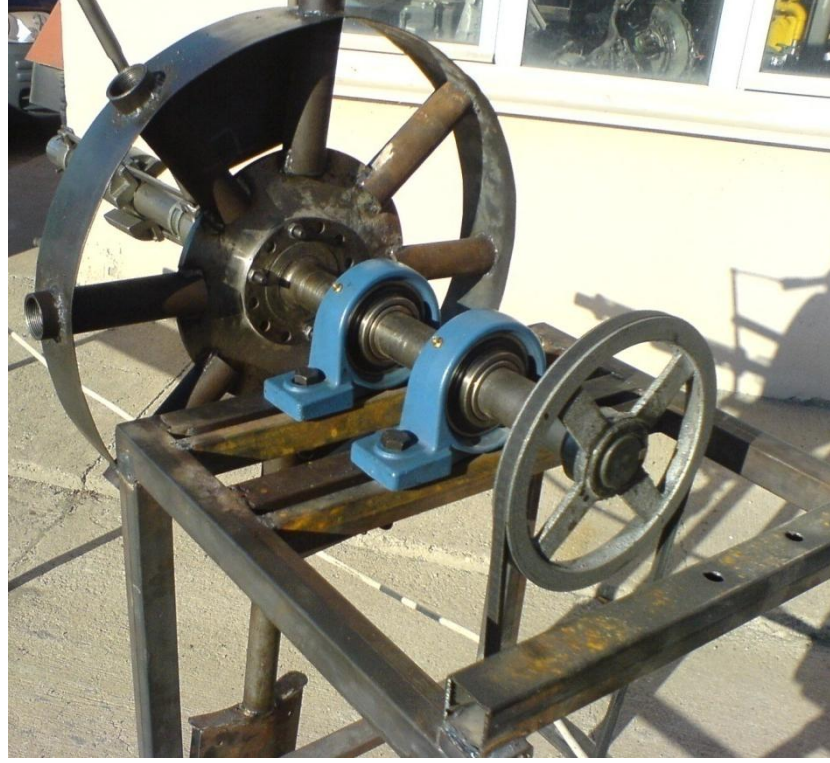




Şekil 3.3. Hareketli kanat sistemi.

### 3.2.2. Rotor Mili

50 x 500 mm boyutlarında olan rotor mili Fe 45 malzemesinden imal edilmiştir. Disk çapı 140 x 10 mm olan kısımdan 4 x M 14 civatayla gövdeye (rotor) monte edilmiştir. Rotor milini ana gövdeye (deney tezgahına) bağlamak amacıyla 2 adet ORS – UC – 16010 serili Sabit bilyalı rulmanlı yatak kullanılmıştır. Ayrıca rotor milinin uç kısmına Ø175 mm boyutlarında kasnak konularak Fanbelt – 12,5 x 1650 mm kayış ile D.C. motorla bağlantısı sağlanmıştır (Şekil 3.4).



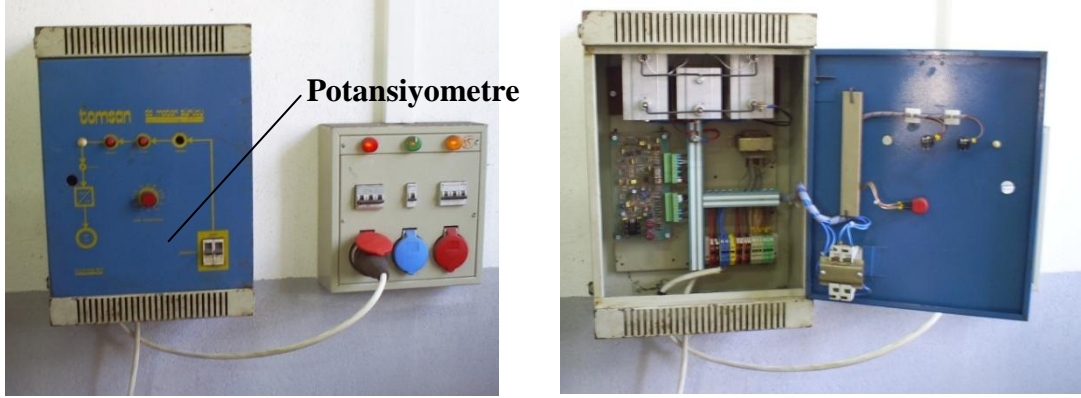
Şekil 3.4. Rotor milinin deney tezgahına bağlanması.

### 3.2.3. D.C. Motor

Kemsan – 200/4 – 2000 RPM seri nolu motor 2000 d/dk kadar çıkmaktadır. Ancak hali hazırda çalışan rüzgar türbinleri en fazla 600 d/dk’da çalışabildiklerinden yapılan bu deneyde de 600 d/dk’ya kadar test edilmiştir. 1 HP gücünde olan motor sistemi kolaylıkla istenilen devre getirmiştir.

### 3.2.4. Güç Ünitesi (Motor Kontrol Ünitesi)

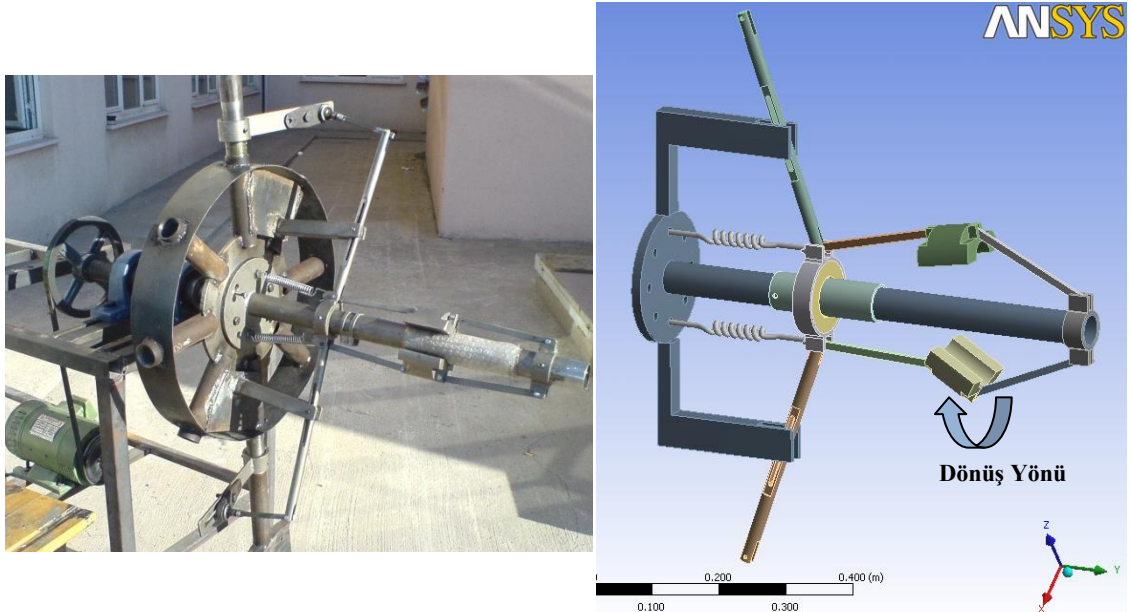
Motor devrini ayarlamak amacıyla kullanılan güç ünitesi şebekeden gelen alternatif akımı doğru akıma çevirir. Güç ünitesinin üstünde yer alan potansiyometre sayesinde motor devri 0 – 600 d/dk arasında kontrolü sağlanmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Güç ünitesi (Motor kontrol ünitesi).

### 3.2.5. Kanat Kontrol Mekanizması

Kanat açılarını ayarlamak amacıyla tasarlanmış olan kanat kontrol mekanizması (KKM) kanatların rüzgara karşı yapmış olduğu açığı  $60^\circ$ 'ye kadar çıkarabilmektedir. Kanatların rüzgarla yaptığı açı normal konumda  $15^\circ$ 'dir. Sistem devri arttıkça KKM'da bulunan hareket mekanizması, merkezkaçtan dolayı kütlelerin savrulmasıyla kanat açılarını değiştirmektedir. Sistemin yavaşlaması halinde de çekme yayları sayesinde rüzgar türbini eski konumuna tekrar gelmektedir (Şekil 3.6).

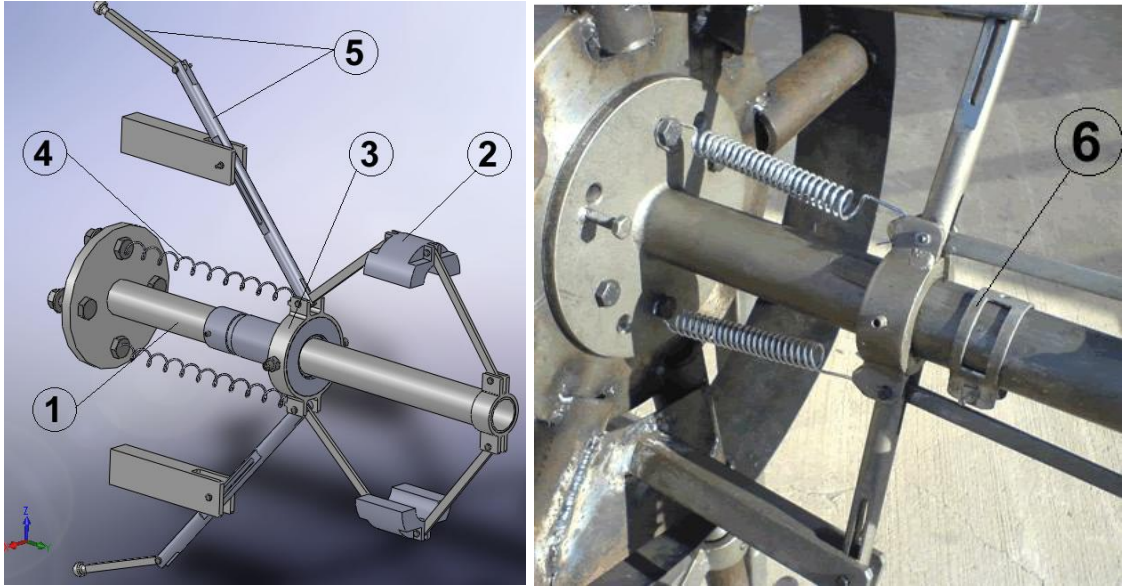


Şekil 3.6. Kanat kontrol mekanizması ve sistemin hareketli haldeki simülasyon modeli.

KKM'nın tasarlanış amacı (yapılan tezin de amacıyla paralel olarak) iki ayrı grupta incelenebilir:

1. Rüzgar türbininin devrini sabit tutmak,
2. Rüzgar Türbini istenilen bir devre geldiğinde, (emniyet amaçlı) sistemin yavaşlamasını sağlamak. Bu iki kısım ileride detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

KKM, 6 ana unsurdan meydana gelmektedir. Şekil 3.7'de montaj resmi verilen KKM'da (1) Mil, (2) Ağırlık kütleleri, (3) Kilitleme mekanizması, (4) Yaylar, (5) İletim kolları, (6) Ayar bileziği.



Şekil 3.7. Kanat kontrol mekanizması montaj resmi.

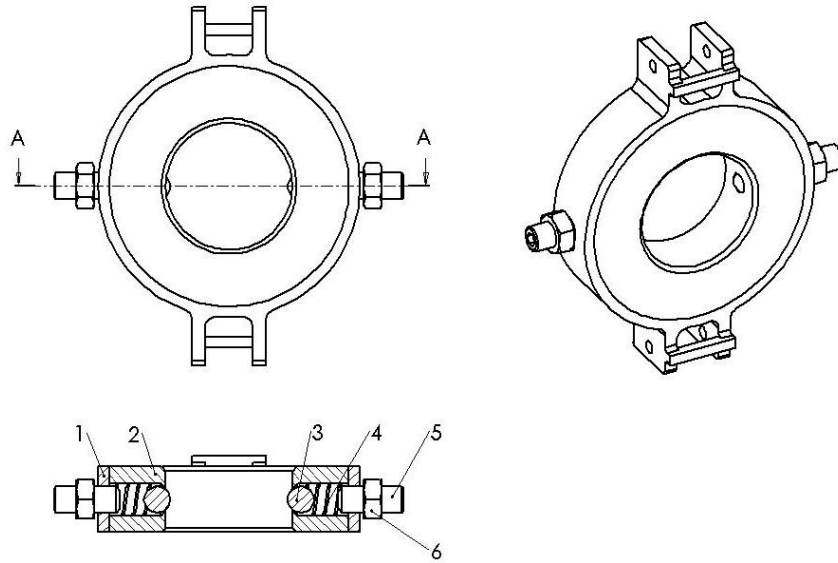
Sistem rüzgar türbininin devrine göre hareket etmektedir. Devrin artmasıyla KKM üzerinde bulunan kütleler vasıtasıyla merkezkaçtan dolayı ayar mekanizmasını zorlamaktadır. Ayar mekanizmasında bulunan ayar vidası sayesinde mekanizmada bulunan bilyenin yuvadan çıkışı zorlanarak daha yüksek devirde devreye geçmesi sağlanabilir. Şekil 3.8'de ayar mekanizmasının montaj ve perspektif görünüşü verilmiştir.

Başta da bahsedildiği gibi ayar mekanizması iki farklı amaçta kullanılabilir. Rüzgar türbininin devrini sabit tutmak amacıyla kullanıldığı zaman, rüzgar türbini sürekli sabit bir devirde döneceğinden, ayar mekanizmasının emniyet amaçlı kullanılması

söz konusu olmayacaktır. Bu yüzden KKM ya devri sabitlemek amaçlı kullanılacak ya da sadece emniyet açısından belirli bir devre geldiğinde devreye geçmesi amaçlı kullanılacaktır.

Ayar mekanizmasının çalışması şu şekildedir: Şekil 3.8’de numaralandırılmış olan 4 numaralı basma yayı 3 numaralı bilyeye kuvvet uygulamaktadır. 3 numaralı bilye ise KKM mili üzerinde bulunan kanalda takılı olarak kalmaktadır. 5 numaralı ayar vidasıyla basma yayı gerilimi artırılıp azaltılabilir. Bu sayede 3 numaralı bilye yuvadan çıkması ve ayar mekanizmasının devreye geçmesi daha geç veya daha erken olmaktadır.

Ayar mekanizmasının devreye geçmesi ise: Sistem çalışmaya başlayıp ayar mekanizmasında bulunan basma yayını yenecek devre ulaştığında; Şekil 3.7’de gösterilen 2 numaralı ağırlık kütleleri merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulur ve ayar mekanizmasını harekete geçirmektedir. Daha sonra ileti kolları sayesinde kanat, rüzgar türbininin devir hızına göre açı değiştirmektedir.



Şekil 3.8. Ayar mekanizması montaj ve perspektif resmi.

Ayar mekanizması sadece emniyet amaçlı kullanılmak istenildiğinde de baskı yayı üzerinde bulunan ayar vidası sıkılarak yayın gerilimi artırılır. Ve dolayısıyla sistem yüksek devre geldiğinde devreye geçmektedir.

KKM’da kullanılan çekme yayları sistemin çalışmasında doğrudan etki yaptığından 8

farklı çekme yayı deneye tabi tutularak en uygun yay tespit edilmiştir (Şekil 3.9). Yay çekme katsayıları 2 N/mm ile 10 N/mm arasında seçilmiştir. Yay katsayıları ve özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.9. KKM’da deneye tabi tutulan çekme yayları.

Şekil 3.9’da 4 tanesi gösterilen yaylardan gösterilmeyen kısmı, aynı yayların kullanılarak KKM’na karşılıklı 2x2 ve 3x2 şeklinde bağlanmasıyla deneye tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan yayların özellikleri.

	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5	Deney 6	Deney 7	Deney 8
<b>d (mm)</b>	2	2	2	2	2	2	2	3,5
<b>D<sub>h</sub> (mm)</b>	13	13	13	13	13	15	13	19
<b>D<sub>m</sub> (mm)</b>	11	11	11	11	11	13	11	15,5
<b>L<sub>0</sub> (mm)</b>	80	35	35	80	80	35	80	75
<b>c : Yay sabitesi (N/mm)</b>	2,86	3,29	4,58	5,99	6,18	6,23	8,34	9,38

Şekil 3.7’de gösterilen ayar bileziği kanat açılarının belirli bir devirden sonra değişmemesi istenildiğinde kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada ayar bileziği kanat açılarının ne kadar değiştiğini ölçmek için kullanılmıştır. Kanat açılarının ölçümü Bölüm 4.3’de açıklanmıştır.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 4.1. DENEYSEL ÇALIŞMANIN AMACI

Rüzgar türbinlerinin en büyük dezavantajı, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, sürekli değişken olan rüzgar hızının yük tarafında gerilim ve güç (frekans) dalgalanmalarına neden olmasıdır.

Yapılan bu çalışmada bu sorunları çözmek doğrultusunda, halihazırda en sık kullanılan şebeke bağlantısız, yatay eksenli, pervane tipi, önden rüzgarlı rüzgar türbinlerinin iki temel noktasının geliştirilmesi amaç edinilmiştir;

- Rüzgar hızı ne olursa olsun rüzgar türbiniyle üretilen elektrik frekansının sürekli sabit olmasını sağlamak. Bu sayede üretilen enerji de herhangi bir güç ünitesine girmeden kullanılabilir olacaktır.
- Şiddetli rüzgar karşısında sistemin mekanik olarak kendini yavaşlatmasını sağlamak.

Bilindiği üzere rüzgar türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin frekans dalgalanmasını düzenlemek amacıyla çeşitli elektronik cihazlar kullanılmaktadır (Sinüs dalga invertörleri, Güç kontrol üniteleri vb.). Şebeke bağlantılı olan ve yüksek elektrik üretilen sistemlerde bu cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat şebeke bağlantılı olmayan RT için kullanılan bu cihazlar türbin maliyetini oldukça arttırmaktadır. Maliyetin azaltılması yönünden en ideal çözüm sorunun mekanik olarak çözülmesidir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada rotor devrinin sabit tutulmasını sağlayacak bir sistem geliştirilmiş olup, imal edilen sistem deneysel olarak incelenmiştir.



## 4.2. DENEYSSEL ÇALIŞMADA İZLENEN YÖNTEM

Yapılan çalışmadaki hedefleri gerçekleştirme doğrultusunda; iki kanatlı, önden rüzgarlı, yatay eksenli rüzgar türbini imal edilmiştir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerine uygun bir şekilde Kanat Kontrol Mekanizması (KKM) tasarlanmıştır. KKM Bölüm 3.2.5’de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Bilindiği gibi rüzgar türbinleri rüzgarın kinetik enerjisinden yararlanarak hareket eden sistemlerdir. Yapılan bu çalışmada ise sistem rüzgara tabi tutulmayarak rüzgar yerine Potansiyometre’li (devri ayarlanabilen) D.C. motor kullanılmıştır. Bunun iki sebebi bulunmaktadır;

- Tasarlanmış olan KKM sistemi, tamamen rüzgar türbininin devrini kullanarak harekete geçmektedir.
- Deneysel çalışmada sistem 600 d/dk’ya kadar her 10 d/dk artırılıp durdurularak deneye tabi tutulmuştur. Sistemi bu devre kadar ulaştıracak ve periyodik olarak artıp azalacak uygun rüzgar hızı bulunmadığından rüzgar yerine Potansiyometre’li D.C. motorla deneye tabi tutulmuştur.

Yapılan deneysel çalışmada sistem D.C. motorla her 10 d/dk artırılarak 600 d/dk’ya kadar çıkılmış ve RT’nin her devirdeki kanat açıları bulunmuştur. Teorik olarak ANSYS\Workbench’de aynı şartlar altında sistem analize tabi tutularak grafiklerle hesapların doğrulanması sağlanmıştır. Ve sonuç olarak; yapılan deneysel çalışmada deney ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir uyuma olduğu görülmüştür.

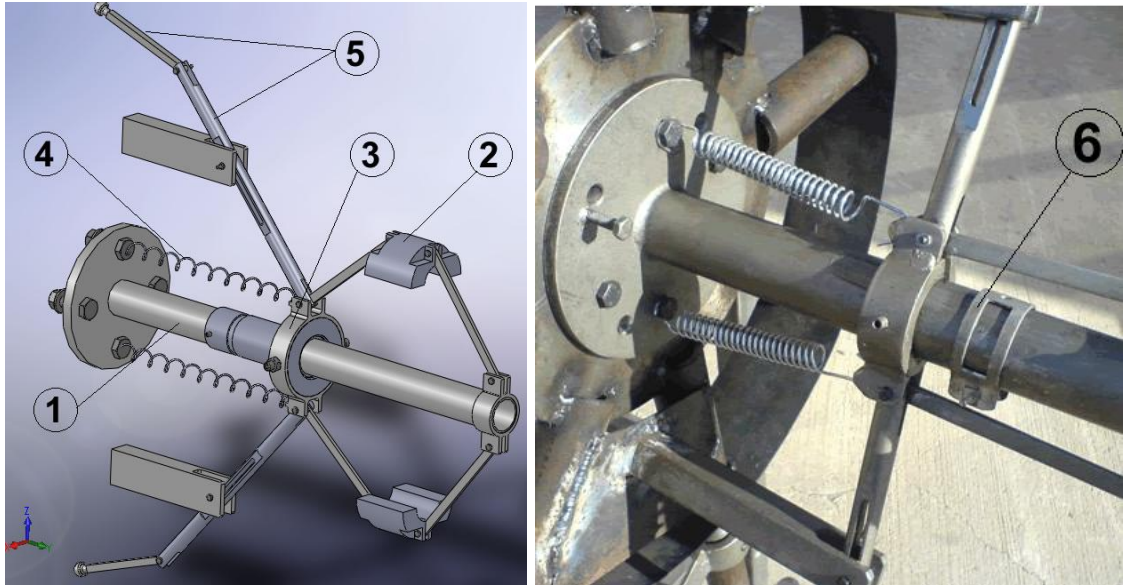
Pratik ve teoriksel karşılaştırma sonucunda tasarlanmış olan rüzgar türbini teorik olarak ANSYS’de KKM’nda bulunan ayar mekanizmasındaki ayar vidasının kurs boyu en üst konumdan en alt konuma kadar sıkılarak statik analizi yapılmıştır ve KKM rüzgar türbin devrini hangi noktalarda sabitlediği bulunmuştur. KKM deneysel çalışmada 8 adet farklı çekme katsayılarına sahip yay kullanıldığından, ANSYS’de de aynı şartlarda yaylar kullanılarak analizi yapılmıştır.

### 4.3. DENEYİN YAPILIŞI

#### 4.3.1. Pratik Deney Aşamaları

Deneyle Karabük Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Otomotiv Anabilim Dalı Atölyesinde yapılmıştır. 600 d/dk'ya kadar çıkan sistemde KKM'da bulunan kütleler ve kanat tutucunun savrulmasından dolayı oluşan titreşimi önlemek amacıyla deney düzeneği sabit bir direğe monte edilmiştir. Deneyde 8 adet farklı çekme katsayılarına sahip yay kullanılmıştır (Çizelge 3.3). Her yayla sistem düzenli olarak 0 d/dk'dan 600 d/dk'ya kadar her 10 d/dk arttırıldıktan sonra sistem durdurulup kanat açısının ne kadar değiştiği ölçülmüştür.

Kanat açılarının değişimi tespit edilirken, Şekil 4.1'de 6 nolu ayar bileziği kullanılmıştır. Ayar bileziği kullanılış amacı bölüm 3.2.5'de anlatılmıştır. Sistem döndürülmeye başlanmadan önce ayar bileziği Şekil 4.1'de 3 nolu kilitleme mekanizmasına yaslatılmıştır. Güç ünitesinde bulunan Potansiyometre ile her 10 d/dk arttırıldıktan sonra sistem durdurulmuş ve kilitleme mekanizması ile ayar bileziği arasındaki mesafe kumpasla hassas bir şekilde ölçülmüştür. Yapılan bu ölçümler sonucunda SolidWorks'da tasarlanan sistemde ölçülen bu değerlere göre kilitleme mekanizması iletilerilerek kanat açısı tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Kanat kontrol mekanizması, ayar bileziği.

### 4.3.2. Teorik Deney Aşamaları

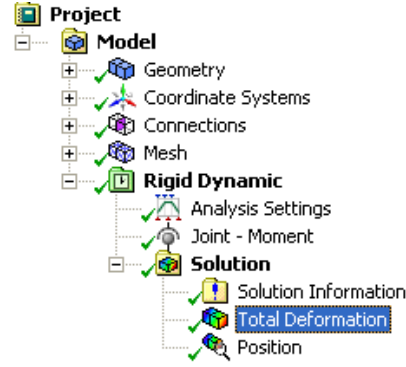
Yapılan çalışmanın teorik tasarım aşamaları SolidWorks'da, modellerin çözümlenmesi ve dinamik simülasyon ise ANSYS/Workbench –Rigid Dynamic ve Static Structural Dynamic modülleri kullanılarak yapılmıştır.

Pratik deneyde elde edilen ölçümler ardından sistem ANSYS'de aynı şartlar altında analize tabi tutulmuş olup çıkan sonuçlar deneysel çalışmada elde edilen verilerle karşılaştırılarak hesap doğrulaması sağlanmıştır. Yapılan analizin aşamaları aşağıda anlatılmıştır. Sonuç olarak; yapılan deneysel çalışmada deney ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir uyuma olduğu görülmüştür.

Yapılan bu simülasyon analizinde tasarlanmış olan KKM'nın sadece hareketi incelendiğinden ANSYS\Workbench modüllerinden olan elastik olmayan cisimler için kullanılan katı analiz (*Rigid Analysis*) modülü kullanılmıştır. Kullanılan bu modül sayesinde sistemde bulunan tüm hareketli aksamlar incelenmiştir.

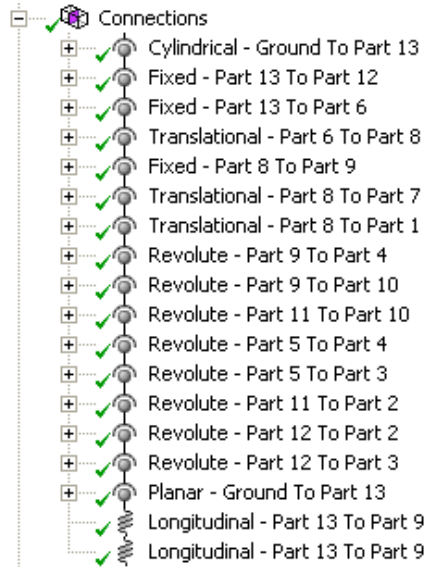
ANSYS'de analiz yapılmadan önce dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de oluşturulan modelin kompleksliğinin azaltılma noktasıdır. Yani modelde bazı tanımlamalar yapılarak (simetrik durumlarda veya modelde göz ardı edilen noktaları çıkarmak vb.) istenilen sonuca daha yakın hesaplamalara ulaşılabilmektedir. Bu nedenle SolidWorks'da tasarlanan sistemde yalnız KKM inceleneceğinden, analiz süresini kısaltmak amacıyla, sadece KKM'nı oluşturan aksamlar deneye tabi tutulmuştur.

ANSYS\Workbench analiz aşamaları şekil 4.2'de gösterildiği gibidir. Şekilde görüldüğü gibi analiz aşamalarında öncelikle sistemde bulunan parçaların malzeme tanımlamaları yapılmaktadır. ANSYS/Workbench programında belirlenmesi gereken en önemli özellik kullanılan malzeme ve takımların malzeme özelliklerini belirlemektir. Oluşturulan modelin çözümlenmesinde de en büyük rolü malzeme özellikleri belirlemektedir. Yalnız bu aşamada yapılan analiz “Rigid Dynamic Analysis” olduğundan parçaların malzeme özellikleri göz ardı edilmektedir. Yani ANSYS, yapılan bu analizde sistemin hareket edilebilirliğinin testini yapmaktadır. Bu nedenle malzeme özellikleri “*Stiffness Behavior*” bölümünden “*Rigid*” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.2. ANSYS\Workbench analiz aşamaları.

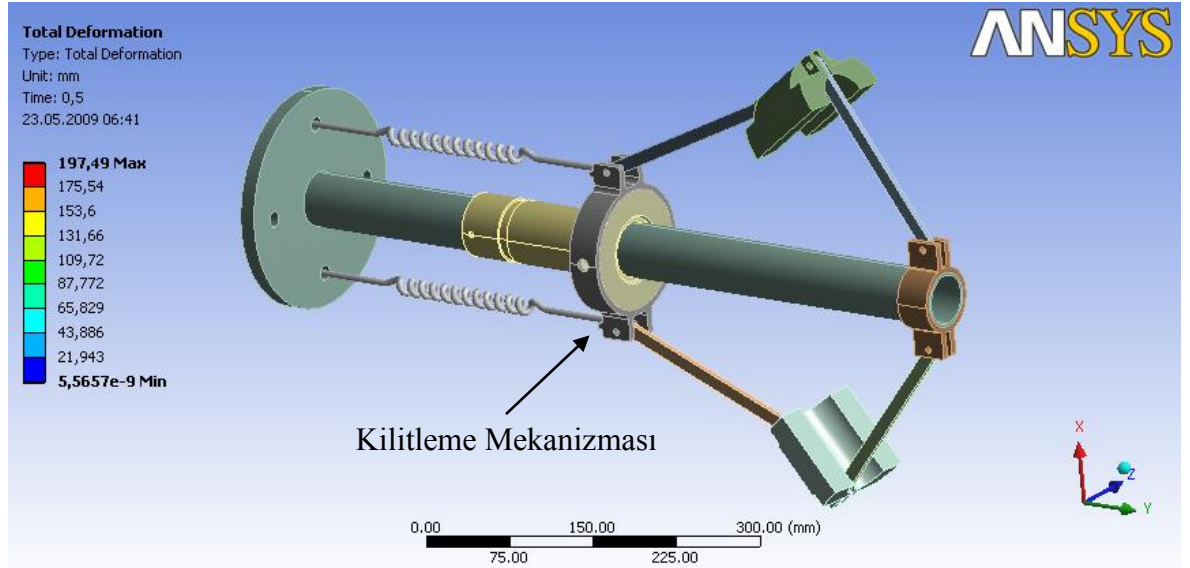
İkinci olarak “Connections” bölümünde KKM üzerinde bulunan her türlü sürtünmeler, temaslar ve bağlantılar tanımlanmıştır. Şekil 4.3’te görüldüğü gibi, yapılan analiz Rigid olduğundan “Contact” tanımlaması yapılmadan sadece modelde bulunan parçalar arasındaki bağlantılar (*Types of Joints*) tanımlanmıştır.



Şekil 4.3. ANSYS\Workbench kontak ve bağlantılar.

Şekil 4.3’te “Longitudinal” diye ifade edilen çekme yayları ANSYS’de tanımlanmıştır. Yay tanımlaması yapılırken “Longitudinal Stiffness veya Longitudinal Damping” yay katsayı değerlerinden herhangi birisini girmek yeterlidir. Deneyde kullanılan yayların yay sabiteleri (c) bilindiğinden “Longitudinal Stiffness” değerleri girilmiştir. Gerekli kontak ve bağlantı işlemleri arkasından son olarak “Mesh” yapılarak modele yapılan tanımlamalar giydirilmiştir.

Yapılan gerekli tanımlamalar ardından “Joint Condition” bölümünden sistemi 600d/dk çıkarabilecek kuvvetle ( $1000 \text{ N m} = 101,972 \text{ kgf m}$ ) döndürme momenti uygulanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. ANSYS\Workbench kontak ve bağlantılar.

Simülasyon analizinin ardından pratik deneyde elde edilen verilerle ANSYS\Workbench’de yapılan deney sonuçları karşılaştırılarak hesap doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yani teorik analizle doğruya ne kadar yaklaşıldığı görülmüştür.

Yapılan bu doğrulamalardan sonra tasarlanan KKM üzerinde bulunan kilitleme mekanizması (Şekil 4.4) kullanılan yaya göre hangi noktalarda devreye geçebileceğini bulmak amacıyla yine ANSYS/Workbench’de “*Static Structural Dynamic*” modülü kullanılarak analize tabi tutulmuştur. Yapılan analizden önceki analizden farklı olan noktaları aşağıda anlatılmıştır.

Bir önceki analiz “*Rigid Dynamic*” olduğundan malzeme tanımlaması yapılmamıştı. Şimdi ise kilitleme mekanizması RT’nin hangi devirlerinde aktif olacağını tespit edeceğimizden “*Static Structural Dynamic*” modülü kullanılarak malzeme tanımlaması yapılmıştır.

ANSYS/Workbench’de iki şekilde malzeme tanımlaması yapılmaktadır. Kendi kütüphanesinden malzeme seçimi yapılabildiği gibi yeni bir malzeme tanımlaması da yapılmaktadır. Biz burada standart özelliklere sahip (Fe37, Fe45 vb.) malzemeler

kullandığımızdan malzeme ataması ANSYS'nin kütüphanesinden seçilmiştir. Malzemeler arası sadece elastikiyet katsayısı (Young's Modulus) değiştiğinden bu değişimler de Edit Structural Steel bölümünden modifiye edilmiştir (Şekil 4.5).

Structural Steel		
<b>Structural</b> Add/Remove Properties		
<input type="checkbox"/>	Young's Modulus	2,e+005 MPa
<input type="checkbox"/>	Poisson's Ratio	0,3
<input type="checkbox"/>	Density	7,85e-006 kg/mm
<input type="checkbox"/>	Thermal Expansion	1,2e-005 1/°C
<input type="checkbox"/>	Alternating Stress	
<input type="checkbox"/>	Strain-Life Parameters	
<input type="checkbox"/>	Tensile Yield Strength	250, MPa
<input type="checkbox"/>	Compressive Yield Strength	250, MPa
<input type="checkbox"/>	Tensile Ultimate Strength	460, MPa
<input type="checkbox"/>	Compressive Ultimate Strength	0, MPa
<b>Thermal</b> Add/Remove Properties		
<input type="checkbox"/>	Thermal Conductivity	6,05e-002 W/mm·°C
<input type="checkbox"/>	Specific Heat	434, J/kg·°C
<b>Electromagnetics</b> Add/Remove Properties		
<input type="checkbox"/>	Relative Permeability	10000
<input type="checkbox"/>	Resistivity	1,7e-004 Ohm·mm

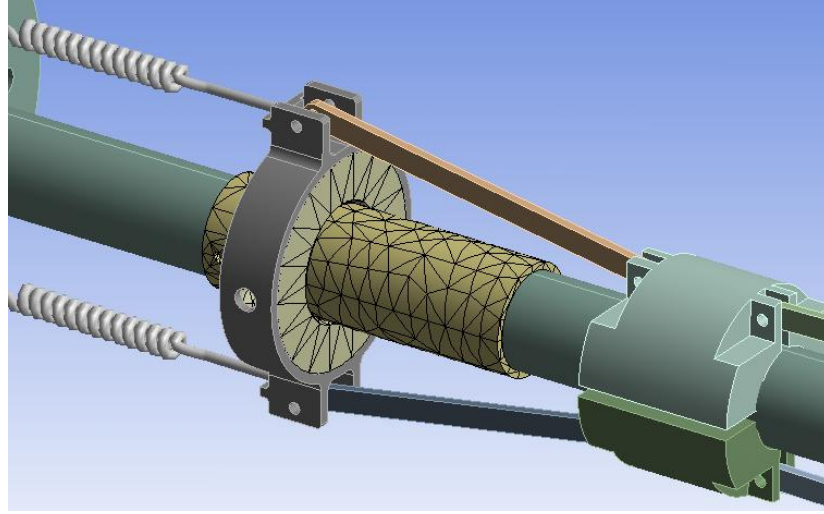
Şekil 4.5. ANSYS\Workbench'de malzeme özelliklerinin tanımlanması.

Daha önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi sistemde bulunan kilitleme mekanizması üç ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar; 1.Kilitleme yuvası, 2.Hareketli yatak ve 3.Yaylı bilye. Sistemi devreye geçiren ve KKM'nın aktif hale gelmesini sağlayan ana kısımlar bunlardır. Yani RT'nin belirli bir devre gelmesiyle kilitleme mekanizmasının içerisinde bulunan yaylı bilyenin kilitleme yuvasından kurtulması sonucu KKM aktif hale gelmektedir. Bu nedenle istenilen sonuca daha yakın veriler elde edebilmek için sadece kilitleme mekanizmasını oluşturan parçalar incelenmiştir. Sistemi oluşturan diğer parçalar ise rigid hale getirilmiştir.

Malzeme tanımlaması ardından bir önceki analizden farklı olarak gerekli kontaklar tanımlanmıştır. Kontak parçalar; 1) Bilyelerin hareketli yatağa olan temasları (Bonded olarak tanımlanmıştır), 2) Bilyelerin kilitleme yuvasına olan teması (Frictionless olarak tanımlanmıştır).

Gerekli kontak ve bağlantı işlemleri arkasından son olarak “*Mesh*” yapılarak modele yapılan tanımlamalar giydirilmiştir. Mesh işleminde farklı olarak “Part Relevance”

komutu uygulanmıştır. Yani uygulanan bu komut sayesinde yapılan tanımlamalar sadece seçilen parçalara giydirilmiştir (Şekil 4.6).

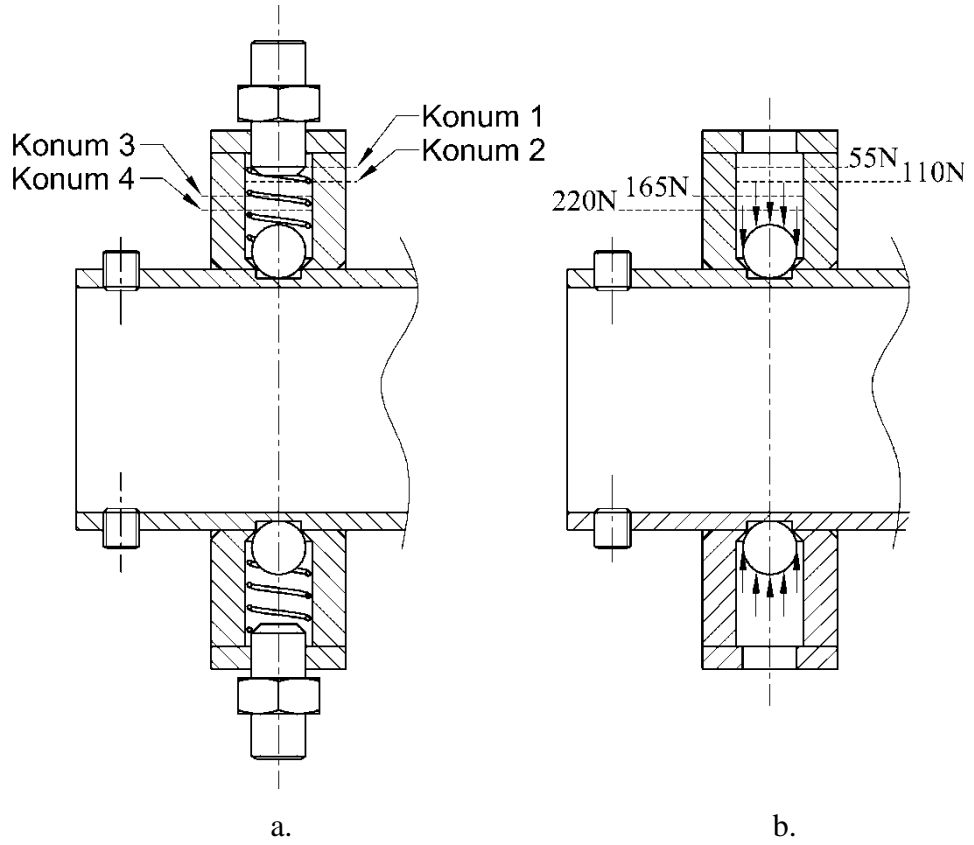


Şekil 4.6. ANSYS\Workbench’de Mesh uygulan parçalar.

Yapılan bu tanımlamalar ardından “*New Analysis*” bölümünden “*Static Structural*” modülü seçilerek kilitleme mekanizmasında bulunan bilyelere “*Force*” yüzeysel kuvvet uygulanmıştır. Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi kilitleme mekanizmasında bulunan baskı yayının bilyeye uygulayacağı max. kuvvet  $220\text{N} = 22,434\text{kgf}$ ’dir. Yapılan statik analizde kilitleme mekanizmasında bulunan ayar vidası 4 farklı konumda incelendi (Şekil 4.7). Yani ayar vidası 4 farklı konumdayken baskı yayının bilyeye uyguladığı kuvvetin, KKM tarafından hangi devirlerde eşitlendiği tespit edilmiştir. Tespit edilen bu noktalar KKM’nin kullanılan çekme yayının yay sabite değerine göre devreye geçtiği noktaları oluşturmaktadır. Elde edilen grafikler bölüm 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kilitleme mekanizması baskı yayı değerleri (<http://www.samed/group.com>, 2009).

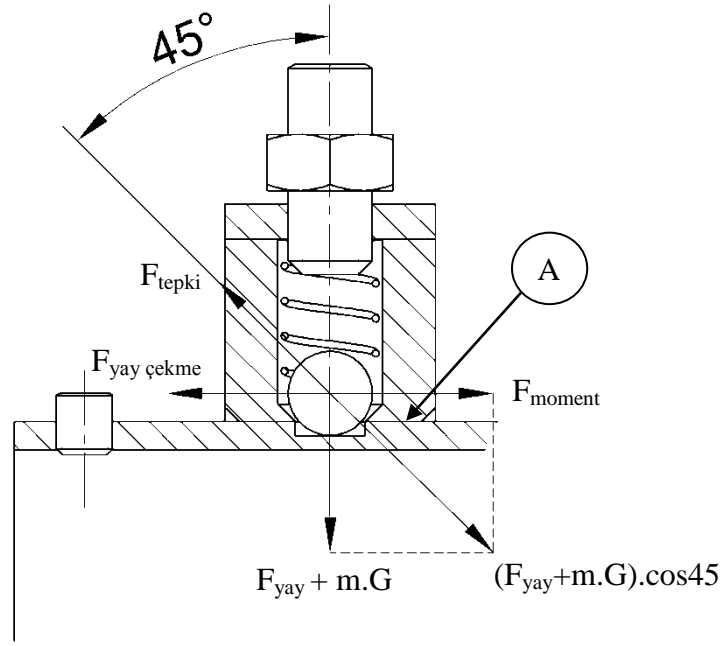
Tel kesiti mm	Dış Çap Ø mm	İç Çap Ø mm	Serbest uzunluk mm	Max. Kapanma Miktarı mm	Yük N/mm
3,2x1,7	16	8	32	12,8	220



Şekil 4.7. a. Kilitleme mekanizması kesit görünüşü. b. Baskı yayının bilyeye dört farklı noktadaki etkileri.

Kilitleme mekanizmasının aktif hale geldiği devirler bulunurken takip edilen yöntem şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Sisteme uygulanan döndürme momenti sayesinde KKM’nda bulunan ağırlık kütleleri merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaktadır. Savrulma sonucunda ağırlık kütleleri kendine bağlı bulunan kilitleme mekanizmasını çekmektedir. Kilitleme mekanizması içerisinde bulunan yaylı bilye KKM’nı belirli bir devre kadar sabit tutmaktadır. Harekete geçtiği an bilye üzerine baskı yapan yay kuvveti, çekme kuvvetinden düşük demektir (Şekil 4.8).





Şekil 4.8. Kilitleme mekanizmasında oluşan kuvvetler.

Şekil 4.8 formülize edilecek olunursa;

$$F_{moment} - F_{yay çekme} > F_{yay} + m.G + (F_{yay} + m.G).cos45 \quad (4.1)$$

ise cisim hareket eder. Buradan;  $F_{tepki}$  kuvvetinin max. değeri bulunarak yaylı bilyenin yuvadan kurtulması sonucuna çıkılır. Diğer bir değişle A noktasının max. gerilim değeri bilyenin yuvadan kurtulma anıdır. Yapılan bu ikinci statik analizde, kilitleme mekanizmasında bulunan ayar vidası farklı konumlardayken mekanizmanın aktif hale gelme noktası bu yöntemle göre bulunmuştur. Kilitleme mekanizmasında bulunan baskı yayı 4 farklı konumdayken A noktasındaki max. gerilmeler tespit edilip, o anlardaki  $F_{moment}$  kuvvetinin durumu incelenerek KKM'nin aktif hale geldiği noktalar bulunmuştur.

Kilitleme mekanizmasındaki baskı yayına etkiyen 4 farklı kuvvetin açısal değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerlerle statik analiz sonucu bilyenin kilitleme yuvasına yaptığı gerilimler karşılaştırılarak KKM'nin aktif hale geldiği noktalar tespit edilmiştir.

Sistemin analizi ANSYS'de tanımlanırken "Analysis Settings" bölümünden (0,25 –

0,5 – 0,75 – 1) saniye olmak üzere 4 farklı zamanlama tanımlanmıştır. Tanımlanan bu zamanlamalar sisteme uygulanan kuvvetlerin (force) “*Tabular Data*” kısmına yansımaktadır. Buradan istenilen zamanda kuvvetler girilmektedir. Çözümlemenin arkasından sisteme uygulanan kuvvetleri “*New Chart and Table*” bölümünden görmek mümkündür. Elde edilen grafikler bölüm 4.4’te verilmiştir.

Grafikler oluşturulurken rüzgar hızları türbinin kalkış hızından başlayacak şekilde 2–23m/s arasındaki değerler alınarak yapılmıştır. Sağ dikey eksen türbin devri olan 0 d/dk’dan 600 d/dk’ya kadar 50 d/dk aralığında oluşturulmuştur. Sol dikey eksen ise KKM’nin açı değerlerini göstermektedir. Sistemin kapalı durumdaki açısı 15°’dir. KKM’nin kapalı konumdaki açısı grafiklere yansıtılmıştır. Bu nedenle her grafikteki ilk açı değeri 15°’den büyüktür. Yapılan deneylerde en fazla 55° kadar kanat açıları değişmiştir. Bu nedenle grafiklerde bulunan dikey eksen yapılan deneylerde bulunan verilere göre değişmektedir.

Hesaplama sonucu elde edilen grafiklerde görüldüğü gibi; türbini döndüren her devrin rüzgar hızı olarak belirli bir karşılığı bulunmaktadır. Devirlerin karşılık değerleri şu şekilde hesaplanmıştır;

$$\lambda = \frac{V_{\zeta}}{V} \quad (4.5)$$

Verilen bu formülde,

$\lambda$  : Hız katsayısı (çevrim oranı)

$V_{\zeta}$  : Türbin çarkının çevresel hızı (m/s)

$V$  : Rüzgar hızı (m/s)

$\lambda$  değeri çizelge 3.2’den, kanat sayısı 2-3 olan rüzgar türbin tipi olan 5 değeri alınmıştır.

$$n_R = \frac{V_{\zeta}}{L_{\zeta}} \quad (4.6)$$

Burada;  $n_R$  : Rotor devri (d/dk)

$$L_{\zeta} = \pi \cdot D \quad (4.7)$$

$L_{\zeta}$  : Türbin çarkının çevresi (m)

$D$  : Rüzgar türbini rotor çapı (m)

(4.5), (4.6) ve (4.7) formülleri birleştirilecek olunursa;

$$V = \frac{V_{\zeta}}{\lambda} = \frac{n_R \cdot L_{\zeta}}{\lambda} = \frac{n_R \cdot \pi \cdot D}{\lambda} \quad (4.8)$$

formülü elde edilmektedir. Burada bulunan  $n_R$  (rotor devri) ve  $D$  (rotor çapı) değerleri bilindiğinden türbin devrine göre rüzgar hızı ( $V$ ) elde edilmektedir.

Türbine etkiyen rüzgar gücü ise (4.9) formülünden hesaplanmıştır.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_s V^3 \quad (4.9)$$

$P$  : Rotorda oluşan güç -Rüzgar Gücü- ( $W/m^2$ )

$A_s$  : Rotorun süpürme alanı ( $m^2$ )

$V$  : Rüzgar hızı (m/s)

$\rho$  : Havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )

- NŞA'ya (15 C°) göre standart atmosfer basıncında havanın yoğunluğu 1,204  $kg/m^3$  olarak alınmıştır (<http://www.windpower.org/en/-pictures/brush.htm>, 2005).

Formül (4.8) ve (4.9) formüllerinden elde edilen veriler çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rotor devrine göre Rüzgar hızları.

Rüzgar Hızı m/s	Rüzgar Gücü W/m <sup>2</sup>	Rotor Devri d/dk	Rüzgar Hızı m/s	Rüzgar Gücü W/m <sup>2</sup>	Rotor Devri d/dk	Rüzgar Hızı m/s	Rüzgar Gücü W/m <sup>2</sup>	Rotor Devri d/dk
1	8,1	0-20	11	12377,9	210-230	21	86660,6	420-440
2	65,1	20-40	12	15895,8	230-250	22	99023,2	440-460
3	219,7	40-60	13	20024,2	250-270	23	112509	460-480
4	520,9	60-80	14	24811,8	270-290	24	127166,7	480-500
5	1017,3	80-100	15	30307,4	290-310	25	143045,3	500-520
6	1758	100-120	16	36559,9	310-330	26	169258,9	520-550
7	2791,6	120-140	17	43618,2	330-350	27	188403,1	550-570
8	4167	140-160	18	55823,1	350-380	28	219744,1	570-600
9	6977,9	160-190	19	65109,4	380-400			
10	9421,5	190-210	20	75372,2	400-420			

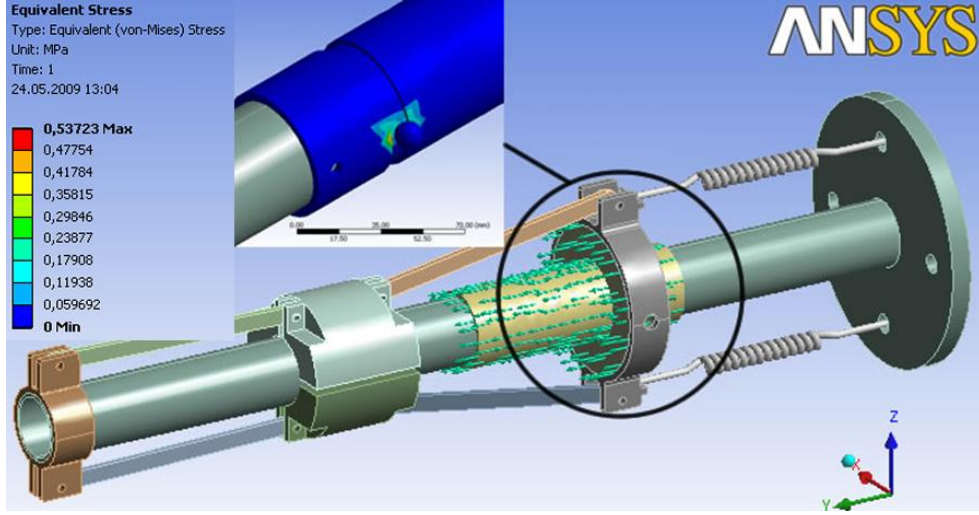
#### 4.4. DENEYSEL BULGULAR

Sistem farklı çekme katsayılarına sahip 8 adet yayla pratikte deney ve teorikte analize tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar ANSYS\Workbench'de yapılan analizle karşılaştırılmıştır. Yay sabitlemeleri (c), 2 N/mm ~ 10 N/mm arasında seçilmiştir. Yayların çekme katsayıları arttıkça KKM'nin rüzgar türbinini sabitleme devri doğru orantılı olarak artmakta olduğu görülmüştür.

Yapılan analiz sonucunda kullanılan her yaydaki devir sabitleme noktaları tespit edilmiştir. Sistem ilk önce 600 d/dk'ya çıkarabilecek 1000 N/m moment kuvvetiyle analize tabi tutularak yapılan analizin gerçekte olan yakınlığı görülmüştür. Ardından statik analizle KKM'nda bulunan ayar mekanizması (Şekil 4.1 – 3 numaralı parça) üzerinde bulunan ayar vidası 4 farklı konumdayken analize tabi tutulmuştur. Yapılan bu analiz sonucunda tasarlanan KKM'nin türbin kanatlarını hangi devirden sonra sabitlediği tespit edilmiştir.

Kilitleme mekanizmasında bulunan ayar mekanizmasının 4 farklı konumunda KKM'nin aktif hale gelmesi, (Bölüm 4.3'te anlatıldığı gibi) bilyenin sabitleme yuvasına uygulamış olduğu max. gerilme kuvvetleri tespit edilerek bulunmuştur. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi sisteme döndürme momentiyle birlikte kilitleme

mekanizmasındaki bilyelere de 4 farklı kuvvet uygulanmıştır. Sonuç olarak bilyenin kilitleme yuvasına uygulamış olduğu gerilme kuvvetleri, döndürme momentinin etkisiyle oluşan çekme kuvvetinden büyük olduğu noktalar tespit edilmiştir. Bulunan bu noktalar aynı zamanda kilitleme mekanizmasının devreye geçtiği anı oluşturmaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Analiz sonucu oluşan gerilimler.

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, sistem iki amaçlı kullanılabilir;

- Rüzgar türbin devrini sabit tutmak,
- Şiddetli rüzgar durumunda sistemin ani yavaşlamasını sağlamak.

Yapılan Rigid dinamik simülasyon analizinde, sistemin birinci amaçlı kullanılma sonucu oluşan durumları incelenmiştir. Yani sistemde bulunan kilitleme mekanizması aktif olmadığı durumlarda KKM yay katsayısının özelliğine göre sistemi belirli devir aralıklarında hareket ettirmektedir. Dinamik analizin yapılaş amacı, pratik deneyde elde edilen verilerin teorikte yapılan analizle olan uyumunu görüntülemektir.

Yapılan Statik analizde ise, sistem ikinci amaçlı kullanılma sonucu oluşan durumlarını incelemektedir. Yani sistem hareketinden belirli bir devre gelişinden sonra kilitleme mekanizmasının devreye geçmesiyle RT'nin yavaşlaması durumudur. Yapılan bu iki durum da aynı grafiklerde ifade edilmiştir.

Her grafiğin altında analiz ve deneyler sonucu elde edilen KKM'nın açı değiştirme noktası, hangi rüzgar hızında sistemin devreye girdiğini ve bu noktanın hangi devre tekabül ettiği ifade edilmiştir.

Statik analiz sonucu elde edilen verilerin birimi MPa'dır. Bilindiği gibi  $1\text{MPa} = 1\text{N/mm}^2$  yapmaktadır. Elde edilen grafik verilerindeki birim  $\text{N/mm}^2$ ; yani  $\text{mm}^2$ 'ye uygulanan gerilim kuvveti verilmiştir. Bu değer bilyenin yüzey alanı ile çarpıldığında bilyeye uygulanan kuvvet bulunmaktadır. Yani;

$$\text{Küre yüzey alanı} = 4\pi r^2 \quad (4.2)$$

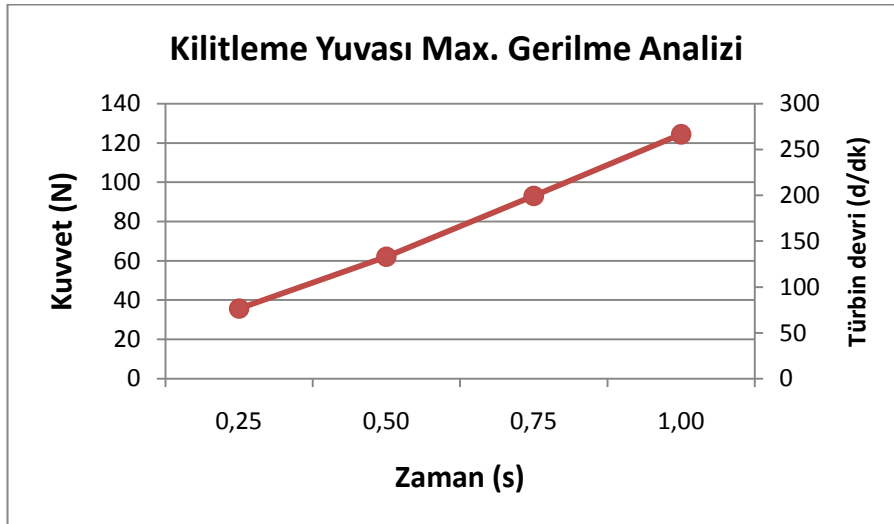
$$\text{Küre yüzey alanı} = 4\pi 6^2 = 452,4 \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

bulunur. Analizlerde elde edilen kuvvetler bilye yüzeyinin yarısına etki yaptığından

$$\frac{\text{Küre yüzey alanı}}{2} = \frac{452,4}{2} = 226,2 \text{ mm}^2 \quad (4.4)$$

bulunur.

Analiz sonucu elde edilen veriler ( $\text{N/mm}^2$ ) bilyenin yüzey alanının yarısıyla çarpıldığında şekil 4.7'de gösterilen A noktasındaki max. gerilimler bulunmuştur (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Yay sabitesi  $c = 2,86 \text{ N/mm}$  olan analiz sonucu gerilimleri.

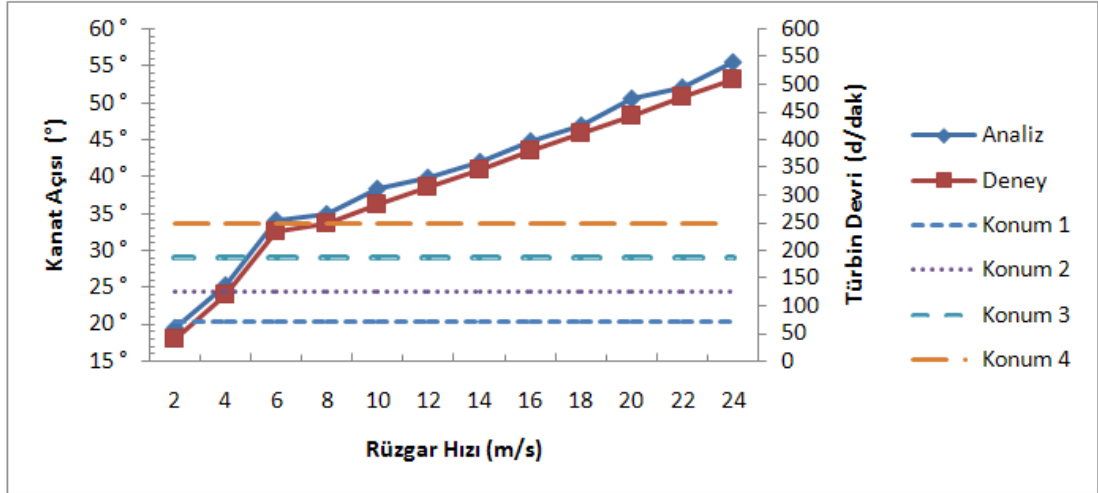
Kilitleme mekanizmasında bulunan ayar vidası (Şekil 4.7-a'da gösterilen) konumlardayken elde edilen grafikte görüldüğü gibi; ayar vidası konum 1 deyken türbin devri 71,42 d/dk'ya geldiğinde kilitleme mekanizması devreye girerek sistem devrini sabitlemektedir. 2 nolu konumdayken türbin devri 124,11 d/dk, 3 nolu konumda 186,03 d/dk ve 4 nolu konumda ise sistemi 248,86 d/dk'da sabitlemektedir. Yapılan 8 adet deneylerin her birisine yukarıdaki statik analiz uygulanarak elde edilen veriler Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kanat kontrol mekanizmasının aktif olduğu devirler.

	Yay Katsayısı N/mm	KKM'nın Aktif Haldeki Türbin Devirleri (d/dk)			
		<u>Konum 1</u>	<u>Konum 2</u>	<u>Konum 3</u>	<u>Konum 4</u>
Deney 1	2,86	71,42	124,11	186,03	248,86
Deney 2	3,29	89,18	154,85	232,17	309,75
Deney 3	4,58	99,96	173,40	259,24	347,06
Deney 4	5,99	112,34	194,94	292,36	391,44
Deney 5	6,18	115,92	201,29	301,96	404,19
Deney 6	6,23	124,81	216,27	323,12	430,88
Deney 7	8,34	142,64	247,66	371,26	496,14
Deney 8	9,38	170,98	306,3417	438,40	581,25

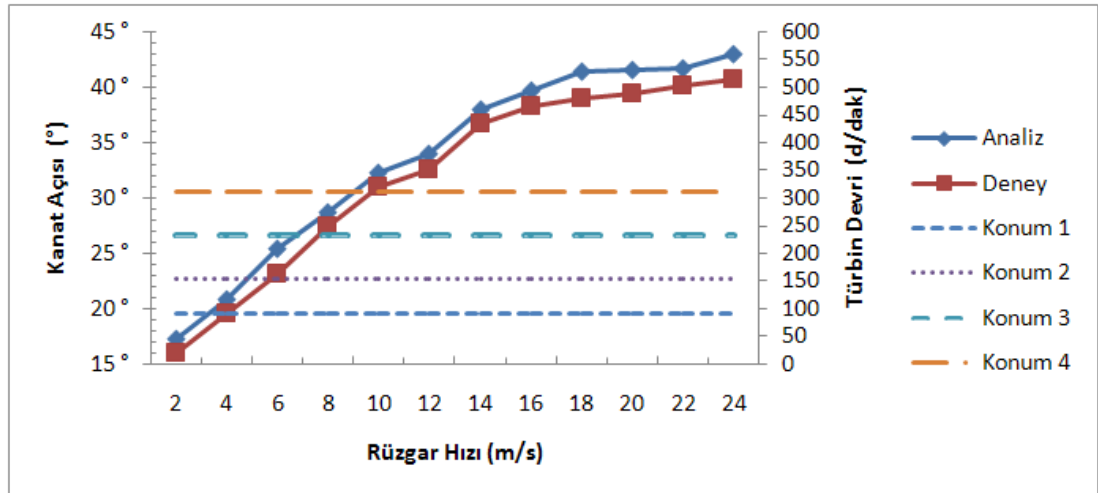
Kilitleme mekanizmasında bulunan ayar vidasının kurs boyu 4 eşit parçaya bölünerek elde edilen yay gerilimleriyle oluşturulan Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi sistemi 71,42 d/dk ile 581,25 d/dk'ya kadar sabitlemektedir. Yay katsayılarının artmasıyla KKM'nın türbin devrini sabitlediği nokta orantılı olarak artmakta olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3 ile dinamik analiz sonucu elde edilen veriler birleştirilerek çıkan sonuçlar aşağıda grafikler halinde sunulmuştur.



Şekil 4.11. Deney 1: Yay sabitleme katsayısı 2,86 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

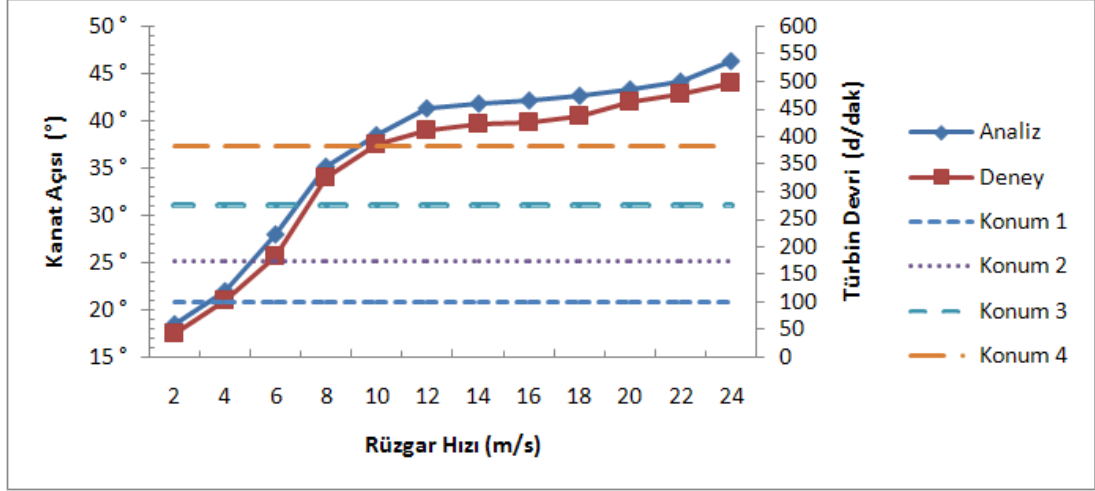
**Deney 1:** Yay sabitesi  $c = 2,86$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 248,86 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 6 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.



Şekil 4.12. Deney 2: Yay sabitleme katsayısı 3,29 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

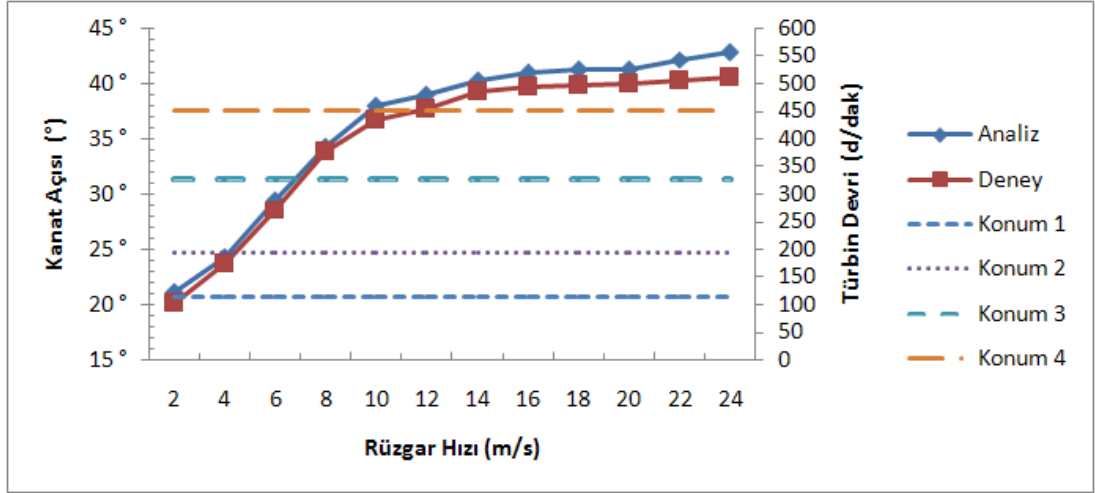


**Deney 2:** Yay sabitesi  $c = 3,29$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 309,75 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 9 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.



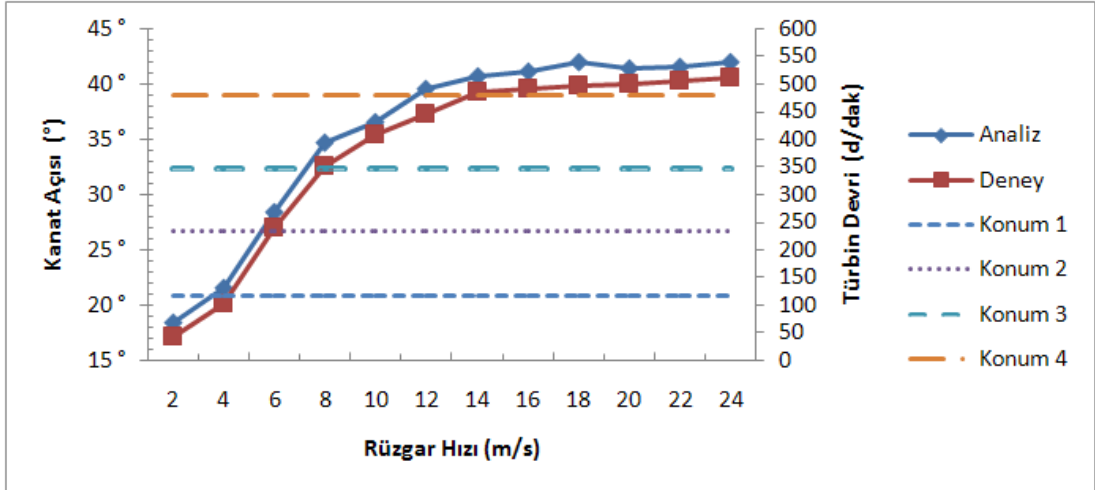
Şekil 4.13. Deney 3: Yay sabitleme katsayısı 4,58 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

**Deney 3:** Yay sabitesi  $c = 4,58$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 382,35 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 10 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.



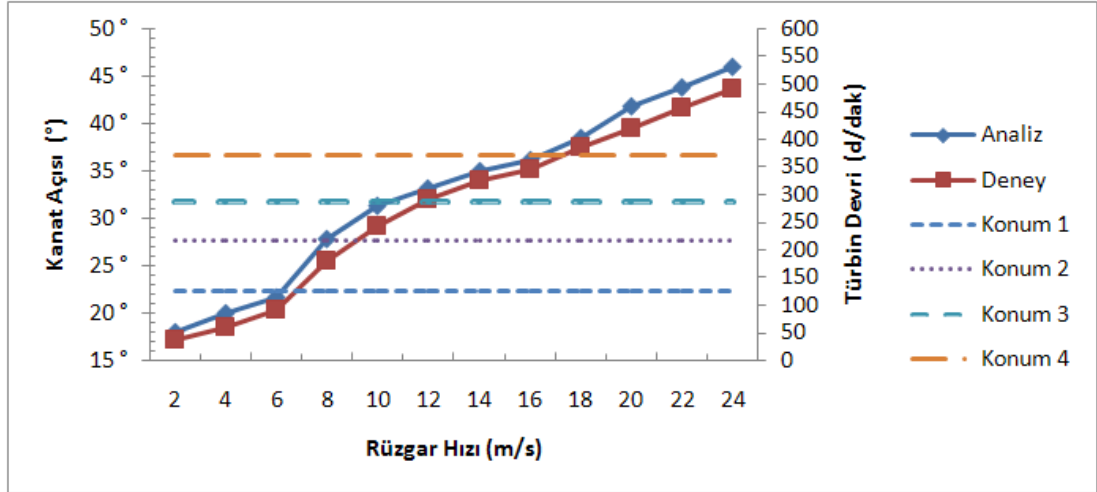
Şekil 4.14. Deney 4: Yay sabitleme katsayısı 5,99 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

**Deney 4:** Yay sabitesi  $c = 5,99$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 452,36 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 12 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.



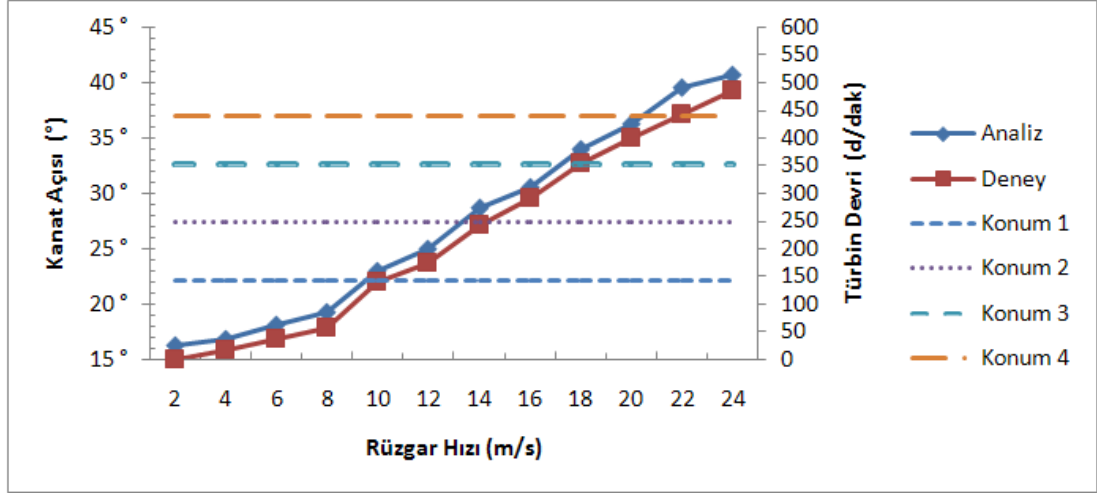
Şekil 4.15. Deney 5: Yay sabitleme katsayısı 6,18 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

**Deney 5:** Yay sabitesi  $c = 6,18$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 478,25 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 14 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.



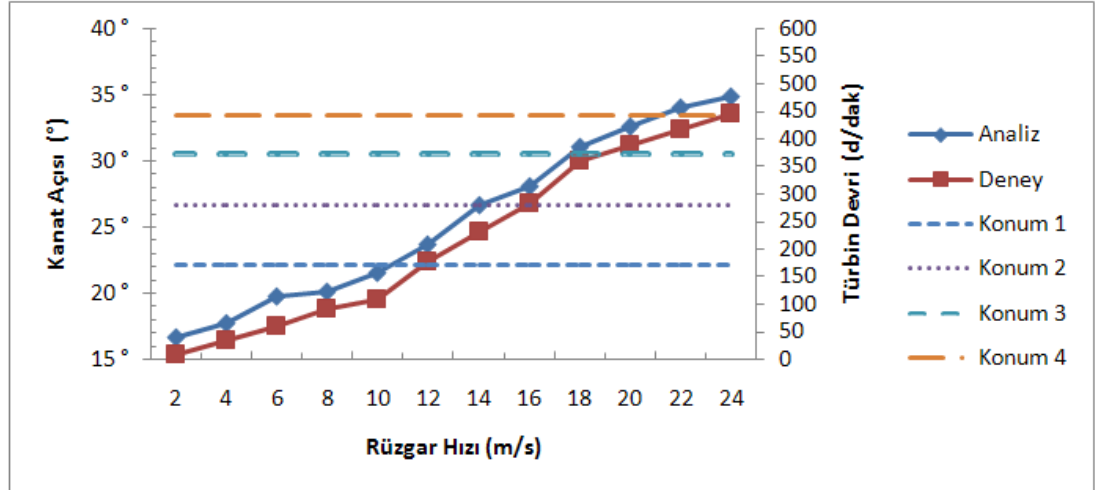
Şekil 4.16. Deney 6: Yay sabitleme katsayısı 6,23 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

**Deney 6:** Yay sabitesi  $c = 6,23$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 371,57 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 17 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.



Şekil 4.17. Deney 7: Yay sabitleme katsayısı 8,34 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

**Deney 7:** Yay sabitesi  $c = 8,34$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 438,56 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 21 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.



Şekil 4.18. Deney 8: Yay sabitleme katsayısı 9,38 N/mm olan RT kanat açıları değişimi ve devir sabitleme noktası.

**Deney 8:** Yay sabitesi  $c = 9,38$  N/mm olan yayla deneye tabi tutulan sistem, 0-600 d/dk'ya kadar dinamik analizi ve deneyi yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Statik analizden de elde edilen veriler grafiğe aktarıldığında sistem max. 442,36 d/dk kadar dönebileceği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'de verilen rotor devrine göre rüzgar hız değerleri de grafiğe aktarıldığında 24 m/s rüzgar hızına tekabül etmektedir.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Pervane tipi, yatay eksenli RT'nin Tasarımı ve imalatı yapılarak teorik ve deneysel karşılaştırmaya tabi tutulan bu çalışmada; deneyde elde edilen verilerden yola çıkılarak modelsel sistemin analizi yapılmıştır. Her iki çalışmada elde edilen veriler karşılaştırılarak RT (kullanılan yay özelliklerine göre) hangi rüzgar hızında ve devrinde sistemi sabitlediği tespit edilmiştir.

Literatür taramasında da gösterildiği gibi, bugüne kadar yapılan çalışmalardaki yaklaşımların çoğunluğu sistem tasarımını değiştirerek verimi arttırmaktır. Diğer taraftan da sistemi ek donanımlarla takviye ederek rüzgar enerjisinin kesintili olduğu durumlarda enerji kesintisinin sürekliliğini azaltma üzerine yapılan çalışmalardır. Rüzgar enerjisinin süreksizliği ve düzensizliği problemine, ilave düzenlemelerle çeşitli çözüm önerileri getirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanı, rüzgar türbinleri ve güneş pillerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemdir. Diğer önerilen sistem ise, rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin akümülatörlerde depolanması şeklindedir. Rüzgar hız değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde, çoğunlukla, son önerilen çözüm daha yaygın kullanılmaktadır. Ancak akümülatörlerle elde edilen enerjinin depolanma işlemi maliyeti oldukça arttırmaktadır.

Yapılan bu çalışmada ise şebeke bağlantısız rüzgar türbinlerinde herhangi bir akümülatör veya güç ünitesi kullanmadan elde edilen elektrik akımının frekans dalgalanması sabit tutularak mekanik bir yöntemle çözülebilirliği gösterilmiştir. Sistem deneysel olarak D.C. motorla deneye tabi tutulup, aynı şartlar altında teoriksel olarak da ANSYS\Workbench'de analizi yapılmıştır. İki deneyde de elde edilen veriler karşılaştırılarak deney ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir uyuma olduğu görülmüştür. Bu veriler referans alınarak; modellenen RT için tasarlanmış olan kanat kontrol mekanizması üzerindeki ayar vidasının kurs boyu 4 eşit parçaya

bölünerek bu noktalardaki devreye geçiş anları tespit edilmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlara göre kullanılan yayın yay sabitesi (c) arttıkça KKM sistemi daha yüksek bir devirde sabitlediği görülmüştür. Ancak yayın katsayısıyla birlikte çap ve uzunluğunun da etkili bir faktör olduğu görülmüştür. Ayrıca KKM üzerinde bulunan kilitleme mekanizması içerisindeki yayın da etkili bir faktörü olduğu saptanmıştır. Kilitleme mekanizması üzerinde bulunan ayar vidası sistemin kullanılış amacına göre konumlanması gerektiği tespit edilmiştir.

Sonuçta genel olarak;

- Herhangi bir akümülatör, invertör vb. bir çevirici veya güç ünitesi kullanılmadan elektrik enerjisinin kullanım imkanı sağlanmıştır.
- Elde edilen elektrik enerjisinin frekans dalgalanması, mekanik bir yöntemle çözülebilirliği gösterilmiştir.
- Normal şartlarda rüzgar türbinleri enerji ihtiyacı olmasa bile sürekli çalışmaktadırlar. Yapılan Kanat Kontrol Mekanizması sayesinde ise elektrik, ihtiyaca göre üretilebilmektedir.
- Şebeke bağlantısız olan sistemlerde üretilen enerjinin direkt olarak kullanılma imkanı sağlanmıştır.
- Rüzgar türbin maliyeti mekanik bir sistemle geliştirildiğinden maliyet azaltılmıştır.
- Rüzgar türbinleri sürekli çalışan sistemler olmasından periyodik olarak bakım ihtiyacı bulunmaktadır. Bununla beraber sürekli en yüksek seviyede çalışması sistem bakımını daha da sıklaştıracaktır. Tasarlanmış olan KKM sayesinde bulunan ortama göre çekme yayı seçimi yapılarak sabit boyutta elektrik elde edilebilecektir ve dolayısıyla daha seyrek bakıma ihtiyaç duyulacaktır.
- Şiddetli rüzgarlar karşısında türbin kanatlarının kırılması ve kanat yuvalarının hasar görmesi sorununa mekanik bir çözüm geliştirilmiştir.
- Bilgisayar ortamında yapılan sistem analiziyle deneyler karşılaştırılarak sonuca daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

İleriye yönelik araştırma için öneriler şu şekilde sıralanabilir;

- Yapılan çalışmada KKM üzerinde bulunan parçalara (mil hariç) herhangi bir

kaplama yapılmamıştır. Bu da pürüzlülüğü ve dolayısıyla rüzgarın çarpmasıyla türbin üzerindeki titreşimleri arttırmaktadır. Bundan sonraki yapılacak olan çalışmalarda kullanılan parçalardaki yüzey pürüzlülük oranları kaplama yapılarak azaltılabilir.

- Tasarlanmış olan KKM yatay konumda çalışmaktadır. Sistemin çalışma prensibine göre bu konum (yer çekim kuvveti sayesinde) sistemi salımın yaptırarak rüzgar türbininin sabitlendiği kuleye etki yapmaktadır. Dikey konumda çalışabilen bir sistemle bu sorun önlenir.
- Sistemde bulunan parçalar –kanat haricinde– metal malzemelerden imal edilmiştir. Bu durum RT'nin ağırlığını arttırmakta ve dolayısıyla RT'nün ilk kalkma hızını ve rüzgar hızını kullanma oranını azaltmaktadır. RT verimini arttırmak amacıyla daha hafif malzemeler kullanılarak bu sorun giderilebilir.
- Tasarlanmış olan KKM emniyet amaçlı kullanıldığında sistemin devreye geçmesi KKM üzerinde bulunan ayar mekanizmasıyla mümkündür. Devreye geçtikten sonra türbinin yavaşlatma devri ise yay katsayısına (c) bağlı bulunmaktadır. Bu nedenle sistemin devreye geçtikten sonra yavaşlatma devrini değiştirmek, kullanılan yayın değişmesiyle mümkün olmaktadır. Bu yaklaşım farklı bir tasarımla çözümlenebilir.
- İmalatı yapılan rüzgar türbininde kanat tutucuları rotora trapez vidalı olarak monte edilmiştir. KKM türbin kanatlarını hareket ettirirken sistem trapez vida sayesinde hareket etmektedir. Bu durumda göz ardı edilebilecek bir sürtünme olsa da, sistem devri arttıkça savrulmadan dolayı vida dişlerinde oluşan sürtünme de artacaktır. Kanat tutucunun rotorla olan birleşimi rulman yataklarıyla veya daha az sürtünmeli çalışabilen bir sistemle çözümlenebilir.



## KAYNAKLAR

Agbossou, K., Chahine, R., Hamelin, J., Laurencelle, F., Anouar, A., St-Arnaud, J.M., Bose, T.K., “Renewable Energy Systems Based On Hydrogen For Remote Applications”, *Journal of Power Sources*, 96 (1): 168-172 (2000).

Akbıyık, B., “Türkiye’deki rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 10-15 (2004).

Ata, R., Çetin N. S., “3 kW Otonom Bir Rüzgar Türbini Kurulumu Ve Enerji Eldesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (1): 41-47 (2008).

Atlıhan, A., B., “Rüzgar Enerjisi Ve Darrieus Rüzgar Çarklarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 4 (2006).

Delfino, B., Fornari, F., “Modeling and Control of an Integrated Fuel Cell-Wind Turbine System”, *IEEE PowerTech Conference*, Bologna, 2-6 (2003).

Bilgili, M., Şahin, B., Kahraman, A., “Wind Energy Potential in Antakya and İskenderun Regions”, *Renewable Energy*, Türkiye, 1733-1745 (2003).

Brune, C. S., Spee, R., Wallece, A. K., “Experimental Evaluation of a Variable-Speed Doubly-Fed Wind-Power Generation System”, *IEEE Trans. On Industry Applications*, 30 (3): 648-655 (1994).

Büyükmert, A., “Rüzgar Türbini Tahrikli Bir Isı Pompasının Kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 12-32 (2006).

Ceylan, Ö., “Aerodynamic Design And Optimization Of Horizontal Axis Wind Turbines By Using Bem Theory And Genetic Algoritm”, *A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University*, Germany, 4: (2008).

Çelik, A.N., “A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey”, *Renewable Energy*, Türkiye, 29: 593–604 (2003).

Çetin N. S., “Küçük Güçlü Bir Rüzgar Türbini Tasarımı ve Elektrik Enerjisi Eldesi”, *VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu*, İzmir, 83-93 (2001).

Çetin, N., S., “Sebeke Bağlantısız Pm Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA (Yapay Silindirik Ağ) İle Sistem Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bornova, İzmir, (2006).

ÇYDD, “Türkiye enerji sektöründe karar verme ve rüzgar enerjisinin entegrasyonu, Kuşaklar boyu temiz güç”, İstanbul, 17: (2003).

Daradeli, S., “Rüzgar Enerjisi”, *Temiz Enerji Vakfı*, Ankara, 5-22 (2001).

Durak, M., Şen, Z., “Wind Power Potential in Turkey and Akhisar Case Study”, Pergamon, *Renewable Energy*, 25: 463-472 (2000).

Muljadi, E., Butterfield, C. P., “Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation”, *IEEE Trans. Industry Applications*, 37 (1): 240-246 (2001).

Abdin, E. S., Xu, W., “Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine – Induction Generator Unit”, *IEEE Trans. Energy Conversion*, 15 (1): 91-96 (2000).

EİM, “Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü”, Türkiye, (1992).

Engin, M., Özdamar, A., Çolak, M., “An Applicatio of a Combined Wind and Solar Energy Sysstem in İzmir”, *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-14 (2004).

Battista, H. D., Mantz, R. J., Garelli, F., “Power Conditioning for a Wind-Hydrogen Energy System”, *J. Power Sources Article in Press*, (2005).

İnternet: “Danish Wind Industry Association”, <http://www.windpower.org/en/-pictures/brush.htm>, (2005).

İnternet: “Illustrated history of wind power development”, <http://www.telosnet.net.com/wind/20th.html>, (2005).

İnternet: “Power-Gen Wind Turbine”, <http://www.powergeneurope.com>, (2009)

İnternet: “TMMOB Çevre Mühendisleri Odası Ağustos”, <http://www.cmo.org.tr/yayin/rapor/rapornukleer.php?altm=nukleer>, (2004).

İnternet: “Türk Sanayicileri ve İş Adamları Derneği” <http://www.tusiad.org/turkish/rapor/enerji/html/sec13.html>, (2005).

İnternet: “Teknik Hırdavat ve Kalıp parlatma, plastik tic. San. Ltd. Şti. [www.samedgroup.com](http://www.samedgroup.com), (2009).

Jung, S., N., Tae-Soo, N., Ki-Wahn, R., “Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system”, *Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University*, Newyork, 561-756 (2004).

Karadeniz, Z., “Rüzgar Enerjisi ve Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanımı”, Bitirme Projesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, İzmir, (2002).

Karlı, V. M., Geçit, C., “An Investigation on Wind Power Potential of Nurdağı – Gaziantep”, Pergamon, *Renewable Energy*, Türkiye, 1013-1027 (2002).

Kaya, D., “Renewable Energy Policies in Turkey”, *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Türkiye, 1-12 (2004).

Kocaman, B., “Elektrik Enerjisi Üretim Santralleri”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 109-110 (2003).

Köse, F., Özgören, M., “Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ölçümü Ve Rüzgar Türbini Seçimi”, *Mühendis ve Makine*, 551 (46): (2005).

Köse, R., Özgür, M. A., Erbaş, O., “The analysis of wind data and wind energy potential in Kutahya, Turkey”, *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Türkiye, 277-288 (2003).

Khan, M. J., Iqbal, M. T., “Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System”, *J. Renewable Energy*, 30 (3): 421-439 (2005).

Muljadi, E., Nix, G., Bialasiewicz, J.T., “Analysis of the dynamics of a wind Turbine water-pumping system ”, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 4: 2506-2519 (2000).

Nayar, C. V., Islam S. M., Sharma, H., “Power Electronics For Renewable Energy Sources”, *Rashid M.H. Asme Press*, USA, 562-563 (2001).

Nurbay, N., Çınar, A., “Rüzgar türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması”, *III. Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, Mersin, 164-167 (2005).

Öger, Ö., G., “Pelton Tipi Rüzgar Türbini Kullanarak Elektrik Enerjisi Üretme”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 30-42 (2006).

Önder, M., “Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2-3 (2006).

Özerdem, B., Türkeli, M., “An Investigation of Wind Characteristics on The Campus of İzmir Institute of Technology”, Pergamon, *Renewable Energy*, Türkiye, 1013-1027 (2002).

Özerdem, B., Türkeli, M., “An Investigation of Wind Characteristics on The Campus of İzmir Institute of Technology”, Pergamon, *Renewable Energy*, Türkiye, 1013-1027, (2002).

Özgener, Ö., “Türkiye’de ve Dünyada rüzgar enerjisi kullanımı”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik dergisi*, 4 (3): 159-173 (2002).

Öztopal, A., Şahin, A. D., Akgün, N., Şen, Z., “On The Regional Wind Energy Potential of Turkey”, Pergamon, *Renewable Energy*, 25: 189-200 (1998).

Öztürk, U. A., Norman, B. A., “Heuristic Methods for Wind Energy Conversion System Positioning”, *Elsevier Electric Power System Research*, Türkiye, 179-185 (2003).

Saha, U., K., Rajkumar, M., J., “On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades”, Department of Mechanical Engineering, *Indian Institute of Technology Guwahati India Received*, Guwahati, 781 839 (2005).

Shepherd, D., “Historical Development of Windmill”, *Wind Turbine Technology Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, Edited by D.A. Spera, Asme New York, 1-46 (1998).

Sürdevil, T., Akpınar, E., “Modelling of a 5-kW Wind Energy Conversion System With Induction Generator and Comparison With Experimental Results”, *Elsevier Renewable Energy*, 30: 913-929 (2004).

Şahin, A. D., “Progress and Recent Trends in Wind Energy”, *Elsevier Progress in Energy and Combustion Science*, 30: 501-543 (2004).

Şen, Ç., “Gökçeada’nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile karşılanması”, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, İzmir, (2003).

Şen, Z., “Temiz Enerji ve Kaynakları”, *Su Vakfı Yayınları*, İstanbul, 110-111 (2002).

The Energy Foundation Annual Report, *The Energy Foundation*, San Francisco, (2001).

Tümerdem, O., “Rüzgar enerjisi teknolojisi ve Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7 (4): 46-52 (2002).

Uyar, M., Gençoğlu, M. T., Yıldırım, S., “Değişken hızlı rüzgar türbinleri için generatör sistemleri”, *III. Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, Mersin, 173-174 (2005).

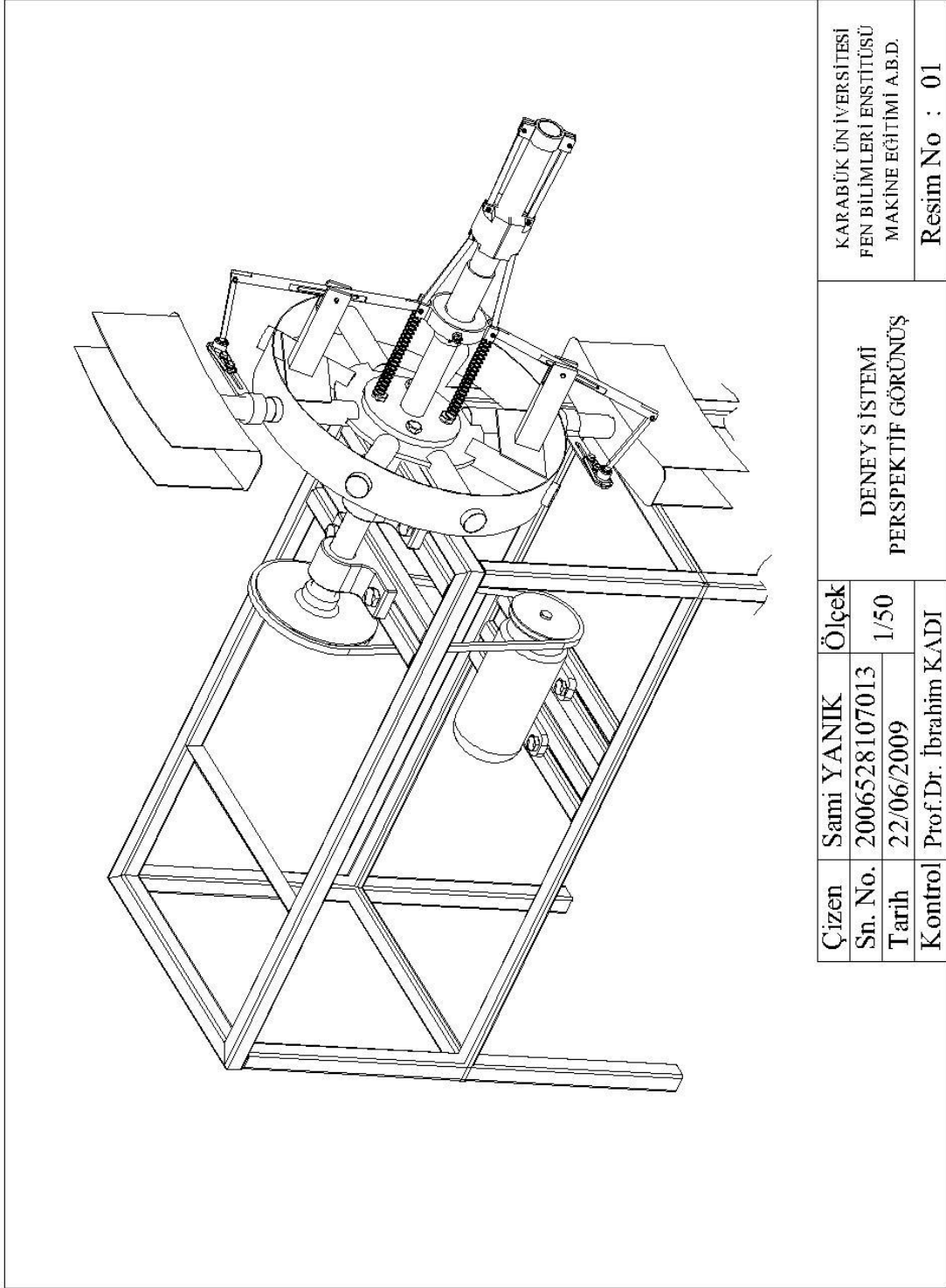
Wanga, F., Baia, L., Fletcherb J., Whitefordc, J., Cullenc, D., “The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop”, *Built Environment, Heriot-Watt University*, Edinburgh, (2007).

Wilson, R. E., “Aerodynamic Behaviour of the Wind turbines”, *Spera D.A. Asme Press*, New York, 223-224 (1998).

## **EKLER**

## **EK AÇIKLAMALAR A**

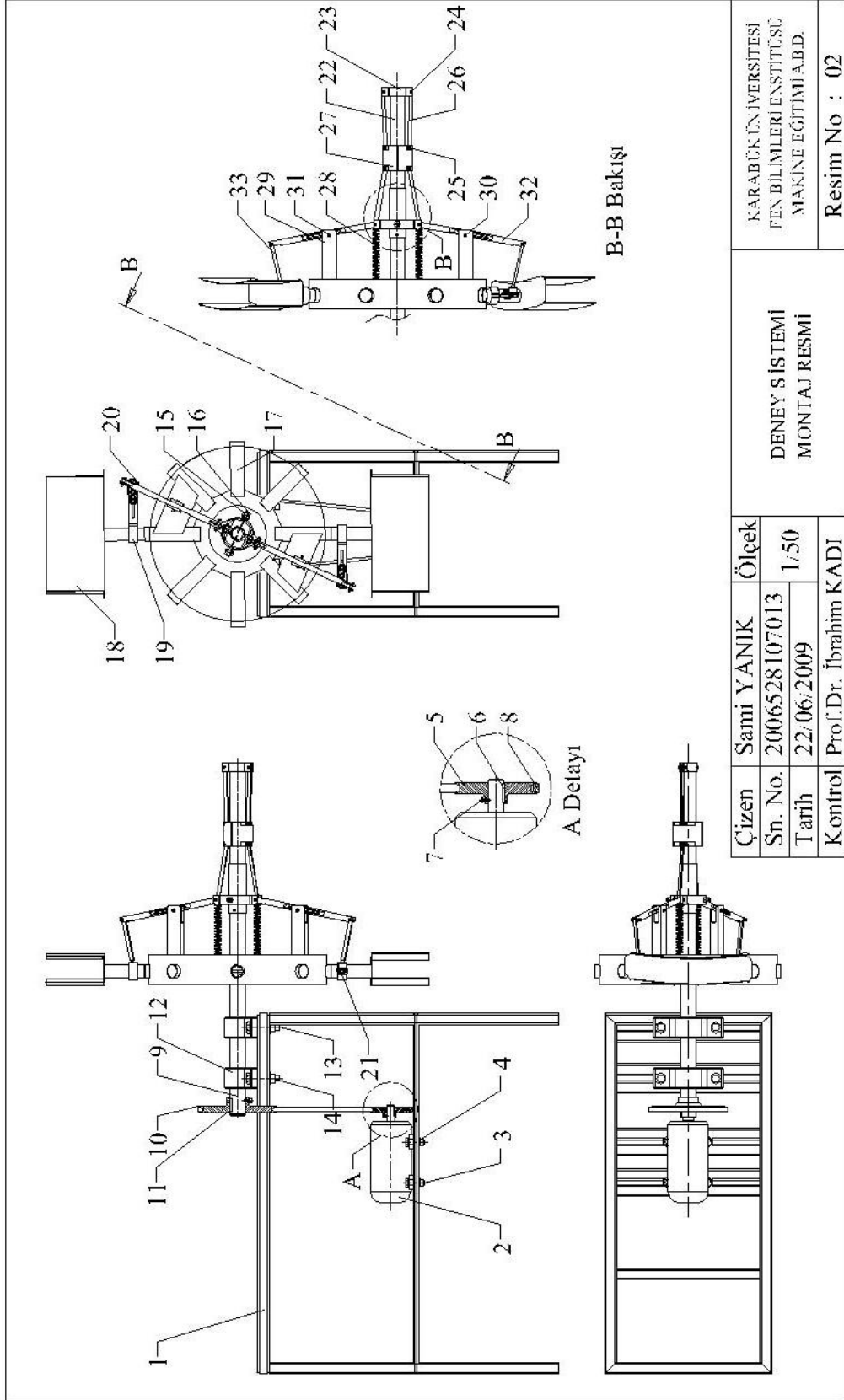
### **DENEYSEL ÇALIŞMANIN MONTAJ VE YAPIM RESİMLERİ**



Çizen	Samî YANIK	Ölçek		KARABÜK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNE EĞİTİMİ A.B.D.	Resim No : 01
Sn. No.	2006528107013	1/50			
Tarih	22/06/2009			DENEY SİSTEMİ PERSPEKTİF GÖRÜNÜŞÜ	
Kontrol	Prof.Dr. İbrahim KADI				

Şekil A.1. Deney sisteminin perspektif görünüşü.





Çizen	Sami YANIK	Ölçek	
Sn. No.	2006528107013	1/50	
Tarih	22/06/2009		
Kontrol	Prof.Dr. İbrahim KADI		

KARABÜKÜN İVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNE EĞİTİMİ A.B.D.	DENEY SİSTEMİ MONTAJ RESMİ	Resim No : 02
--	-------------------------------	---------------

Şekil A.2. Denev sisteminin montaj resmi.

119	Toplam parça sayısı				
2	Altıköşebaşlı civata M12x40	TS 1021/6	41	8.8	HAZIR
2	Setuskur M12x30	TS 1028/5	40	8.6	HAZIR
1	Hareketli Dış Gövde Ø120x30	01-16	39	Fe 37	---
2	Baskı Yayı Ø14x20	Samed (B:104)	38	---	HAZIR
2	Bilya Ø12	TS 206	37	---	HAZIR
1	Hareketli Yatak Ø110x30	01-15	36	Kestamid	---
2	Setuskur M8x10	TS 1028/5	35	8.6	HAZIR
1	Sabitleme mili Ø58x170	01-14	34	Fe 35	---
2	İleti kolu-2 Ø10x110	01-17	33	Fe 35	HAZIR
2	İleti kolu-1 Ø25x345	01-13	32	Fe 37	---
2	Altıköşebaşlı somun M6	TS 1026/17	31	Ç 1050	HAZIR
2	Altıköşebaşlı civata M6x20	TS 1021/6	30	8.8	HAZIR
2	Destek 55x48x125	01-12	29	Fe 37	---
2	Çekme yayı Ø13x116	Samed (Y:26-A)	28	---	HAZIR
2	Ağırlık kütleleri 95x80	01-11	27	Fe 35	---
4	Ara kollar 210x12	01-10	26	Fe 35	---
16	Altıköşebaşlı somun M9	TS 1026/17	25	Ç 1050	HAZIR
16	Altıköşebaşlı civata M9x20	TS 1021/6	24	8.8	HAZIR
1	Sabit bilezik Ø50x45	01-09	23	Fe 35	---
1	Mekanizma mili Ø50x750	01-08	22	Fe 35	---
4	Altıköşebaşlı civata M16x40	TS 1021/6	21	8.8	HAZIR
2	Rutil Ø22x65	Ril 45/7	20	---	HAZIR
2	Yön verici 225x42	01-07	19	Ç 1050	---
2	Kanat tutucu 116x45	01-06	18	Fe 37	---
1	Gövde Ø610x100	01-05	17	Fe 37-2	---
8	Altıköşebaşlı somun M24	TS 1026/17	16	Ç 1050	HAZIR
4	Altıköşebaşlı civata M24x80	TS 1021/6	15	8.8	HAZIR
8	Altıköşebaşlı somun M22	TS 1026/17	14	Ç 1050	HAZIR
4	Altıköşebaşlı civata M22x110	TS 1021/6	13	8.8	HAZIR
2	Sabit bil. rulmanlı yatak UCS-225	ORS-UCS	12	---	HAZIR
1	Eğimli kama A - 8 x 7 x 55	TS 147/2	11	Ç 1050	HAZIR
1	Büyük kasnak (225x68)	01-04	10	DDL-25	---
1	Rotor mili (Ø50x650)	01-03	09	Fe 37	---
1	V Kayış (12,5x1650)	Fanbelt	08	---	HAZIR
1	Altıköşebaşlı civata M8x22	TS 1021/6	07	8.8	HAZIR
1	Eğimli kama A - 7 x 6 x 40	TS 147/1	06	Ç 1050	HAZIR
1	Küçük Kasnak (125x48)	01-02	05	DDL-25	---
4	Altıköşebaşlı somun M14	TS 1026/17	04	Ç 1050	HAZIR
4	Altıköşebaşlı civata M14x70	TS 1021/6	03	8.8	HAZIR
1	D.C. Motor (1 HP - 2000 RPM)	Kemsan	02	---	HAZIR
1	Deney masası (1050x1250)	01-01	01	Fe 37	---
Sayı	Parça Adı	Resim No Standart No	Mon. No	Gereç	Açıklama
Çizen	Sami YANIK	Ölçek	RESİM NO 02-03'E A İT MONTAJ ANTEDİ		KARABÜK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNE BİTİMİ A.B.D.
Sn. No.	2006528107013	---			
Tarih	22/06/2009	---			
Kontrol	Prof.Dr. İbrahim KADI	---			
			Resim No : 02-03		

Şekil A.3. Deney sisteminin antedi.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Sami YANIK 1981’de Almanya’da doğdu; İlköğrenimini 60. Yıl İlkokulunda, orta öğrenimini Fatih İlköğretim Okulu’nda tamamlamıştır. 1995 yılında Afyon Merkez Endüstri Meslek Lisesi, Makine Ressamlığı bölümünü kazandı. 1998 yılında buradan mezun oldu; 2001 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Ressamlığı Öğretmenliği Programına girdi; 2005’de bu bölümden mezun olarak teknik öğretmen unvanını aldı; 2006 yılında Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda başladığı yüksek lisans programına devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Safrankent Sit. F Blok No:4

Safranbolu/KARABÜK

Tel : (506) 542 41 03

E-posta : sami\_yanik@hotmail.com