T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNİ TAHRİKLİ, DEĞİŞKEN STROKLU PİSTONLU POMPA SİSTEMİ TASARIMI VE ÇALIŞMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Hüseyin KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE ANABİLİM DALI

Konya, 2009

T.C

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNİ TAHRİKLİ, DEĞİŞKEN STROKLU PİSTONLU POMPA SİSTEMİ TASARIMI VE ÇALIŞMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Hüseyin KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA 2009

Bu tez 27 /01/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Kemal ALTINIŞIK
(Üye)

Doç.Dr.Muammer ÖZGÖREN
(Üye)

Yrd.Doç.Dr.Faruk KÖSE
(Danışman)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

RÜZGAR TÜRBİNİ TAHRİKLİ, DEĞİŞKEN STROKLU PİSTONLU POMPA SİSTEMİ TASARIMI VE ÇALIŞMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Hüseyin KAYA
Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman : Yrd.Doç.Dr.Faruk KÖSE

2009, 88 Sayfa

Jüri : Prof.Dr. Kemal ALTINIŞIK
Doç.Dr. Muammer ÖZGÖREN
Yrd.Doç.Dr. Faruk KÖSE

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisinin sulama amaçlı kullanılabilirliği ile ilgili deneysel bir çalışma yapıldı. Rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirmek için bir rüzgar türbini tasarlandı. Üretilen mekanik enerjinin hidrolik enerjiye dönüştürülmesi için de değişken stroklu pistonlu pompa tasarım ve imalatı yapıldı. Kurulan deney düzeneği ile doğal şartlarda suyun düşük kotlu bir ortamdan daha yüksekteki bir depoya pompalanması sağlanarak, sistemin performansı araştırıldı. Sistem veriminin piston stroğuna ve rüzgar hızına bağlı olarak % 4 - % 5 arasında değiştiği bulundu. Çalışılan sistemin özellikle elektriğin bulunmadığı kırsal alanlarda içme suyu temini ve sulama amaçlı olarak kullanılabileceği görüldü. Sonuç olarak rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan bölgelerde sulama amaçlı kullanımın daha cazip olacağı söylenebilir.

Anahtar Sözcükler: Rüzgar enerjisi, Rüzgar türbini, Pistonlu pompa, Su pompalama.

ABSTRACT

Master Thesis

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF WIND TURBINE DRIVEN PISTON PUMP SYSTEM WITH VARIABLE STROKE

Hüseyin KAYA

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Faruk KÖSE
2009, 88 Pages

Jury: Prof.Dr. Kemal ALTINIŞIK

Doç.Dr. Muammer ÖZGÖREN

Yrd.Doç.Dr. Faruk KÖSE

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF WIND TURBINE DRIVEN PISTON PUMP SYSTEM WHICH HAS VARIABLE STROKE

In this study, an experimental investigation was conducted to determine the feasibility of wind energy, a renewable energy source, for irrigation purposes. A wind turbine was designed to transform the wind energy to the mechanical energy. In order for the conversion of such produced mechanical energy to the hydraulic energy, a piston pump system with variable stroke was designed and manufactured. The performance of this system was evaluated by pumping water from a lower-altitude water source to a higher-altitude storage tank. The yield of the system was determined to vary from 4% to 5%, depending on the piston stroke and wind speed. It was demonstrated that the system could be used to obtain both drinking and irrigation water especially in the rural areas that lack of the electricity supply for irrigation purpose. Finally it seems that the system can find more viable application in the regions with higher potential of wind energy.

Key Words: Wind energy, Wind turbine, Piston pump, Water pumping.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve araç gereç desteğini esirgemeyen Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Faruk KÖSE'ye, yönlendirmelerinden istifade ettiğim Doç. Dr. Muammer ÖZGÖREN'e, deneyler esnasında yardımlarını esirgemeyen mesai arkadaşım Öğr. Gör. Mürsel EKREM'e sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iii
ABSTRACT ..... ıv
ÖNSÖZ v
İÇİNDEKİLER ..... vı
SİMGELER VE KISALTMALAR x
1. GİRİŞ 1
1.1. Enerjinin Sınıflandırılması ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları 3
1.2. Türkiye ve Dünya'da Rüzgar Enerjisinin Tarihi Gelişimi 4
1.3. Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli 6
2. KAYNAK ARAŞTIRMAS I7
3. MATERYAL VE METOD 13
3.1. Rüzgar Hızı 13
3.2. Hız Ve Güç Bağıntıları 14
3.6.5. Rüzgar türbinlerinin karakteristikleri 15
3.3.1. Rüzgar türbin kanadına tesir eden kuvvetler 15
3.3.1.1. Sürükleme (drag) katsayısı 16
3.3.1.2. Kaldırma katsayısı 17
3.4. Betz kanunu ve güç katsayısı 18
3.5. Kanat Uç Hız Oranı 22
3.6. Katılık Oranı 23
3.7. Faydalı güç 24
3.8. Pistonlu Su Pompalama Sistemi 24
3.8.1. Piston kolunda oluşan kuvvetler 25
3.8.2. Pompalarda verimlilik 30
3.8.2.1. Hacimsel verim 30
3.8.2.2. Pompa verimi 31
3.8.2.3. Sistem verimi 32
3.9.Deney Sistemi 33
3.9.1.Çalışılacak olan rüzgar enerji sisteminin tanıtımı 33

3.9.2. Deneyin yapıldığı ortam ve şartların tanıtımı 34
3.9.3. Rüzgar türbini ve su pompalama sistemi 37
3.9.3.1. Rüzgar türbini kanat tasarımı ve imalatı 37
3.9.3.2. Hız değiştirme ve güç aktarma sistem tasarım ve imalatı.....39
3.9.3.3. Fren mekanizması 40
3.9.3.4. Yön değiştirme sistemi tasarım ve imalatı 41
3.9.3.5. Kule tasarım ve imalatı 42
3.9.3.6. Pompa tasarımı ve imalatı.....43
3.9.4. Ölçme ve kontrol sistemi 46
3.9.4.1. Rüzgar hızı ölçümü 46
3.9.4.2. Pompa debisi ölçümü 48
3.9.5. Diğer ölçü ve kontrol aletleri 49
3.9.6. Pompalama sisteminde kullanılan şebeke elemanları 50
3.9.6.1. Emme hattı şebeke elemanları 50
3.9.6.2. Basma hattı şebeke elemanları 50
3.9.7. Sistemle ilgili yapılan diğer ölçüm ve kabuller 51
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR 52
4.1. Basma Hattındaki Basınç Değişimi 52
4.2. Sistemle İlgili Yapılan Hesaplamalar.....54
4.2.1.Rüzgar türbini devir sayısının hesaplanması..... 54
4.2.2. Kanat uç hız oranının hesaplanması.....54
4.2. 3.Su akış hızının hesaplanması 54
4.2. 4.Reynolds sayısının hesaplanması.....55
4.2. 5.Boru sürtünme katsayısının hesaplanması 55
4.2. 6.Manometrik emme derinliğinin hesaplanması.....55
4.2.7. Manometrik basma yüksekliğinin hesaplanması 56
4.2. 8. Emme hattında oluşan basınç farkının hesaplanması 56
4.2. 9. Basma hattında oluşan basınç farkının hesaplanması 57
4.2.10. Emme stroğunda piston kolunda oluşan kuvvetin hesaplanması.....57
4.2.11. Basma stroğunda piston kolunda oluşan kuvvetin hesaplanması 57
4.2.12.Rüzgar gücünün hesaplanması.....58
4.2.13.Faydalı gücün hesaplanması 58

4.2.14. Pompalama sisteminin mekanik gücünün hesaplanması 58
4.2.15. Pompalama sisteminin hidrolik gücünün hesaplanması 59
4.2.16. Pompalama sisteminin verimi 59
4.2.17. Pompa verimi 59
4.3. Ölçülen, Hesaplanan Değerler ve Grafikleri 59
4.3.1. Deneylerde elde ölçülen rüzgar hızı ve pompa debilernin zamana göre değişim grafikleri 60
4.3.2. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve pompa debisi grafikleri.....63
4.3.3. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve oluşan türbin devir sayısı grafikleri.....64
4.3.4. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve uç hız oranı grafikleri 65
4.3.5. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve pompa verimine ait grafikler 65
4.3.6. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve sistem verimine ait grafikler.....66
4.4. Yapılan Deneyde Elde Edilen Ortalama Değerler 67
HATA ANALİZİ 68
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 71
KAYNAKLAR 72
EKLER.....74

SİMGELER ve KISALTMALAR

R : Rotor yarı çapı (m)

D : Rotor çapı (m)

A_s : Rotorun süpürme alanı (m^2)

C_p : Güç katsayısı

E_k : Hareket halindeki havanın kinetik enerjisi (W)

n : Türbin rotor devri (dev/dak)

P_r : Türbine çarpan rüzgar gücü (W)

P_p : Pompa milinde oluşan güç (W)

v : Rüzgar hızı (m/s)

λ : Kanat uçhız oranı

$v_ç$: Rotorun çevresel hızı (m/s)

V_h : Hava kütlesinin hacmi (m^3)

π : Pi sayısı

ρ : Yoğunluk (kg/ $m^{3)}$

g : Yer çekimi ivmesi (m/s^2)

η : Genel verim

η_v :Hacimsel verim

$\eta_{m:}$ Mekanik verim

f : Boru sürtünme katsayısı

Re : Reynolds sayısı

p : Basınç (Pa)

F : Kuvvet (N)

cm : Santimetre

dak : Dakika

dev : Devir

GW : Gigawatt

hz : Hertz

kg : Kilogram

m : Metre

mm : Milimetre

MW : Megawatt

N : Newton

NACA : Ulusal Havacılık Tavsiye Komitesi (National Advisory Committee for Aerounautics)

NASA : Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi, (National Aeronautics and Space Administration)

IEA : Uluslararası Enerji Ajansı

ODTÜ : Ortadoğu Teknik Üniversitesi

TÜBİTAK:Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu

MAM : Marmara Araştırma Merkezi

IRESMED İntegtation of Renewable Energies into Electricity

MRP : Mekanik Rüzgar Pompası

Nm : Newton metre

PV : Güneş Enerjisi

s : Saniye

V : Volt

W : Watt

H_{me} : Manometrik emme yüksekliği(derinliği)

H_{mb} : Manometrik basma yüksekliği

Δp_e : Emmedeki basınç farkı

Δp_b : Basmadaki basınç farkı

Fp_e :Emme strokunda piston kolu kuvveti

Fp_b : Basma strokunda piston kolu kuvveti

$\sum F$: Piston koluna uygulanan kuvvetler toplamı

1. GİRİŞ

Çağımızın vazgeçilmez ihtiyaçlarından birisi de şüphesiz enerjidir. Ülkelerin ekonomik, kültürel ve bilimsel gelişmişlik düzeyleri ürettikleri ve tükettikleri enerji miktarı ile ölçülmektedir. 7 milyar civarındaki dünya nüfusunun yaklaşık 1 milyarı gelişmiş ülkelerde yaşamakta olup dünyada tüketilen enerjinin %60'ını, kalan 6 milyar kişi ise %40'ını tüketmektedir. Bu verilere göre gelişmişlik ile enerji tüketimi arasında doğrudan bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu durum ülkeleri yeni enerji kaynaklarına yöneltmekte, enerji kaynaklarına hakim olma ve verimli kullanım konusunda büyük çalışmalar olmaktadır.

Enerji kaynaklarının; üretimi, taşınması ve tüketimi safhalarında doğaya zararlı atık ve gazlar oluşmaktadır. Özellikle kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların yakılması sonucu küresel, bölgesel ve lokal ölçekte çevre kirlenmesi söz konusudur. Dünya üzerinde son yüzyılda fosil yakıta dayalı enerji kullanımı; çevre kirlenmesi, atmosferde oluşan karbondioksit gazının sera etkisi, doğal dengeyi ve insan hayatını olumsuz etkilemektedir. Dünya atmosferine salınan karbondioksit düzeyinin azaltılması amacıyla dünya ülkeleri 1997 yılında Kyoto Protokolü'nü imzalamışlardır.

Fosil enerji kaynaklarının gerek rezervlerinin tükenmeye başlaması gerekse çevre kirliliğine sebep olması dolayısıyla bilim adamları tarafından yeni ve temiz enerji kaynakları bulma çalışmaları yapılmaktadır. Bu kaynakların en önemlileri, yeryüzünün büyük bir bölümünde kullanım alanı ve imkanı bulunan, yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, esasını güneş enerjisinin oluşturduğu ve bu enerjinin etkilerine bağlı olarak ortaya çıkan rüzgar, hidrolik, biyokütle, jeotermal ve deniz (dalga gel-git) enerjileri gibi enerji türleridir. Bu kaynakları dünyanın tabii dengesine göre sürekli yenilenebildikleri gibi çevreyi de hemen hemen hiç kirletmemektedirler (Köse 2002).

Ülkemizdeki enerji ihtiyacının yaklaşık % 22,50'si taş kömürü ve linyitten, % 45,39'u petrol ve doğal gazdan, % 30,77'si de su kaynaklarından karşılanmaktadır. Son yıllarda taş kömürü ve 1987'den itibaren de doğalgaz ithalatı da yapılmaktadır. Halen ülkemizde kullanılan enerjinin % 60'dan fazlası ithal edilmektedir.

Son yıllarda gelişmiş ülkeler yenilenebilir enerji kaynakları potansiyellerinin büyük bir bölümünü değerlendirirken ülkemizde bu çalışmalar henüz yeni başlamaktadır. Ülkemiz açısından bu kaynakların değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu sayede ülkemizin ihtiyacı olan enerjinin bir kısmı kendi kaynaklarımızdan karşılanacak, enerji için yabancı ülkelere ödenen döviz kendi ülkemizde kalarak yatırıma dönüşecektir. Ayrıca, bu alanda kurulan tesislerin gerek kurulumu gerekse işletimi esnasında sağlanan istihdam sayesinde daha fazla insanın çalışması sağlanarak ülke ekonomisine çift yönlü bir katkı sağlanacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi alanında hızlı bir gelişme görülmektedir. Rüzgar enerjisi genellikle elektrik enerjisine dönüştürülerek ya da mekanik enerjiye çevrilerek kullanılır. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemler elektrik şebekesinin bulunmadığı yerleşim merkezlerinde, adalarda, kırsal alanlarda, ormanlık ve dağlık bölgelerdeki birimlerde (televizyon, radyo, meteorolji ve haberleşme istasyonu gibi) elektrik temini amacıyla ya da enterkonnekte sistemi beslemek amacıyla kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri istenilen yere kolayca monte edilebilecek yapıda modüler olarak imal edilmekte olup, bazen onlarcası veya yüzlercesi bir arada kurularak rüzgar tarlaları oluşmaktadır.

Yapılan çalışmada rüzgar enerjisi ile su pompalama sistemi incelenmiş olup; insanımıza ve ülkemize sağlayabileceği faydalar araştırılmıştır. Özellikle küresel ısınma neticesi dünyanın diğer bölgelerinde olduğu gibi ülkemizde de oluşan kuraklık neticesi su kaynaklarımız hızla tükenmektedir. Bu durum, canlı hayatında havadan sonra en önemli madde olan suyun daha bilinçli ve ekonomik kullanımını gerektirmektedir. Özellikle kırsal kesimde yer altında veya vadi tabanlarında bulunan düşük debili su kaynaklarının gerek içme amaçlı, gerekse damlama gibi modern yöntemlerle sulama amaçlı kullanımı mümkündür. Böylece ülkemizin doğal kaynakları ve insan kaynakları daha iyi değerlendirilerek, ekonomiye katkı sağlanacaktır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği Kanunu ile yenilenebilir enerjinin aktif kullanımına yönelik teşvikler verilmesini uygun görmüştür. Bunun neticesinde Türkiye Rüzgar Atlası'na göre Çanakkale, İzmir Çeşme-Altınyunus ve Antakya illerinde çeşitli özel kuruluşlar rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimine yönelik yatırımlar yapmışlardır.

1.1. Enerjinin Sınıflandırılması ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Enerji çevremizdeki birçok olayın gerçekleşmesine neden olmaktadır. Günlük hayatta her alanda iç içe olduğumuz enerji en basit anlamda, "**iş yapabilme yeteneği"** olarak tanımlanabilir.

Başlıca enerji çeşitleri; ısı enerjisi, kimyasal enerji, nükleer enerji, elektrik enerjisi, potansiyel enerji ve kinetik enerji şeklinde sıralanabilir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, hidrolik, rüzgar, güneş, dalga, jeotermal (jeotermik) ve biyokütle (biyomas) gibi tabiatta var olan veya tabiatta tabii olarak bulunan maddelerden üretilebilen enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar sürekli devretmekte (yenilenmekte) ve dünya var oldukça kullanımı devam edebilecek olan enerji kaynaklarıdır. Sudan elde edilen hidrojen enerjisi de yenilenebilir enerji kaynaklarındandır.

Nükleer enerji atomun çekirdeğiyle ilgili bir olay olup iki şekilde elde edilir. Bunlardan birincisi büyük bir çekirdeğin parçalanması *fizyon* (bölünme)'dur. İkincisi ise iki küçük çekirdeğin birleşmesi *füzyon* (birleşme, kaynaşma) dur. Her iki reaksiyondan da açığa çıkan ısı enerjisi ile buhar elde edilerek termik santrallerdeki gibi elektrik üretilebilir.

Konvansiyonel enerji kaynakları belli bir zamandan beridir ve günümüzde yaygın biçimde kullanılan enerji kaynaklarıdır. Bunlar; Klasik biyokütle (biyomas), konvansiyonel ormanlardan elde edilen yakacak odun, bitki ve hayvan artıklarından oluşan yakıtlar, kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar, hidrolik enerji (Hidroelektrik), uranyum ve toryum gibi fizyonluk elementlerden oluşan nükleer yakıtlardır. Konvansiyonel enerji kaynaklarının ortak ve önemli özellikleri; üretim düzeyleri isteğe göre kontrol altında tutulabilir, sürekli üretilebilir ve üretilmiş olan enerjinin depolanmasını gerektirmeyen bir üretim sağlar. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları bu özellikleri sağlayamaz.

2020 yılında dünya genelinde yenilenebilir kaynaklardan yapılacak üretimin minimum ve maksimum durumları incelendiğinde hidrolik ve klasik biyokütle dahil 2,3-3,3 milyar TEP sınırlarında bulunmaktadır (Köse, 2002). Bu değer 2020 yılı tahmini birincil enerji üretimi 11,4-15,4 milyar TEP değerinden daha büyük bir değer

tutacaktır. Genel enerji talebinin % 8-12 si kadar olacak yenilenebilir enerji üretimi içinde, modern biyokütle % 42, güneş %26, rüzgar %16, jeotermal % 7, küçük hidrolik %5 ve deniz enerjileri (dalga, ısı gradyeni ve gel-git) % 4 yer kapsayacaktır.

1.2. Türkiye ve Dünya'da Rüzgar Enerjisinin Tarihi Gelişimi

İnsanoğlunun rüzgar gücünü keşfedip yararlanmaya başlaması çok eski tarihlerde başlamıştır. Rüzgar gücünden ilk faydalanma şekli olarak yelkenli gemilerin hareket ettirilmesi ve yel değirmenlerinin çalıştırılması gösterilebilir. Rüzgar enerjisinden ilk defa elektrik üretiminin 1882 yılında Amerika'da New York'ta gerçekleştiği bilinmektedir (Yalçın 2007). Elektrik enerjisi üreten ilk rüzgar santrali de ABD'de Vermont eyaletinin Montpelier kenti yakınlarında 1940 yılında yapılmıştır. ABD'de başlayan rüzgar enerjisinden faydalanma durumunu zamanla Danimarka, Hollanda, İsveç ve Almanya izlemiştir.

Yeraltından su çekmek için kullanılan rüzgar türbinleri elektrik üretim amaçlı kullanılan rüzgar türbinlerinden daha basit yapıdadır. Rüzgar tarafından oluşturulan enerji, pervane şaftına gelerek doğrudan su çekmek için yapılan tulumba mekanizmasına verilmektedir. Su çekme veya sulama amacıyla kullanılan rüzgar türbinleri, 12-24 kanatlı, 2-5 m pervane çaplı ve 10-30 m yüksekliğinde tasarlanmaktadır. Zeminden çekilen su, borularla daha yüksekte bulunan bir su deposunda biriktirilmektedir. Su deposunun yüksekte bulunmasının nedeni suya potansiyel enerji kazandırarak kullanım yerine ulaştırmak için enerji ihtiyacını ortadan kaldırmaktır.

1980'li yıllarda 55 kW gücünde rüzgar türbinleri piyasada satılırken, günümüzde 850 yatak kapasiteli bir otelin tüm elektrik ihtiyaçlarını karşılayacak, 1,5 MW gücünde rüzgar türbinleri yapılmaktadır (Yalçın, 2007). 1990'lı yıllar rüzgar enerjisi dünyanın en hızlı gelişen enerji sektörü oldu. Dünyadaki rüzgar enerji santrallerindeki son üç yıldaki ortalama artış hızı %35,7 iken, kurulu güç son 3 yılda 2,5 katına ulaşmıştır (Yalçın, 2007). Yaşanan bu önemli gelişmelere rağmen dünya çapında kullanılan rüzgar enerjisi, enerji ihtiyacının sadece % 1'ini

karşılamaktadır. Bununla birlikte hızla artan kapasitesi ile rüzgardan elde edilecek enerji yakın gelecekte enerji ihtiyacını karşılayacak ciddi bir kaynaktır.

Günümüzde rüzgar santralleri karalarda olduğu kadar denizlerde de kurulmaktadır. Karadan denize geçiş ilk uygulamalarla teknik alanda başarılmış ve ticari uygulamaları da gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte daha gelişmiş sistemler için AR-GE çalışmaları sürmektedir. Deniz üstü rüzgar enerjisi ile ilgili ilk çalışmalar 1970'li yılların sonuna doğru Danimarka, Hollanda, İsveç ve ABD'de başlamıştır. 1980'li yılların başında bu çalışmalar Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) bünyesinde yürütülmüştür.

"Rüzgar Gücü 12" diye adlandırılan planlamaya göre, rüzgar enerjisinin 2020 yılına kadar dünya elektriğinin %12'sini karşılama potansiyeline yönelik bir fizibilite çalışmasıdır. Bu süreçte, 1200 GW düzeyinde bir rüzgar gücü kapasitesi oluşturularak, 2 milyonu aşkın kişiye iş imkanı oluşturulacak ve iklim değişikliğine neden olan 10 milyar 700 milyon ton karbondioksitin üretilmesi önlenebilecektir (Uğuz, 2007).

Ülkemizde 1973-1978 yılları arasındaki petrol krizinden sonra Tarım Bakanlığı tarafından yapılan kırsal enerji makineleri envanterinde kullanılıp kullanılmadığına bakılmaksızın, 871 adet su çıkarma ve 23 adet elektrik üretim amaçlı rüzgar türbini olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu rüzgar makineleri güçleri 1 kW'ın altında güce sahip olup, yerli olanları ilkel yapılıydı (Uğuz, 2007).

1992 yılında Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği kurularak Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği'ne bağlanmıştır. Bu birlik pek çok kamu ve özel sektör katılımcısı üyeden oluşmuştur. Enerji Bakanlığı'nın ve özellikle bu birliğin etkin çalışmaları sonucu, özel şirketler tarafından ilk defa 1998 yılında İzmir- Çeşme Alaçatı mevkiinde ARES Güç Birliği şirketi tarafından toplam 7,2 MW gücünde rüzgar türbinleri kurularak elektrik üretimine geçilmiştir. 2004 yılı sonu itibarı ile Türkiye'de kurulu güç 20 MW'tır (Uğuz, 2007). Son yıllarda yapılan yatırım teşvikleri ile rüzgar santrali kurulu gücü 2007 sonunda 146 MW'a çıkmış olup, 2008 sonunda da inşası devam edenlerin tamamlanması ile 476,15 MW'a çıkacaktır (www.epdk.gov.tr).

1.3. Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar potansiyeli tespitinde, teknolojik tarihsel gelişim ve endüstri ile ilgili yönler de dikkate alınmıştır. Yapılan bilimsel hesaplamalarda, dünyadaki potansiyelin çok yüksek olmasından yola çıkılarak yaklaşık değerler kullanılmasının yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Kapasite hesaplamalarında en büyük engellerin arazi kullanım imkanı ve yöre şebekesinin teknik seviyesi olarak ortaya çıkmaktadır.

Grubb ve *Meyer* tarafından yapılan ve "*IEA – Word Energy"* tarafından yayınlanmış çalışmada, 5,1 m/s üzerinde rüzgar kapasitesine sahip bölgelerin uygulamaya dönük ve toplumsal engeller nedeni ile % 4 'ünün kullanılacağı esasına dayalı çalışmada, Dünya Potansiyeli 53.000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değerlendirmeye gore 14.000 TWh/yıl ile en büyük potansiyele Kuzey Amerika sahipken, ikinci 10.600 TWh/yıl ile Doğu Avrupa-Rusya ve Afrika dır. Ayrıca, Güney Amerika 5.400, Batı Avrupa 4.800 Asya (Rusya hariç) 4.600 ve Okyanusya 300 TWh/yıl potansiyellerine sahiptirler.

Türkiye'nin toplam rüzgar enerji potansiyeli 40.000 – 80.000 MW düzeyindedir. Devlet Meteoroloji İşleri istasyonlarının 1970-1980 dönemi rüzgar verilerinin değerlendirme sonuçlarına göre, Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgar hızının yer yüzeyinden 10 m yükseklikte 2,54 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğunun 24 W/m^2 olduğu belirlenmiştir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli bölgelere göre değerlendirildiğinde, Marmara ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin rüzgar gücü yoğunluğu bakımından diğer bölgelere göre daha zengin olduğu görülmektedir (Şekil 3.2). Türkiye'de Marmara, Ege ve Akdeniz kıyıları, dünyada rüzgar gücü potansiyeli açısından ilk %30'luk alana girmektedir. Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nce yapılan çalışmalara göre, ülke genelinde bu bölgeler süreklilik ve yoğunluk açısından ümit veren yörelerdir (Köse ve ark.,2003)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Rüzgar enerjisinden tarih öncesi çağlardan itibaren faydalanıldığı bilinmektedir. Önceleri denizlerde gemilerin yelkenlerle hareket ettirilmesiyle başlayan kullanım yel değirmenleri ile un öğütülmesi ve su pompalanmasıyla devam etmiş, günümüzde ise modern türbinlerle elektrik üretimiyle devam etmektedir. Dünyada ve Avrupa'da rüzgar enerjisi kullanımı ve ilgili araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Bilindiği gibi bunun iki sebebi var; biri, dünyayı tehdit eden küresel ısınma, diğeri de fosil yakıtların bir süre sonra tükenecek olmasıdır.

Clark ve ark. (1978), 40kW gücünde, dikey bir rüzgar türbini inşa etmişlerdir (USDA, Bushland, TX). Bu sistemin amaçları komple rüzgar destekli bir pompalama sistemi kurarak veya mevcutları modifiye ederek rüzgar destekli pompalama sistemlerinin ekonomik analizlerini gerçekleştirmektir. Pompalama sistemi hem rüzgar türbini hem de elektrikli motor kullanarak derin bir sulama kuyusuna güç sağlamıştır. Sistem 105 m'lik bir basma yüksekliğine 104 m^3/h su pompalamıştır. Rüzgar destekli pompalama sisteminin bütün aksamı yeterli derecede çalışmıştır.

Clark ve Nolan (1979), halen kullanılan bir sulama kuyusu ve bir dikey türbin pompası için rüzgar destekli bir pompalama sistemi geliştirmişlerdir. Sistem başarılı şekilde çalışmış ve stabil olmayan rüzgar türbininden elde edilen gücü etkili bir şekilde kullanmıştır. Rüzgar destekli güç sistemi bir başka enerji kaynağının da bulunduğu kırsal veya uzak alanlarda kullanılabilir niteliktedir.

Van Meel ve Oldenkamp (1984), Eindhoven Teknoloji Üniversitesinde su pompalayan rüzgar türbini ölçümleri için bir data toplama sistemi geliştirilmiştir. Sistemin geliştirilmesinde kullanım kolaylığı, ticari olarak mevcut ekipmanın seçimi, bilginin kolay transferi, güvenirlik, esneklik ve düşük maliyet özellikle göz önünde tutulmuştur. Mekanik güçle çalışan rüzgar destekli su pompaları ile ilgili tipik ölçümler tartışılmıştır. Özellikle üç tip ölçüm önemli bulunmuştur: çıktı performansı, güvenlik sistemi ve maksimum hız. Sistemin hesaplamaları Apple mikroişlemcilerle gerçekleştirilmiştir. Mekanik ve yazılımla ilgili kısımlar kısaca açıklanmıştır. Neticede, bazı tipik ölçümlerin sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

Clark ve Nolan (1984), mekanik bir rüzgar sistemi ile elektrikli bir rüzgar sisteminin su pompalama açısından karşılaştırılmasını incelemişlerdir. Bu iki sistem rüzgar enerjisinin su pompalamaya dönüşüm etkinliği açısından karşılaştırıldığında, mekanik sistemin elektrikli sistemden %12 daha fazla enerji sağladığını belirlemişlerdir. Ancak, sulama pompalarının sezonluk kullanımı nedeniyle elektrikli sistem mekanik sisteme göre 2,5 kat daha karlıdır. Elektrikli sistemde sulama yapılmayan dönemlerde üretilen enerji farklı amaçla kullanılabilirken, mekanik sistemde üretilen enerji sadece su gereksinimi olan (sulama yapılan) dönemlerde kullanılabilmektedir.

Avery ve Don (1985), çok yönlendiricili bir rüzgar türbini için kullanılan otomatik bir stroke kontrol sistemi anlatılmıştır. Güç üretimi yüksek rüzgar hızlarında artmakta ve pompalama işlemi normalden daha düşük rüzgar hızlarında başlamaktadır. Deneysel olarak tasarlanan rüzgar türbini, 2 silindirli ve çift etkili bir pompayı hareket ettiren yüksek hızlı bir rotordan oluşmaktadır. Bu sistem etkinlik açısından bu zaman kadar geliştirilenler içerisinde en iyi olandır. Oldukça etkin, düşük basma yüksekliği, yüksek kapasiteli ve çift etkili pistonlu bir pompanın fiberglastan üretimi açıklanmıştır. Doğrudan ve elektrikli pompalama sistemlerinin etkinliği tartışılmıştır.

Kentfield ve MacGregor (1985), Çift etkili, değişken stroklu ve alternatif hareketli bir su pompası ile birleştirilmiş yatay eksenli bir türbin (rüzgar pompası) tasarımı açıklanmıştır. Rüzgar pompasının rotoru delta-kanat tipindedir. Sabit adım tasarımı seçilerek 0,4 lük bir pik güç katsayısı elde edilmiş ve sıfır rotor hızında maksimum tork üretilmiştir. Kullanılan delta tipi türbin ve uygun yükleme sistemi, geliştirilen makinanın düşük maliyetli olmasını sağladığını belirtmişlerdir.

Carothers ve Bragg (1986), anlık rüzgar su pompasının özellikleri Weibull istatistiksel yaklaşımı, rüzgar hızıyla birleştirilerek aylık su pompalama oranı tahmin edilmiştir. Özellikle Sahelian rüzgar rejiminde Weibull şekil faktörü ‘k’, su pompalama kapasitesi ve optimum rotor ve pompa seçiminde kullanımı tartışılmıştır.

Uzun dönem rüzgar dataları kullanılarak 10 güne kadar olan sürelerde kısmi korelasyon olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Van ve Henk (1986), Rüzgar destekli sulama sistemleri için gerekli olan su depolama tankı kapasitesinin hesaplanmasında kullanılacak bir model geliştirilmiştir. Rüzgar pompasının kullanım derecesi ve tank kapasitesi arasındaki ilişki gösterilmiştir. Elde edilen grafiklerde özel durumlar için uygun çözümler sunduğunu ifade etmişlerdir.

Hurley ve Brain (1986), Rüzgar enerjisinin mevcut durumu ve yükseklikle değişimlerini araştırmışlardır.7 m kule uzunluğundaki tipik bir rüzgar türbininin su pompalama performansı, bölgesel rüzgar gücüne göre 2,6 katlık bir değişim göstermektedir. Yağış ve evaporasyon dataları dikkate alınarak maksimum pompalama ihtiyacı araştırılmıştır. Su pompalama için kullanılan rüzgar motorları teknolojisi ve yenilikler araştırılmıştır. Bir rüzgar makinasının drenaj yapabileceği alanın hesaplanması amacıyla, rüzgar gücü ve yağış dataları kullanan üç model geliştirilmiştir.

Kenna (1986), Altı adet Kijito rüzgar türbini teknik ve ekonomik uygunlukları açısından test edilmiştir. Onar dakikalık ve günlük rüzgar hızları ile su miktarı ve rotor hızları her bir uygulama alanında kaydedilmiştir. Onar dakikalık rüzgar hızı testlerinin amacı rüzgar pompası performansının genellenmesini sağlamaktır. Ön çalışmalar, onar dakikalık testlerin rüzgar dağılımının performansa etkisi nedeniyle genellenmesinde yetersiz kalmaktadır. Aynı zamanda günlük veya aylık ortalama hızlar dikkate alınarak bir kuyu sisteminde rotor alanı ve ve hidrolik güç arasında $P = 0,1v^3$ Watt/m^2 eşitliğini olduğunu göstermiştir.

Fraenkel (1987), Ticari rüzgar pompaları doğrudan su kaynağının üstüne inşa edildiği için çoğu rüzgar kaynağı için uygun olamayan bir konumdadır. IT Power şirketi rüzgar türbininden 10-10.000 m uzaklıktaki kuyulara gücün taşınması için bazı teknikler belirlemiş ve karşılaştırmıştır. Bu makale söz konusu bulguları açıklamıştır.

Pan (1988), baca tipi bir rüzgar kulesinde oluşan vorteks tipi akış, kulenin dibinde düşük basınçlı bir bölge oluşturmaktadır. Dolayısıyla kule içi ve dışında yüksek bir basınç farkı oluşmaktadır. Bu makale söz konusu basınç farkının suyun yukarı çıkarılmasında kullanılabileceğini öngörmektedir. Bu sistemle rüzgar türbini gibi mekanik aksam olmadan doğrudan suyun yukarı pompalanması sağlanmıştır. Suyun pompalanma yüksekliği rüzgar hızına bağımlı değildir. Bu sistemin bir prototipi üretilmiş ve laboratuarda kullanılmaktadır.

Krishnamoorthy ve ark.(1990), Yaygın derinlik (5-20 m) için bir rüzgar rotorunun santrifüj pompasına (750 W) uygunluk durumunu incelemişlerdir. Farklı basma yüksekliğine sahip iki santrifüj pompa seçilmiştir. Optimum değiştirme oranı ve pompaların ihtiyacını karşılayabilecek gücün uygunluğu tartışılmıştır. Pompanın arazi performansı, bir test düzeneği kullanılarak ve arazi şartları ve devir sayıları simüle edilerek açıklanmıştır. Bangalore/Hindistan'da, pompaların optimum çalışma aralıkları hakim rüzgar şartlarında ortaya konulmuştur.

Dündar ve İnan (1997), Çeşme'de 1990-1994 yılları arasındaki saatlik rüzgar verileri ile, topografya, yakın çevre engelleri ve bölgenin pürüzlülük bilgilerini kullanarak Çeşme için rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplarını yapmışlardır.

Tolun (1997), büyük rüzgar elektrik sistemlerinin ekonomik analizi ve tesis kurma hususlarını inceledikten sonra Gökçeada'da hangi tip türbinlerle ne kadar enerji üretileceği konusunda çalışma yapmıştır.

Borhan (1998), Ege denizi sahilleri ve çevresinin rüzgar gücü yoğunluğunun umut verici olduğunu bildirmiştir. Çalışmasında, Çanakkale, Bozcaada ve Gökçeada'daki 10 m yüksekliğindeki 1995-1996 yılları anemometre verileri kullanılarak, kuzey Ege, Çanakkale boğazı ve adalar çevresindeki yüksek rüzgâr potansiyelinin sebeplerini ele almıştır. Bölgedeki yüksek potansiyele, rüzgârların yolunun, kanal etkisinin ve yüzey basınç gradyantlarının etkili olduğu sonucuna varmıştır.

Oğuzer (2001), standart bir ölçme sisteminin esaslarını ortaya koyarak, ölçümlerde olabilecek hataların üretilecek enerjiye etkilerini hesaplamıştır. Ayrıca standart ölçme sistemi, ölçme sistem direk ve cihazlarını açıklamıştır.

Türksoy (2001), rüzgar verisi ve analizi üzerinde durarak, ölçme cihaz çeşitlerini incelemiş, saatlik ve on dakikalık ölçüm sonuçlarını karşılaştırarak, hız ve yön frekans dağılımı grafiklerinin elde edilişlerini göstermiştir.

Albinus (2001), ölçülen rüzgar datalarının değerlendirilmesi ve kullanılır hale getirilmesinin hangi programlar kullanılarak yapılabileceğini ve farklılıkları üzerinde durmuştur.

Siddig (2001), Rüzgar enerjisi kullanan yeni bir pistonlu pompa tasarımını açıklanmıştır. Bu yeni tasarım, mevcut tasarımların kesikli modda çalışma ve yetersiz performans gibi bazı eksikliklerini gidermektedir. Bu tasarım, rüzgar pompasının başlama ve durma durumlarını tahmin edilebilecek şekilde planlanmıştır.

Yıldız (2002), yatay eksenli bir RT'de NACA 4415 profilli kanat kullanarak uç hız oranı ve kanat sayısının güç sayısına etkilerini araştırmıştır. Uç hız oranının $\lambda=5$ değerine kadar güç katsayısı ile lineer arttığını, bu değerden sonra güç katsayısının azaldığını tespit etmiştir.

Aras ve ark. (2003), Afyon ilinin rüzgar hız verilerinin Weibull dağılımına uyumunu inceleyerek, 12 m yükseklikten 9 yıl süreli ölçülen rüzgar hızlarının her ne kadar 13 m/s değerini geçmediğini belirtseler de hız frekanslarının Weibull dağılımına uyduğunu göstermişlerdir.

Çalışkan (2003), rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi isimli yaptığı çalışmasında potansiyelin belirlenmesi için uygun alanların belirlenmesi gerektiğini, uygun rüzgar gözlem istasyonu yerinin bölgenin topografik yapısına bağlı olarak 500 m ile 100 km arasındaki bir alanı temsil edebileceğini belirtmektedir. Ayrıca, çalışmada WASP 6.0 programı kullanılarak bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve türbinlerin yerleştirilmesi örnek olarak göstertilmiştir.

Özerdem ve Türkeli (2003), Avrupa rüzgar atlasında Ege denizi ve kıyılarının yüksek rüzgar enerjisine sahip olduğunun görüldüğünü ancak, bölgede tam bir potansiyel belirlemesinin henüz yapılmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında Çeşme de bulunan İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde 2000-2001 yıllarında 16 ay ölçülen rüzgar verilerini değerlendirmişler, yıllık ortalama rüzgar hızı 10 m yükseklikte 7,03 m/s, 30 m yükseklte 8,14 m/s ve etkin rüzgar yönünü kuzey

bulmuşlardır. Verileri WASP ve Windpro programını kullanarak değerlendirmişler ve Türkiye rüzgar atlası için bu bölgenin değerlerini hazırlamışlardır.

Bilgili ve ark. (2004), 1997 ile 2001 yılları arası Antakya ve İskenderun bölgesi meteoroloji istasyonlarının verilerini kullanarak, doğu Akdeniz bölgesindeki bazı yerlerin rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmişlerdir. Çeşitli programlar kullanılarak 10 m'lik ölçüm verileri, 50 m için yıllık ortalama hız ve rüzgar yoğunlukları; Antakya'da 8,2 m/s, 675 W/m^2, İskenderun için ise 4,7 m/s, 753 W/m^2 olarak hesaplamışlardır.

Köse ve ark. (2004), yenilenebilir enerji kaynakları içinde en hızlı gelişen ve dikkat çekenin rüzgar enerjisi olduğunu ve Türkiye'de kısa dönem içinde alternatif olarak umut verici olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında Kütahya'nın rüzgar enerjisi potansiyeli belirlemek için Dumlupınar üniversitesi kampüs alanına yerleştirilen 30 m'lik ölçme direği ile 20 ay rüzgar enerjisi verileri ölçülerek değerlendirilmiştir. Verilerin CALLALOG 98 ve ALWIN programlarıyla değerlendirilmesi ile 30 m'de yıllık ortalama rüzgar hızı 4,62 m/s bulunmuş olup, rüzgar türbinleri için gereken 5 m/s hızdan küçük çıktığı, günümüzde bölgenin rüzgar enerjisi üretimi için ekonomik olmadığı, rüzgar türbinlerinin ucuzlaması ile ekonomik olabileceğini belirtmişlerdir.

Güngör (2005), 6 m derinlikten 200 m yüksekliğe 10 m^3/h debi ile su basabilen, 8m çaplı, NACA 2212 profiline sahip kompozit malzemeden yapılmış, 8 kanatlı, ayarlanabilir stroklu, çift etkili piston pompalı prototip su pompalama türbini imal etmişlerdir. Bu sistem ile 200 m yüksekliğe kadar su pompaladıklarını bildirmiştir. Pompalama kapasitesini 10 m/s rüzgar hızında, 10 m^3/h olarak tespit etmiştir.

Ültanır (2006), dünyada rüzgar ve güneş santrallerindeki gelişmeler, birim güç fiyatları ve toplam kurulu güçler hakkında bilgi vererek bunların Türkiye için kullanılabilirliğini incelemiştir.

Gökçek ve ark. (2007), Kırklareli'nde 2004 yılında Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından ölçülen saatlik rüzgar verilerini aylık, mevsimlik ve yıllık olarak analiz etmişler, Rayleigh ve Weibull parametrelerini hesaplamışlardır. Ölçüm yeri için yıllık ortalama birim güç yoğunluğu çalışmada 138,9 W/m^2 hesaplamışlardır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Rüzgar Hızı

Rüzgar hızı ve yönünü belirlemek amacıyla yapılan ölçümler, ölçüm amacına göre değişir. Meteorolojik amaçlı (klimatolojik, sinoptik, hava kirliliği vb.) yer rüzgarı ölçümlerinde Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kurallarına göre standart ölçüm yüksekliği 10 metredir. Enerji amaçlı rüzgar ölçümlerinde ise rüzgar hızı, rüzgar yönü ve çevre sıcaklığı gibi parametreler 30 metre ve mümkünse türbin göbek (hub) yüksekliğinde en az bir yıl periyodik olarak (10 dk, 1 saat) ölçülür ve bilgisayar ortamında değerlendirilebilinecek şekilde veri paketi olarak tespit edilir (www.epdk.gov .tr). Yapılan araştırmalarda rüzgar hızının yer yüzeyi şekillerinden ve engellerinden etkilendiğini görülmüştür. Rüzgar hızı yer yüzeyinde minimum değerde iken, yer yüzeyinden yükseldikçe artmaktadır. Bu artış yerden 5 km kadar sürer, bu yükseklikten itibaren yeryüzü şekillerinden etkilenmez. Herhangi bir yükseklikteki rüzgar hızını belirlemek için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\frac{v}{v_0} = \left[\frac{H}{H_0}\right]^n \tag{3.1}$$

Burada;

v : İstenilen H yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)

v_0 : H_0 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı (m/s)

H_0 : Ölçüm yapılan yükseklik (m/s)

H : Rüzgar hızının hesaplayacağı yükseklik (m)

n : Pürüzlülük katsayısı (Kent alanları; n=0.4, Kırsal alanlar; n=0.25, Sahil şeridi; n=0.16).

3.2. Hız ve Güç Bağıntıları

Rüzgardaki enerji kinetik enerji olup;

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \mathrm{E} = \frac{1}{2}\mathrm{mv}^2 \tag{3.2}$$

olarak verilebilir. Burada;

m : havanın kütlesi (kg)

v : rüzgar hızı (m/s)

Türbinden geçen hava kütlesi;

$$m = \rho_h.V \tag{3.3}$$

formülü ile verilebilir. Burada;

ρ_h : havanın yoğunluğu ($kg/m^{3)}$

V : havanın hacmi (m^3)

V, A (rotor kanatları süpürme alanı)dan v hızı ile t süresinde geçen hava miktarı olduğundan;

$$V = A.v.t \tag{3.4}$$

olarak yazılırsa, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji;

$$E = 1/2\ \rho_h.A.v^3.t \tag{3.5}$$

olarak elde edilir. Burada;

t : Zaman (s)

Rüzgar enerjisindeki güç

$$P_r = \frac{E}{t} \tag{3.6}$$

olduğundan;

$$P_r = 1/2\ \rho_h.A.v^3 \tag{3.7}$$

olarak yazılabilir.

Birim alandaki güç yoğunluğu P_y ise;

$$P_y = \frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho_h.v^3 \tag{3.8}$$

formülü ile hesaplanabilir.

Rüzgar güç yoğunluğu formülasyonundan da anlaşılacağı gibi rüzgar enerjisinde en büyük etken rüzgar hızıdır. Bu nedenle güç yoğunluğunu artırmak için, rüzgar hızının yüksek olduğu yerler tercih edilmelidir.

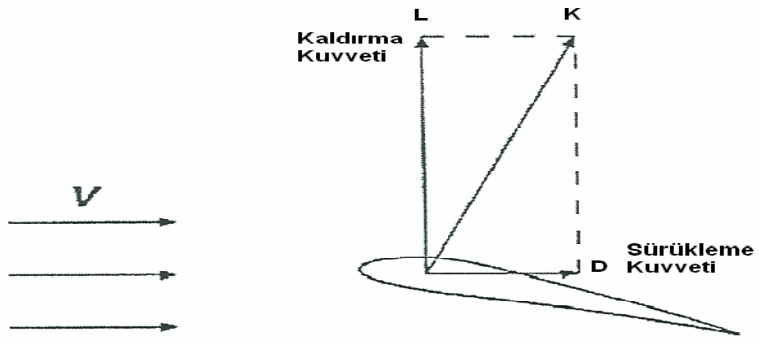
3.3. Rüzgar Türbinlerinin Karakteristikleri

Enerji gereksinimini karşılamak için çeşitli tiplerdeki rüzgar türbinleri yüzyıllardır kullanılmaktadır. İnsanlığın rüzgar enerjisinden faydalanma çalışmaları, yel değirmenlerinden günümüzün deniz üstü rüzgar çiftliklerine doğru sürekli bir gelişme içerisinde olmuştur. Çok çeşitli alanlarda yararlandığımız rüzgar enerjisinden verimli bir enerji elde etmek için, mevcut şartlara göre kurulacak rüzgar türbinleri (RT)'nin seçimi çok önemlidir.

Her bir RT farklı özelliklere ve kullanım alanlarına sahiptir. RT'lerinin özelliklerini anlayabilmek için çeşitli karakteristikler tanımlanmıştır.

3.3. 1.Rüzgar türbin kanadına tesir eden kuvvetler

Rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar sürükleme (drag) ve kaldırma (lift) kuvvetleridir. Sürükleme cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Kaldırma kuvveti ise akış yönüne dik olarak meydana gelir. Sürükleme ve kaldırma kuvvetleri Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 Bir kanat profiline tesir eden kuvvetler

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

3.3.1.1. Sürükleme (drag) katsayısı

Bir objenin şekli sürükleme miktarında çok büyük etkiye sahiptir. Bu nedenle, sürükleme katsayısı bazı akış şartları, eğim ve şekildeki sürüklemeye bağlı olarak, modelin bütünü için aerodinamikçiler tarafından kullanılan bir sayıdır (Güngör,2005).

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

$$C_D = F_D / (0.5 \rho_h v^2 A_D) \quad (3.9)$$

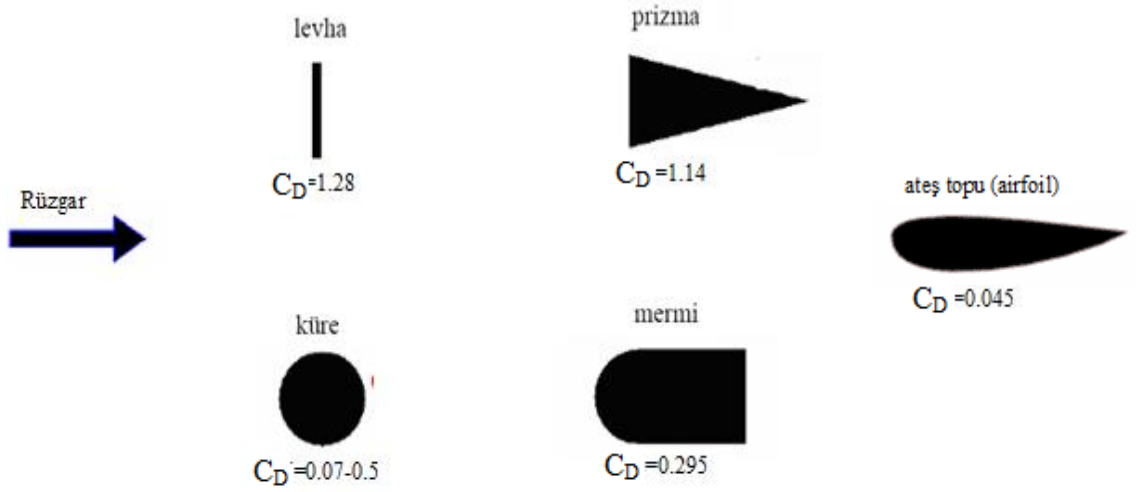
Burada;

F_D : Sürükleme kuvveti (N)

ρ_h : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

v : Rüzgar hızı (m/s)

A_D : Akışa dik kanat alanı (m^2)



Şekil 3.2 Farklı şekillerdeki nesnelerin sürükleme katsayıları

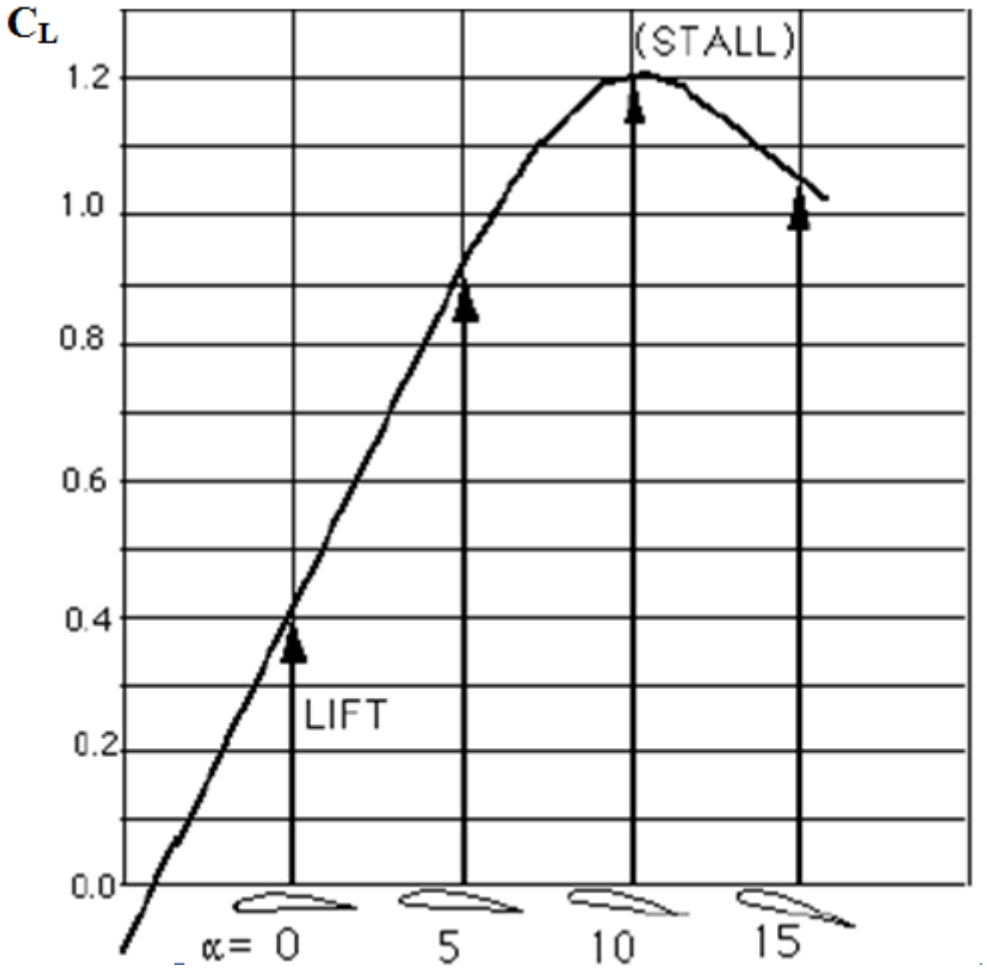
Rüzgar sistemlerinde ve aerodinamik sistemlerde kullanılan farklı profiller Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Glenn araştırma merkezinde, bu değerler hız, yoğunluk ve sürükleme miktarı ölçülen bir rüzgar tünelinde, yerleştirilen bir model üzerinde ampirik olarak tespit edilmiştir. Daha sonra sürükleme eşitliği farklı profiller üzerinde, katsayı üretmek için kullanılmıştır. Her bir profilin ön alanı referans alanı olarak kabul edilmiştir. Düz bir levha için C_D=1.28, akıntıya yönelen kama ile kama şeklindeki prizma C_D=1.14, değişen değerlerle bir küre C_D=0.07-0.5, mermi şeklindeki profil için C_D=0.295 ve son olarak ateş topu (airfoil) olarak anılan şekilde de C_D=0.045 amprik değerler bulunmuştur. Netice itibariyle sürükleme katsayılarının hepsi düşük hızlarda üretilmiş ve karşılaştırmalar sonucunda en yüksek sürükleme akışa dik yönde yerleştirilen düz levhada ve en düşük sürükleme katsayısı airfoil kanat profilinde olduğu tespit edilmiştir.

3.3.1.2. Kaldırma katsayısı

Bir air foil kanat profiline tesir eden kaldırma kuvveti Şekil 3.1'de görüldüğü gibi rüzgar yönüne dikey olarak meydana gelmektedir. Kanat profilleri için kaldırma katsayısı ise;

$$C_L = F_L / (0.5 \rho_h v^2 A_L) \quad (3.10)$$

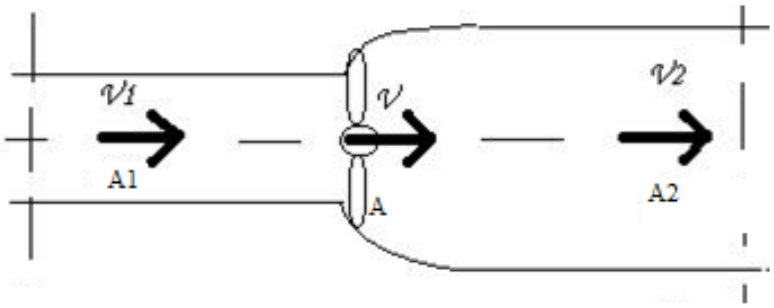
eşitliği ile hesaplanır. Eşitlikte kullanılan L indisi kaldırma kuvvetini ifade etmektedir . Her bir hücum açısı için C_D / C_L değerleri hesaplanır. Bu oranların en büyük olduğu değerdeki hücum açısı değeri, rüzgar türbinlerinden en iyi verim alınabilecek açı değeridir. Şekil 3.3'de bir airfoil kanat profiline tesir eden kaldırma kuvvetinin kanat hücum açısına göre değişimi görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi maksimum kaldırma kuvvetinin 10° hücum açısında oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle yapılan deneyde kanat hücum açısı 10° olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.3 Hücum açısına göre kaldırma (lift) kuvveti katsayısı

3.4. Betz Kanunu ve Güç Katsayısı

Güç katsayısı, rotordan elde edilen gücün, rüzgarın sahip olduğu güce oranı olarak tanımlanır. Bu katsayı aynı zamanda rotor verimini de gösterir (Köse 2002). Güç katsayısını hesaplamak için Şekil 3.4'deki gibi bir kontrol hacmi seçilirse;



Şekil 3.4 Bir rüzgar türbininden geçen hava akımının hızı

Şekil 3.4'de türbin içerisinden geçen havanın debisi, açık havanın sıkıştırılamaz olduğu kabul edilerek süreklilik teoremine göre,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 = \cdots = A_n\, v_n \tag{3.11}$$

olarak yazılabilir.

Türbin tarafından alınan rüzgar gücü P_T ise;

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho_h \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \tag{3.12}$$

olarak yazılabilir. Froude- Rankie teoreminden türbin içindeki ortalama rüzgar hızı,

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \tag{3.13}$$

olarak yazılarak (3.4) de v yerine yazılırsa,

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho_h . A \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \tag{3.14}$$

veya;

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho_h . A \cdot v_1^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right] \tag{3.15}$$

olarak yazılabilir. Türbinin önündeki rüzgar hızı v_1, ölçülen rüzgar hızı olduğundan Eşitlik (3.7) eşitliği ile birlikte dikkate alınırsa;

$$P_T = P_r \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right] \tag{3.16}$$

olarak elde edilir. Yavaşlatma faktörü $n = \frac{v_2}{v_1}$ olarak, tarif edilmekte olup, buna göre denklem (3.12) düzenlenirse;

$$P_T = P_r \cdot \frac{1}{2}(1 + n)(1 - n^2) \tag{3.17}$$

şeklinde elde edilir. Güç katsayısı $C_p = \frac{P_T}{P_r}$ olarak kabul edildiğinden eşitlik;

$$C_P = \frac{1}{2}(1 + n)(1 - n^2) \tag{3.18}$$

olarak bulunur. C_p, rüzgar gücüne karşı koymanın bir sonucudur ve rotor kanatları tarafından oluşturulur. Rotorun güç katsayısı veya rotor etkinliği olarak da adlandırılır. Maksimum C_p'yi bulmak için C_p'nin n'ye göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse,

$$\frac{dc_p}{dn} = \frac{1}{2}(1 - 2n - 3n^2) = 0 \tag{3.19}$$

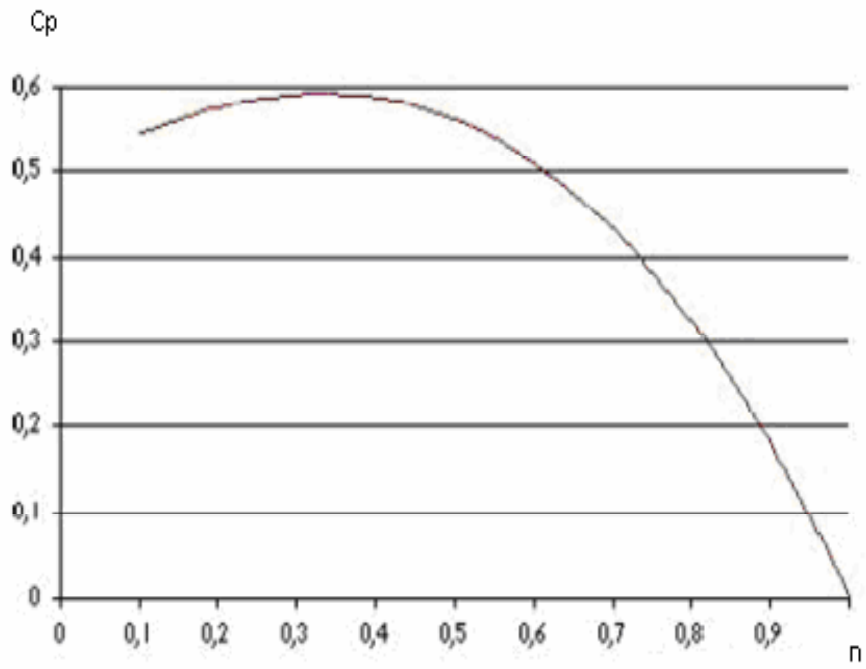
eşitliği elde edilir ve yavaşlatma faktörü $n_1 = 1/3$, $n_2 = -1$ olarak bulunur. Yavaşlatma faktörü n, hiçbir zaman negatif değer olamayacağından, n =1/3 alınır ve (3.18) eşitliğinde yerine konulursa,

$C_{pmax.} = 1/2\ (1+1/3)(1-1/9) = 0{,}5926$

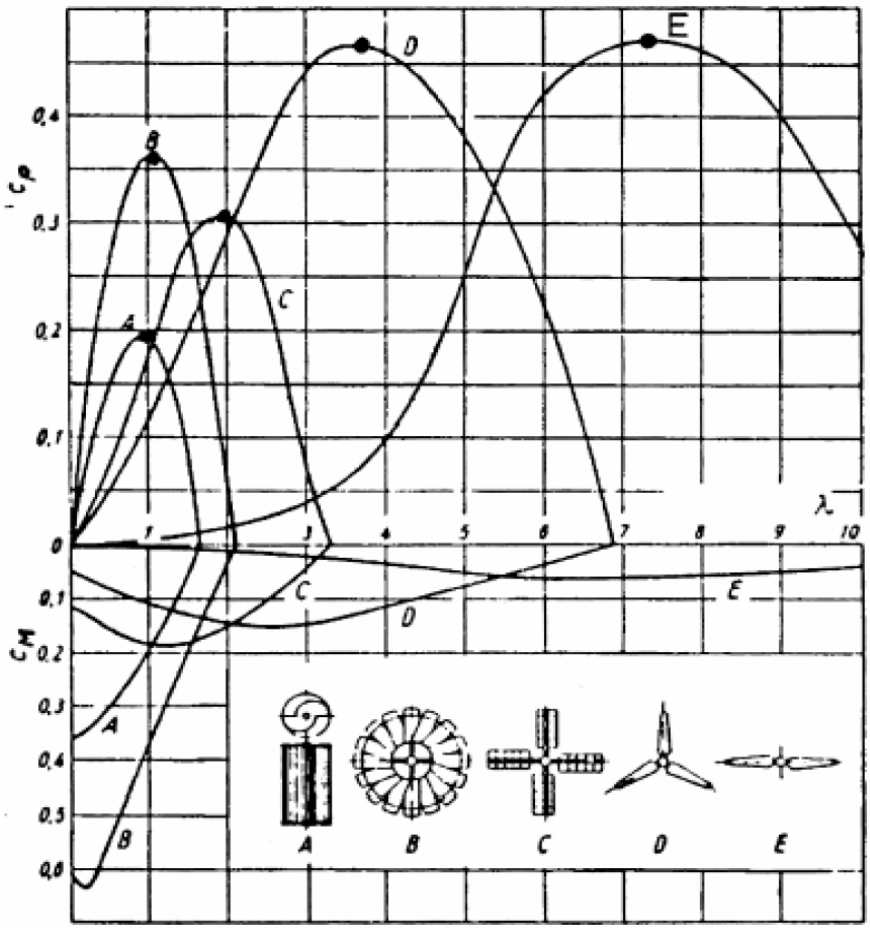
olarak bulunur. Bu da bir rüzgar türbininden elde edilebilecek maksimum verim olarak kabul edilmektedir. İlk defa 1919 yılında Betz tarafından formülize edildiği için Betz Limiti olarak da bilinmektedir. Betz limiti tüm türbin tipleri için geçerlidir. Modern Rüzgar Türbinlerinde C_p değeri 0,40 civarındadır (Walker ve Jenkins,1998).

Güç katsayısı C_p pratik olarak iki kanatlı ve yüksek hızlı sistemlerde %50, düşük hızlı ve çok kanatlı sistemlerde %20-40 arasında değişmektedir.

Yavaşlatma faktörü n ile güç katsayısı C_p arasındaki ilişki Şekil 3.5'de görülmektedir. Şekil 3.6'da farklı konstrüksiyonlardaki rüzgar türbinlerinin uç hız oranı ile kapasite faktörü ve tork katsayıları verilmiştir (Güngör, 2005). Şekil 3.5'de teorik olarak elde edilebilecek maksimum C_p, n = 1/3 için 0,5926, Şekil 3.6'ya göre ise elde edilebilecek maksimum C_p= 0,47 dir. Kanat sayısı 3 olan (D tipi) türbin için uç hız oranı ile kapasite faktörünün değişimi çalışmada kullanılan türbin tipini en iyi temsil etmekte olup bu değerler deneyde ölçülen rüzgar gücü değerlerinden türbin mili gücü (faydalı güç) hesaplanmasında kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Yavaşlatma faktörü ile güç katsayısı ilişkisi



Şekil 3.6 Farklı konstrüksiyonlardaki rüzgar türbinlerinin uç hız oranı ile kapasite faktörü ve tork katsayıları (Güngör, 2005)

Deney sisteminde türbinin Kapasite faktörü değerleri, hesaplanan uç hız oranlarına bağlı olarak Şekil 3.6'daki D tipi türbin için bulunan

$$C_p = -0{,}031*\lambda^2+0{,}2271*\lambda-0{,}07 \quad (3.20)$$

eşitliği ile hesaplandı.

3.5. Kanat Uç Hız Oranı

Kanat uç hız oranı, kanat ucundaki çevresel hızın rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır ve

$$\lambda = \frac{v_ç}{v} \quad (3.21)$$

eşitliği ile hesaplanır.Burada;

$v_ç$: Rotorun çevresel hızı olup (m/s)

$$v_ç = \frac{\pi R n}{30} \quad (3.22)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada;

R : Türbin rotor yarıçapı (m)

n : türbin devir sayısı (dev/dak)

Kanat sayısı ile kanat uç hız oranı (λ) arasındaki ilişki Çizelge 3.1'de, çeşitli türbin tiplerine ait kanat uç hız oranı ile güç katsayısı arasındaki ilişki Şekil 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.1 Kanat sayısı ve uç hız oranı ilişkisi

Kanat Sayısı	Kanat uç hız oranı (λ)
8-24	1
6-12	2
3-6	3
2-4	4
2-3	>5

3.6. Katılık Oranı

Katılık oranı, rotor kanatları yüzey toplamlarının, rotor kanatları süpürme alanına oranı olarak tanımlanır.

$$\sigma = \frac{A'}{A} \quad 3.23)$$

Burada;

A' : Rotor kanatları toplam alanı (m^2)

A : Rotor kanatları süpürme alanı (m^2)

3.7. Faydalı Güç

Türbin rotorundan elde edilen mekanik güç, faydalı güç alarak tanımlanır.

$$P_f = P_r \eta_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta_t \quad (3.24)$$

yazılabilir. Burada;

P_f : Faydalı güç (W)

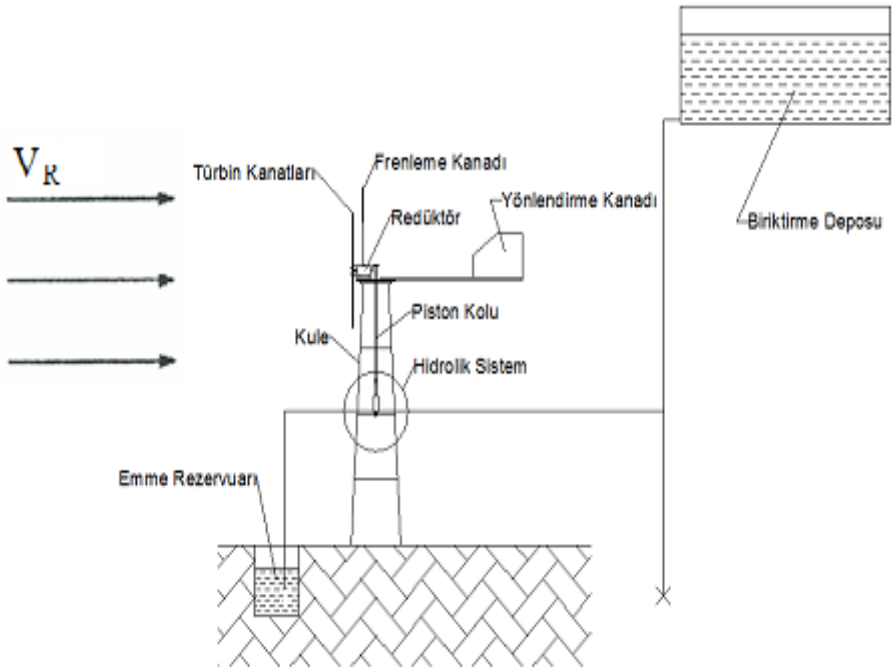
P_r : Rüzgar gücü (W) (Eşitlik 3.6'da verildi.)

η_t: Türbin verimi olup, Bölüm 3.4'de açıklandığı üzere $\eta_t = C_p$ olarak alındı.

3.8. Pistonlu Su Pompalama Sistemi

Yapılan deneysel çalışmada düşük devirlerde istenilen yüksekliğe verimli şekilde su pompalayabilmek için hacimsel verimleri yüksek olan pistonlu pompa kullanımı tercih edildi. Bu kısımda pistonlu pompanın çalıştırılması ile ilgili pompalama kuvveti, güç ve enerji bağıntıları incelendi. Tasarlanan sistemin şematik resmi Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verildi.

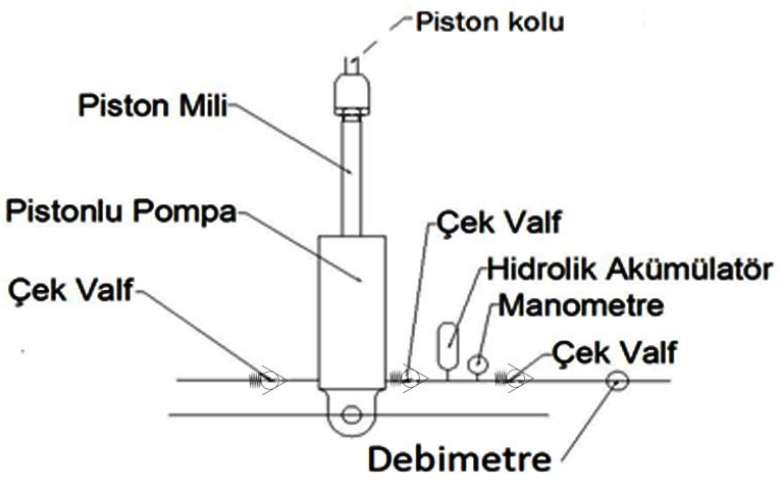
Yeterli rüzgar olduğu zaman rüzgar türbini dönmeye başlamaktadır. Türbin milindeki dönme hareketinin momentinin artırılması amacı ile 25:1 değiştirme oranlı redüktör kullanılmış olup, redüktör çıkış mili üzerine monte edilen eksantrik kol aracılığı ile de dönme hareketi alternatif doğrusal harekete çevrilmektedir. Eksantirik kol üzerine açılan kanal yardımı ile eksantriklik miktarı 45-65 mm istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Eksantrik kol tarafından sağlanan alternatif doğrusal hareket, kullanılan uzatma kolları yardımı ile pompa pistonuna aktarılmaktadır. Piston, silindir içerisinde ayarlanan eksantriklik miktarının iki katı bir strok boyunca hareket ederek pompaya emme ve basma işlemlerini yaptırmaktadır.



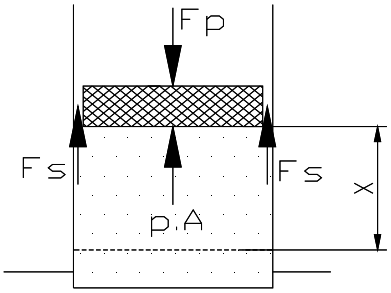
Şekil 3.7 Rüzgar türbini ve pompalama sistemi şematik görünüşü

3.8.1. Piston kolunda oluşan kuvvetler

Pompalama işleminde düşük seviyedeki su, daha yüksek bir seviyeye pompalanarak potansiyel enerjisi artırılmaktadır. Bir başka ifade ile rüzgarın kinetik enerjisi türbin yardımı ile önce mekanik enerjiye, mekanik enerjide pompa yardımı ile suya basınç uygulayarak yükseklik kazandırmak suretiyle potansiyel enerjiye dönüştürülmektedir.



Şekil 3.8 Pompalama sistemi elemanları



Şekil 3.9 Pompa pistonunda oluşan kuvvetler

Sistem, Şekil 3.9'deki gibi düşünülerek pompa pistonu tarafından yapılan iş;

$$W=F_p.X \tag{3.25}$$

Eşitliği ile hesaplanabilir. Burada,

W : pompalama ile yapılan iş (J)

F_p : Piston kolunda oluşan kuvvet (N)

X : Pistonun silindir içerisinde aldığı yol (m)

Piston kolunda oluşan kuvvet;

$$F_p=F_s+\Delta p.A_p \tag{3.26}$$

Burada;

F_s : Silindir ve piston arasındaki sürtünme kuvveti (N).

Piston ve silindir arasındaki sürünme kuvveti bir baskül ve dinamometre yardımı ile pratik olarak ölçüldü. Baskül üzerine yerleştirilen pompanın piston koluna kuvvet uygulanarak birkaç kez emme basma yapıldı. Basma anında baskülde oluşan ağırlık kuvveti 16 kgf, silindir ve piston arasındaki sürtünme kuvveti olarak ölçüldü. Emme stroğunda da silindir, alt ucundan sabitlenip dinamometre ile piston kolu yukarı

çekildi. Bu deneyde de silindir ve piston arasındaki sürtünme kuvveti16 kgf olarak ölçüldü.

Δp: Pistonun ön yüzeyinde oluşan basınç farkı (N/m^2), atmosfer basıncı ile olan fark basınç,

A_p : Pistonun kesit alanı (m^2)

Pistonun ön yüzeyinde oluşan basınç farkı;

$$\Delta p=\rho_s.g.H_m \tag{3.27}$$

Burada;

ρ_s : Pompalanan sıvının (su) yoğunluğu (kg/m^3)

H_m: Toplam manometrik basma yüksekliği (m)

Toplam Manometrik basma yüksekliği, sürtünmesiz akışlar için enerjinin korunumu prensibine göre;

$$H_m = \frac{P_1-P_2}{\rho_s.g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{v_1^2-v_2^2}{2g} + H_k \tag{3.28}$$

Her iki su deposu da atmosfere açık olduğundan $P_1 = P_2$,

Her iki tankın haznesi çok geniş olduğundan $v_1 = v_2 \cong 0$,

$Z_2 - Z_1$: Emme basma tankları kot farkı $= H_s$ olarak yazılırsa

$$H_m = H_s + H_k \tag{3.29}$$

eşitliği bulunur. Burada;

H_s : Emme deposu ile basma deposu arasındaki yükseklik farkı (mss)

H_k : Sürtünme kayıpları ve yerel kayıplar (mSS)

Sürtünme kayıpları H_k;

$$H_k = H_y + H_f \tag{3.30}$$

eşitliği ile verilir. Burada;

Hy : Yerel kayıp yüksekliği (mss)

Hf : Boru içi sürtünme kayıp yüksekliği (mss)

Yerel basınç kaybı;

$$H_y = \sum_{j=1}^{n} K_i \frac{v_i^2}{2g} \tag{3.31}$$

eşitliği ile,

Sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybı da,

$$H_k = \sum_{j=1}^{n} f_j \frac{L_j}{d_i} \frac{v_j^2}{2g} \tag{3.32}$$

eşitliği ile hesaplanır.(3.30) ve (3.31) no'lu eşitlikler düzenlenirse (3.32)no'lu eşitlik;

$$H_m = H_s + \sum_{i=1}^{n} K_i \frac{v_i^2}{2g} + \sum_{j=1}^{n} f_j \frac{L_j}{d_i} \frac{v_j^2}{2g} \tag{3.33}$$

eşitliği elde edilir. Burada;

K_i :Boru bağlantı parçası kayıp katsayısı

v_i : Boru içerisindeki sıvının akış hızı (m/s)

f_j : Boru sürtünme katsayısı

L_j : Eşdeğer boru parçası uzunluğu (m)

v_j : Boru içerisindeki sıvının akış hızı (m/s)

d_i : Boru iç çapı

Boru içerisindeki sıkıştırılamaz akışlar için süreklilik denklemi

$$Q = A.v \tag{3.34}$$

ile akış hızı hesaplanabilir. Burada;

Q : Sıvının hacimsel debisi (m^3/s)

A : Boru kesit alanı (m^2)

v : Sıvı akış hızı (m/s)

f sürtünme faktörü, Reynolds sayısı ve borunun pürüzlülük değerine bağlı olup, Mody diyagramından (EK-J) hesaplanır.

Reynolds sayısı Re;

$$Re = \frac{v\, d_i}{\nu} \tag{3.35}$$

eşitliği ve Bağıl pürüzlülük,

$$\varepsilon/D \tag{3.36}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Burada;

Re : Reynold sayısı

d_i : Boru iç çapı (m)

ε : Borular için eşdeğer pürüzlülük değeri (mm)

D : Hidrolik çap (mm), (Dairesel kesitli borularda D_h= D alınır)

v : Akış hızı (m/s)

ν : Akışkanın kinematik vizkozitesi (Su için 15°C'de $\nu = 10^{-6}$ m^2/s)

Yük kaybı bağıntısı $H_k = f\frac{L}{d}\frac{v^2}{2g}$ ' de kullanılmak üzere dairesel borulardaki tam gelişmiş akışa ait sürtünme faktörü için Moody diyagramı kullanılır.

Türbülanslı akıştaki sürtünme faktörleri Colebrook denklemi

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right) \tag{3.37}$$

ile hesaplanabilir(Çengel 2008).

3.8.2. Pompalarda verimlilik

Verim genel anlamda elde edilen bir değerin, bu değeri elde etmek için harcanan değere oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{\text{Alınan}}{\text{Verilen}} \tag{3.38}$$

Pompalarda verimlilik oldukça önemlidir. Pompalardaki verimlilik genel olarak iki farklı kategoride incelenir.

3.8.2.1. Hacimsel verim

Pompa çıkışında ölçülen gerçek debinin, teorik debiye oranıdır. Yani;

$$\eta_v = \frac{Qö}{Qt} \tag{3.39}$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada;

$Q_ö$: Pompa çıkışında ölçülen debi (l/dak)

Q_t : Pompanın teorik hacimsel debisi(l/dak)

Pompa çıkışındaki debi $Q_ö$, basma hattı üzerinde bulunan debimetre ile 1'er dakika aralıklarla ölçüldü. Aynı zamanda pompanın yapmış olduğu emme-basma sayısı belirlendi. Pompa strok hacmi ile emme-basma sayısı çarpılmak suretiyle de pompa teorik debisi;

$$Q_t = V\, n_p = \frac{\pi D^2}{4} s\, n_p \tag{3.40}$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada;

V =Pompa kurs hacmi (dm^3)

D : Piston çapı (dm)

n_p : Pompalama sayısı (1/dak)

s : Pompa stroğu (dm)

Pompa, türbin redüktörü çıkış milinden alınan hareketle tahrik edildiği için pompalama sayısı n_p, türbin devir sayısı n ve redüktör değiştirme oranı i (25:1) arasındaki ilişki;

$$i = \frac{n}{n_p} \tag{3.41}$$

şeklindedir.

Yaptığımız çalışmada ölçülen debi $Q_ö$, pompa devir sayısı n_p ve pompa silindiri strok hacmi V değerleri kullanılarak hacimsel verim η_v;

$$\eta_v = \frac{Q_ö}{V\, n_p} \tag{3.42}$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Rüzgar türbini devir sayısı n de 3.41 eşitliği kullanılarak

$$n = n_p\, i = \frac{Q_ö}{\eta_v V}\; i = \frac{4Q_ö\, i}{\eta_v \pi D^2 s} \tag{3.43}$$

eşitliği ile hesaplanarak ölçülen değerlerle uygunluğu kontrol edilmiştir.

Burada;

$Q_ö$: Ölçülen debi (L/dak)

D : Pompa silindir çapı (dm)

s : Piston stroğu (dm)

3.8.2.2. Pompa verimi

Pompa toplam verimi, pompa çıkışından elde edilen hidrolik gücün, pompa milindeki mekanik güce oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_p = \frac{P_H}{P_M} \tag{3.44}$$

olarak yazılabilir. Burada;

P_H : Hidrolik güç

P_M : Mekanik güç

Pompalama sisteminden elde edilen hidrolik güç;

$$P_H = \rho_s g H_m Q_t \eta_v = \rho_s g H_m Q_ö \quad (3.45)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada;

ρ_s : Pompalanan sıvının yoğunluğu (kg/m^3)

g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2)

H_m : Manometrik pompalama yüksekliği (m)

Q_t : Teorik pompa debisi (m^3/s)

Pompalama sistemine verilen mekanik güç;

$$P_M = \frac{F_p}{60} \, s \, n_p \quad (3.46)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada;

F_p : Piston koluna uygulanan kuvvet (N)

3.8.2.3. Sistem verimi

Sistemden elde edilen hidrolik gücün (P_H), rüzgar gücüne (P_r) oranı olarak tanımlanırsa;

$$\eta_s = \frac{P_H}{P_r} \quad (3.47)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

3.9. Deney Sistemi

3.9.1. Çalışılacak olan rüzgar enerji sisteminin tanıtımı

Rüzgar gücü, verimli ve ekonomik olarak su pompalamak için kullanılabilir. Suyun depolanması ve gerektiğinde kullanımı mümkündür. Rüzgarla çalışan pompalar elektrik ve içten yanmalı motorlarla çalışan pompalara göre birçok avantaja sahiptir. Rüzgar enerjisi doğada bol miktarda bulunan bedava bir enerji türüdür. Herhangi bir yakıt masrafı söz konusu değildir, yapıları basit olduğundan bakım ve onarım masrafları oldukça azdır. Buna karşılık sistemin ilk maliyeti yüksektir ve çalışması rüzgar hızına bağlıdır.

Yapılan çalışmada rüzgar tahrikli bir su pompalama sistemi tasarlandı. Rüzgar türbin rotor çapı 1,5 m olup 6 kanatlıdır. Kanatlar kompozit malzemeden NACA 4415 airfoil profilinde yapıldı. Rotordan elde edilen dönme hareketinin torkunu artırmak için değiştirme oranı 25:1 olan redüktör kullanıldı. Redüktör çıkış miline bağlanan bir krank kolu yardımı ile tek etkili pistonlu pompa çalıştırıldı. Redüktör miline bağlanan krank kolu eksantrikliği değiştirilebilecek şekilde tasarlanmış olup piston stroku da değiştirilebilmektedir. Pistonun yukarı hareketinde emme, aşağı hareketinde basma yapılmaktadır.

Su, tarlanın alt kısmında 2,5 m derinlikteki kaynaktan alınarak, tarlanın üst kısmında 11,5 m yükseklikteki 18 ton kapasiteli biriktirme tankına pompalanmaktadır. Biriktirme tankı ile tarlanın alt kısmı arasına istenildiği zaman yeterli debide su temin edebilmek amacı ile 50,8 mm çapında, 200 m uzunluğunda plastik boru döşenmiştir. Rüzgar pompası tarafından pompalanan su 12,7(1/2") mm çapında, 25 m uzunluğundaki plastik hortumla 50,8 mm çapındaki ana boru hattına bağlandı. 12,7 mm çapındaki boru hattı üzerine su debisini ölçmek amacı ile 0,0001 m^3/s hassasiyetinde ölçüm yapabilen debimetre (Şekil 3. 24) kullanıldı.

3.9.2. Deneyin yapıldığı ortam ve şartların tanıtımı

Deney yapılan bölge Karaman'ın güney doğu istikametinde, merkeze 14 km uzaklıkta, rakımı yaklaşık 1300 m civarında, hafif eğimli ve dalgalı küçük bir vadidir. Ölçüm yapılan noktanın güneyinde yaklaşık 1400 m rakımlı Oyuklu Tepesi, kuzeyinde vadinin alt kısmında tarihi Habacı Çeşmesi bulunmaktadır. Deney, özel bir şahsa ait tarlanın alt kısmındaki vadi tabanında bulunan küçük debili tabaka suyunun, tarlanın üst kısmına çıkartılması uygulamasıdır. Tarlanın üst kısmına yerleştirilen bir toplama tankına yeterli rüzgar olduğu zaman su pompalaması yapıldı. Bölge, Karaman'ın Toros dağlarına açıldığı bölge olması dolayısı ile genellikle orta şiddetli rüzgarlar sıkça esmektedir. Bölgede özellikle Güney'den esen lodos ve Kuzey'den esen poyraz rüzgarları etkilidir. Bölge ile ilgili çekilen fotoğraflar Şekil 3.10, 3.11, 3.12 ve 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.10 Deney bölgesinin ve sistemin önden (güneyden) görünüşü



Şekil 3.11 Deney bölgesinin ve sistemin arkadan (kuzeyden) görünüşü



Şekil 3.12 Sistemin sağdan ve yön kanadının görünüşü



Şekil 3.13 Sisteminde frenleme levhasının önden görünüşü

3.9.3. Rüzgar türbini ve su pompalama sistemi

Deneysel çalışmada kullanılan rüzgar türbini ve su pompalama sisteminin komple resmi Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verildi.

3.9.3.1. Rüzgar türbini kanat tasarımı ve imalatı

Rüzgar pompalarının performansında kanat profil tasarımlarının önemi büyüktür. 6 kanatlı rüzgar pompası sisteminin kanat profillerinin geliştirilmesinde, standart aerodinamik NACA 4415 profilli kanatlar kullanılmıştır. Kanat profil kalıbı olarak daha önce bir araştırma çalışması olarak hazırlanan kalıplar kullanılmıştır. Kullanılan kalıplar 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Kanat kalıpları

Kanat malzemesi olarak, hafif ve yüksek mukavemet özelliği sebebiyle bir tür cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanıldı. Kanat yapımı için gerekli olan malzemeler (kalıp ayırıcısı, örgülü cam elyafı, polyester ve hızlandırıcı) yeter miktarda temin edildi. Yapılması düşünülen kanat boyutlarından daha büyük cam

elyaf parçalar her bir parça için 3 kat olacak şekilde kesilerek hazırlandı. Her bir kanat iki parçanın birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Dolayısı ile toplam 6x2x3 =36 adet cam elyaf parça hazırlandı. Her bir parça için uygun bir kaba polyester konulup içerisine % 2 hızlandırıcı ve % 5 sertleştirici karıştırıldı. Hazırlıkların tamamlanmasından sonra ilk işlem olarak dişi kalıplara ayırıcı madde yeteri kadar sürülüp bir müddet beklenildi. Ayırıcının sertleşmesinden sonra kalıp boşluğuna polyester sürülüp bunun üzerine kesilen cam elyaf parçalardan bir kat serildi. Üzerine tekrar polyester iyice nüfuz edecek ve aynı zamanda fazla olmayacak şekilde emdirildi. Polyesterin iyi nüfuz etmemesi halinde yapıda hava kabarcıkları oluşmakta ve kanat mukavemetini düşürmektedir. Fazla uygulanması durumunda ise kanat ağırlığı artmaktadır. Bu da istenilmeyen bir durumdur. Bu işlemler her bir tabaka için ayrı ayrı uygulandı. Kalıba yatırma işleminden sonra parçanın katılaşması beklenildi. Bekleme süreleri minimum 4 saat sürdü. Sürenin sonunda katılaşan parçalar kalıplardan çıkarıldı. Kalıplardan çıkarılan parçalar Şekil 3.15'da görülmektedir.



Şekil 3.15 Kalıptan elde edilen kanat parçaları

Kalıptan elde edilen kanat parçalarının fazlalıkları atölyede makasla boyutlarına uygun olarak kesildi. Kesilen bu parçalar alt ve üst olmak üzere çiftler halinde yüz yüze getirilerek birleşim noktalarına yapım için kullanılan polyester

tatbik edilip yapışmaları sağlandı. Bu işlem esnasında parçaların birbirine daha iyi uyumu için belli noktalardan tel ile bağlandı. Gerekli sertleşme sürecinden sonra bir adet kanat elde edilmiş oldu. Bu şekilde elde edilen kanatların dış kısımları düzgün olması için zımparalandı. Kanatların yüzeyinin mümkün olduğu kadar pürüzsüz ve dayanımlı olması için özel vernikle kaplandı. Yapımı tamamlanan kanatların sap kısımlarından kanat bağlama diskine uygun şekilde delinerek kullanılacak duruma getirildi.

3.9.3.2. Hız değiştirme ve güç aktarma sistem tasarım ve imalatı

Su pompalama sistemlerinde genellikle çok kanatlı, düşük devirli rüzgar türbinleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte yapmış olduğumuz çalışmada yaygın kullanımdan farklı olarak daha az kanat sayılı (6 kanatlı) ve yüksek devirli rüzgar türbini kullanıldı (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Türbin rotoru, redüktörü ve krank kolunun görünüşü

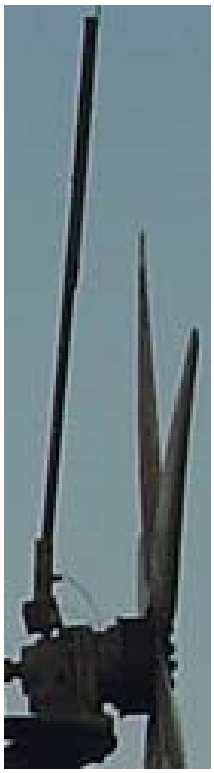
Su pompalama sistemlerinde özellikle ilk harekete geçiş için büyük tork gerekmektedir. Dolayısı ile torku artırabilmek amacı ile helisel dişlili, sabit

değiştirme oranlı, mekanik redüktör kullanıldı. Kullanılan redüktör 25:1 değiştirme oranlı olup, verimi 0.90 alındı. Kullanılan redüktör mekanizması bir elektrik motoruna ait olup, tadilat yapılarak elektrik motoru rotoru yerine türbin rotoru dizayn edildi. Rotor milinin ön ucuna kanat bağlama diski ve kampanalı mekanik fren sistemi dizayn edildi.

3.9.3.3. Fren mekanizması

Hareketli mekanizmalarda mekanizma hareketinin kontrolü güvenlik sebebiyle hareketten daha öncelikli düşünülmesi gereken bir konudur. Bu nedenle, redüktör ve türbin rotoru üzerine yüksek hızlarda türbin hızını yavaşlatarak sistemin zarar görmesini ve çevreye zarar vermesini engellemek amacıyla kampanalı mekanik fren mekanizması dizayn edildi.

Frenleme kuvveti, redüktör üzerinde rüzgara dik olarak yerleştirilen bir plaka vasıtası ile sağlanmaktadır. Frenleme plakası düşük hızlarda bir yay yardımı ile ileri çekilmiş durumda olup fren pasif haldedir. Ancak, rüzgar hızı istenilen değeri geçtiği zaman plaka geriye doğru itilir ve plaka koluna bağlı bulunan frenleme kablosu çekilerek redüktör ön kapağına tespit edilmiş olan fren pabuçlarını germekte, kanat bağlama diskinin arka yüzüne kaynakla birleştirilmiş bulunan fren kampanalarını sıkarak türbin rotorunun hızını yavaşlatmaktadır. Bu şekilde türbin devrinin tehlikeli değerlere ulaşmadan (Rüzgar hızının 25 m/s'den büyük olduğu durumlar) sistemin güvenli şekilde çalışmasını veya istenildiği zaman sistemin durdurulmasını sağlamaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Rotor ve frenleme sistemi yandan görünüşü

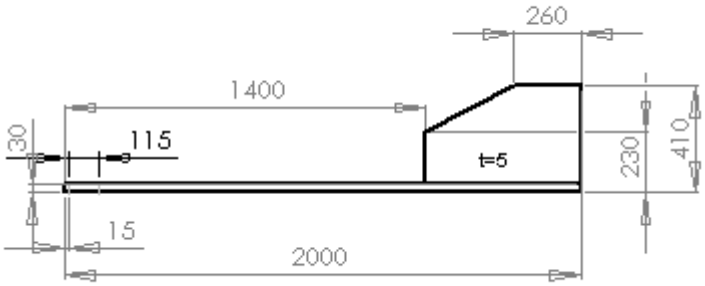
3.9.3.4. Yön değiştirme sistemi tasarım ve imalatı

Yönlendirme sisteminin görevi rüzgar türbinini rüzgara karşı dik olarak tutmaktır. Bu sayede rüzgar enerjisinden maksimum düzeyde istifade edilecektir. Günümüzdeki modern türbinlerde türbini bir yön ölçerden aldığı sinyal ile rüzgara karşı otomatik olarak yönlendiren elektronik ve elektrik düzenekli yav mekanizmaları bulunmaktadır. Bu sistemlerin maliyetleri yüksek olduğundan, çalışmamızda rüzgardan hareket alan mekanik yönlendirme kanadı kullanıldı. Uygulamalarda yönlendirme kanadı büyüklüğü A_{yk}=0,1A olarak tavsiye edilmektedir. Bu durumda kullanılması gereken yönlendirme kanadı alanı;

$$A_{yk} = 0{,}1\ \pi\ D^2/4 = 0{,}1.3{,}14.1{,}5^2/4 = 0{,}177\ m^2$$

olarak bulundu. Türbin tablası kule üzerine kaymalı şekilde yerleştirildiğinden daha fazla yönlendirme kuvvetine ihtiyaç olacağı düşünülerek türbinin rüzgara karşı tutulabilmesi için Şekil 3.18'de görüldüğü gibi 2,0 m uzunluğundaki 30*30 mm'lik

kare profilin arka ucuna profile paralel, zemine ise dikey olacak şekilde 60*41 cm^2 boyutlarında alüminyum plaka uygun boyutlu vidalarla tespit edildi ve rüzgar türbininin karşı tarafına yerleştirildi. Rüzgar, yönlendirme plakasını rüzgara paralel olarak arka tarafta tutarken türbin de ön tarafta rüzgara dik olarak tutulmaktadır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Türbin yönlenlendirme kanadı

Deneylerimiz esnasında yapılan yönlendirme mekanizması ile ilgili herhangi bir sorunla karşılaşılmadı.



Şekil 3.19 Türbin ve yönlendirme kanadı

3.9.3.5. Kule tasarım ve imalatı

Kule, türbini ve pompalama sistemini üzerinde taşıyan ve istenilen rüzgarın türbin tarafından güvenle alınarak mekanik enerjiye çevrilmesini sağlayan kısımdır. Kuleler, genellikle konik kapalı borudan veya profilden kafes biçiminde yapılırlar.

Konik boru kulelerin maliyeti yüksek, kafes kulelerin maliyetleri düşüktür. Eşitlik (3.1)'de de gösterildiği gibi kulenin yüksek olması rüzgar hızı bakımından bir avantaj olmakla birlikte maliyet, kullanılan rotor çapı ve güvenlik faktörü genellikle belirleyici olmaktadır. Büyük boyutlu türbinlerde genellikle rotor çapı ile kule yüksekliği eşit alınır. Ancak küçük boyutlu türbinlerde bu durum güvenlik problemi oluşturacağından, kule yüksekliği belirlemede güvenlik faktörü de göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapılan deneysel çalışmada türbin çapı 1,5 m olmasına rağmen güvenlik nedeniyle kule yüksekliği 3 m olarak tasarlandı. Kule 40x40 mm ölçülü kare profilden, aşağıdan yukarıya doğru daralan, dört ayaklı kafes direk şeklinde kaynatılarak imal edildi. Kulenin üst kısmı ise türbin tablasının bağlanabileceği şekilde dizayn edildi. Kulenin orta kısmına kaynakla bağlanan 25x40 mm'lik destek profili üzerinede pistonlu pompa bağlandı. Pompanın yatay kuvvetler nedeniyle esnemesini önlemek için de pompanın kuleye bağlanabileceği yan bağlantı kolları oluşturuldu.

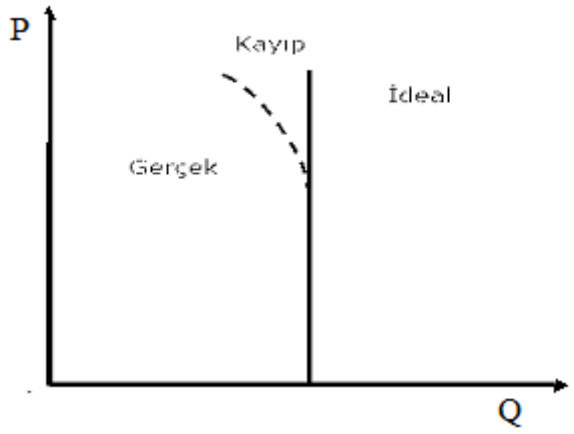


Şekil 3.20 Türbin kulesi

3.9.3.6. Pompa tasarımı ve imalatı

Pompalar mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye çeviren makinalar olarak tanımlanır. Hidrolikte farklı özellik ve yapıda birçok pompa çeşidi kullanılmaktadır.

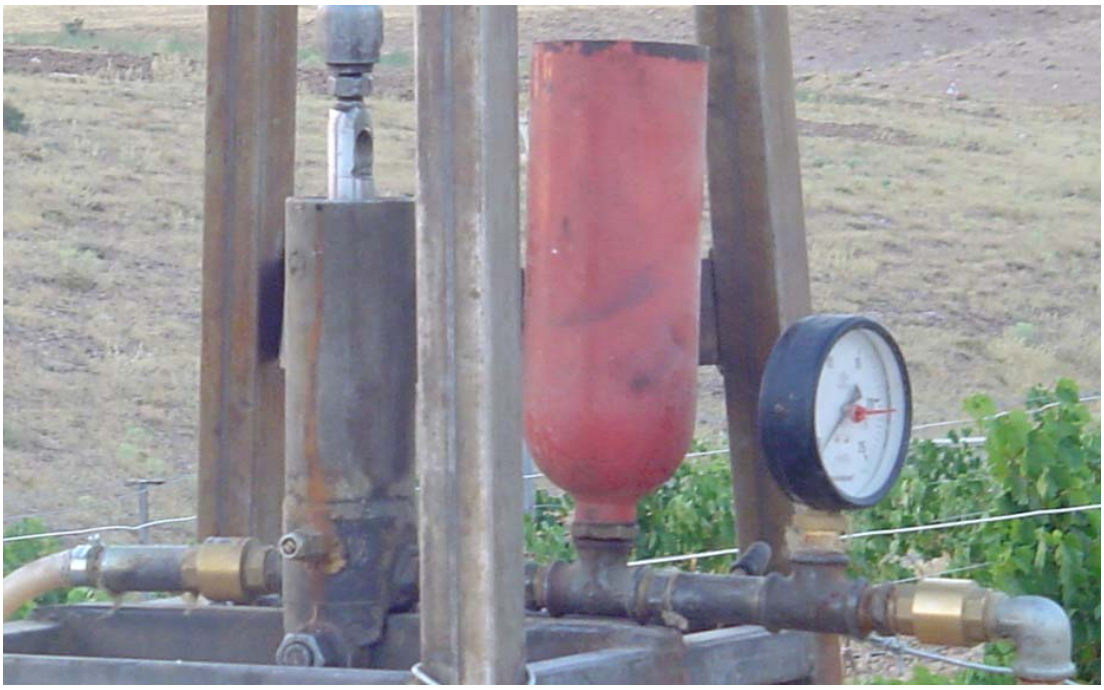
Pompa seçiminde pompalanacak olan akışkan türü, çalışma basıncı, devir sayısı gibi hususlar göz önüne alınmalıdır. Yapacağımız deneysel çalışmada düşük devirde su pompalanacağı için pistonlu pompa kullanılmasına karar verildi. Pistonlu pompalara ait çalışma karakteristiği Şekil 3.21'de gösterildi. Pistonlu pompa tek etkili olarak tanımlanan sadece bir yönden emme ve basma yapabilecek şekilde tasarlandı.



Şekil 3.21 Pistonlu pompalarda çalışma karakteristiği

Pozitif yer değiştirmeli bir pompa olan pistonlu pompalar, her pompa devrinde belirli hacimde sıvıyı pompalarlar. İdeal pozitif yer değiştirmeli pompada akış miktarını (debiyi) etkileyen tek faktör pompanın çalışma hızıdır.

Gerçek pozitif yer değiştirmeli pompalarda basınç arttıkça, basma tarafından emme tarafına kaçaklar artar ve debi miktarında kayıp görülür.



Şekil 3.22 Pompalama sistemi elemanları

Pompa piyasada hazır olarak bulunamadığı için piyasadan sisteme adapte edilebilecek yapıda uygun hidrolik silindir temin edildi. Temin edilen hidrolik silindirin üst kısmı dış çapı 70 mm, iç çapı 60 mm olan özel olarak honlanmış boru hidrolik silindir kullanılarak tadil edildi. Silindir borunun alt uçlarından 12,5 mm çaplı karşılıklı iki adet delik açılıp dıştan dişli 12,7 mm'lik nipel kaynak edildi. Emme ve basma supabı olarak yaylı çekvalfler kullanıldı. Silindir ile piston arasında sızdırmazlık sağlamak amacı ile çift yönlü kauçuk piston keçesi kullanıldı. Pompa, alt kısmındaki bağlantı kulaklarından kule üzerindeki destek profiline monte edildi (Şekil 3.22). Yine pompanın yatay yöndeki hareketlerini engellemek amacıyla pompanın yan yüzeyi üzerinde bağlantı yerleri oluşturularak kuleye tespit edildi.

Hidrolikler sıkıştırılamaz kabul edildikleri için oluşan ani basınç değişimleri sistemin çalışmasını güçleştirir veya sistemde ani darbeler sonucu arızalar oluşabilir. İstenilmeyen durumlarla karşılaşmamak için basınç hattı üzerinde basma supabı çıkışına hidrolik akümülatör olarak isimlendirilen, içerisi hava dolu bir tüp bağlandı (Şekil 3.22). Bu sayede özellikle basma stroğunda ani olarak basıncı yükselen sıvının bir kısmı tüpe dolmakta, basınç hattı basıncı düştükçe sisteme gönderilmektedir. Bu uygulama ile özellikle basma stroğunda tüp içerisindeki hava bir yay gibi çalışarak

sisteme bir esneklik sağlamakta, piston koluna gelecek direnç kuvvetini de azaltmakta ve basma hattında daha düzgün bir su akış hızı sağlamaktadır.

Diğer taraftan çalışmalarımız esnasında karşılaşılan en önemli problem olarak türbinin ilk harekete geçişi görüldü. Sistemin ataleti, pompadaki sürtünme kuvvetleri ve basma yüksekliğindeki sıvı sütununun oluşturduğu karşı basınç türbinin ilk harekete geçmesini zorlaştırmaktadır. Bu sorunu azaltmak amacı ile hidrolik akümülatörden sonra bir adet çekvalf kullanılarak, basma hattındaki sıvı basıncı etkisi azaltılmaya çalışıldı.

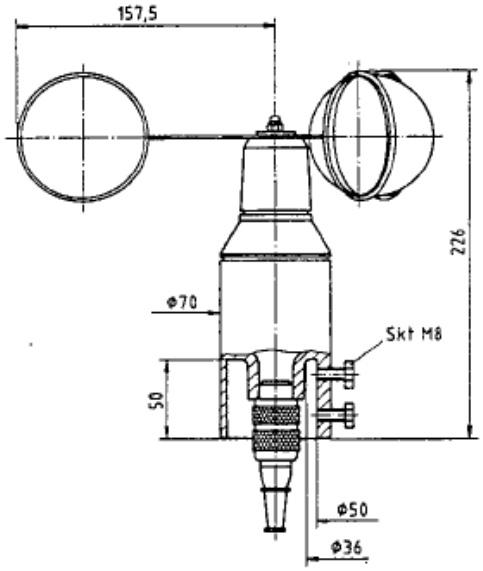
3.9.4. Ölçme ve kontrol sistemi

Yapılan deneydeki fiziksel girdilerin ve çıktıların eş zamanlı olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Burada rüzgar enerjisi girdiyi oluştururken, pompalanan su miktarı (debisi) çıktıyı oluşturmaktadır. Dolayısı ile yaptığımız çalışmada rüzgar hızının ve pompalanan su debisinin sağlıklı bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Ayrıca, sistemin statik ve dinamik basma yüksekliğini ölçmek amacı ile basınç hattı üzerine bir manometre montajı yapıldı.

3.9.4.1. Rüzgar hızı ölçümü

Şekil 3.23'de görüldüğü gibi deneyde rüzgar hızını ölçmek için anemometre kullanılmakta olup, yüksekliği 3 m olan bir direk üzerine ve türbinden etkilenmeyecek bir noktaya yerleştirildi.

Kullanılan anemometre Wilog marka olup, fincanlı tip anemometredir. Anemometrenin kalibrasyonu DEWI Enstitüsü tarafından yapılmıştır. Anemometrede ölçülen rüzgar hızları 5'er saniye aralıklarla ölçülerek, 1'er dakikalık aritmetik ortalamalar şeklinde dataloggere kaydedildi. Anemometreye ait teknik bilgileri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.23 Kullanılan anemometre ve ölçüleri

Çizelge 3.2 Anemometrenin teknik özellikleri (Anonim, 2005)

Ölçüm Aralığı (m/s)	0 – 50
Doğruluk (m/s)	0..15 m/s ± 0.3 m/s,
Çözünürlük (m/s)	0.05
Anemometrenin Kalkış Hızı (m/s)	0.3
Maksimum Ölçtüğü Hız (m/s)	60
Tipi / Malzeme	Fincanlı /Alüminyum
Çalışma Sıcaklığı (^{o}C)	-35 – 80
Besleme 4-18 V DC	0.3 mA
Anemometre Ağırlığı (kg)	1

Datalogger; anemometre, yön kontrol cihazı ve rüzgara ait çeşitli özellikleri ölçen ekipmanlardan gelen verileri depolayan cihazdır. Deneyde Wilog marka datalogger kullanılmış olup, rüzgar hızı zamana bağlı olarak bilgileri depolanmıştır. Dataloggera ait teknik bilgiler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Datalogger cihazının teknik özellikleri (Wilog, 2005m)

Malzeme	Polikarbonat
Boyutlar (mm)	120×200×75
Ağırlık (kg)	1
Besleme	3 adet lityum pil (Li/SOCl2)
Nominal Kapasite (Ah)	13.5
Nominal Voltaj (V)	3.6
Çalışma Sıcaklığı (^{o}C)	-30 /+70

*Data Logger'*a kaydedilen rüzgar hız kayıtları daha sonra bilgisayara aktarılarak listelendi. Deney işlemlerinin tamamlanmasından sonra deneye ait rüzgar hızı ortalama değerleri tespit edilerek tablo halinde sunulmuştur.

3.9.4.2. Pompa debisi ölçümü

Rüzgar türbini tarafından pompalanan su miktarının ölçümü amacıyla mekanik bir debimetre kullanıldı (Şekil3.24). Debimetre 0,0001 m^3/h hassasiyetli ölçüm yapabilir özellikte olup, artımlı bir şekilde debimetreden geçen su miktarı 1'er dakika aralıklarla kaydedildi. Kaydedilen bu değerlerin farkları hesaplanarak pompanın hacimsel debisi l/dak cinsinden belirlendi. Daha sonra bu debi değerleri ile dataloggerdan alınan rüzgar hızları eşleştirilerek ilgili zamana ait rüzgar hızı ve pompa debisi belirlendi.



Şekil 3.24 Debi ölçümünde kullanılan debimetre

3.9.5. Diğer ölçü ve kontrol aletleri

Yaptığımız çalışmada statik ve dinamik basma yüksekliğini belirlemek amacı ile 25 mSS ölçme kapasiteli, 0,5 mss okuma hassasiyetli burdon tüplü manometre kullanıldı (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Basma hattında basınç ölçmede kullanılan manometre

Deney setinde statik emme derinliği, emme rezervuarı ile pompa arasında dikey olarak 2,5 mss ölçüldü. Basma hattı statik yüksekliğinin ölçülmesinde ise manometreden faydalanıldı. Statik basma yüksekliği, basma hattı boruları su dolu fakat pompanın çalışmadığı anda manometrenin göstermiş olduğu basınç değeri 11,5 m olduğundan, statik basma yüksekliği 11,5 mss olarak tespit edildi.

Dinamik emme derinliğinin belirlenmesi için vakum ölçme özelliği olan manometre bulunmadığından hesaplama yöntemi kullanıldı. Dinamik basma yüksekliği piston hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Piston hızı da rüzgar hızı ve krank kolunun konumuna bağlı olarak değişmektedir. Değişime ait karakteristik özellik bölüm 4'de açıklandı.

Debimetrenin okunmasında da kronometre kullanılarak 1'er dakika aralıklarla debi değerleri kaydedildi.

Türbin devrinin ölçülmesinde de el tipi 0,1 dev/dak hassasiyetli sayısal bir takometre kullanıldı.

3.9.6. Pompalama sisteminde kullanılan şebeke elemanları

Pompalama sistemi şebeke dizaynında Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'de verilen tesisat elemanları kullanıldı. Sıvılar tesisat elemanları içerisinde hareket ederken sıvının hızı, tesisat elemanının yüzey pürüzlülüğü ve tesisat elemanlarının geometrik biçimlerine bağlı olarak belirli bir enerji kaybına neden olurlar. Tesisat elemanlarının neden olduğu kayıplar Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'de verildi.

3.9.6.1. Emme hattı şebeke elemanları

Emme şebekesinde kullanılan tesisat elemanları ve neden oldukları kayıp katsayıları Çizelge 3.4'da görülmektedir

Çizelge 3.4 Emme hattında kullanılan şebeke elemanları ve kayıp katsayıları

Elemanın Adı	Çapı	Özellik/Tip	K_K	**Sayı**	Toplam
Emme borusu girişi	12,7	Çıkıntılı giriş	0,80	1	0,80
Boru adaptörü	8	Ani daralma	0,3	1	0,30
Boru adaptörü	8	Ani genişleme	0,38	1	0,38
Boru adaptörü	8	Ani daralma	0,3	1	0,30
Yaylı çekvalf	12,7		5,00	1	5,00
Pompa giriş nipeli	12,7	Ani genişleme	1	1	1,0
Genel Toplam					7,72

3.9.6.2. Basma hattı şebeke elemanları

Basma şebekesinde kullanılan tesisat elemanları ve neden oldukları kayıp katsayıları Çizelge 3.5'de görülmektedir.

Çizelge 3.5 Basma hattında kullanılan şebeke elemanları ve kayıp katsayıları

Elemanın Adı	Çapı mm	Özellik/Tip	K_K	Adet	Toplam K_K
Pompa çıkış nipeli	12,7	Ani daralma	0,5	1	0,5
Yaylı çekvalf	12,7		5,00	1	5,0
Nipel	12,7	Diş açılmış rakor	0,08	1	0,08
T-Dirsek	12,7	Diş açılmış	2,0	1	2
Nipel	12,7	Diş açılmış rakor	0,08	1	0,08
Uzatma parçası	12,7	Diş açılmış rakor	0,08	1	0,08
T-Dirsek	12,7	Diş açılmış	2,0	1	2
Nipel	12,7	Diş açılmış rakor	0,08	1	0,08
Yaylı çekvalf	12,7		5,00	1	5,00
Boru adaptörü	8	Ani daralma ve Genişleme	0,7	1	0,7
Boru adaptörü	8	Ani daralma ve Genişleme	0,7	1	0,7
Debimetre			**5**	**1**	**5**
Boru adaptörü	8	Ani daralma ve Genişleme	0,7	1	0,7
Boru adaptörü	8	Ani daralma ve Genişleme	0,7	1	0,7
Genel Toplam					22,62

3.9.7. Sistemle ilgili yapılan diğer ölçüm ve kabuller

Statik emme derinliği	2,5 mSS
Statik basma yüksekliği	11,5 mSS
Piston-silindir arası sürtünme kuvveti	16 kgf
Pompa hacimsel verimi	% 95
Kinematik vizkozite (Su)	10^{-6} m^2/s
Hava sıcaklığı	20 °C
Hava basıncı (1300 m)	0,85 Atm
Hava yoğunluğu (20 °C, 0,85 Atm.)	1,028 kg/m^3 (Çengel,2004)

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Yapılan çalışmada doğal rüzgar şartlarında kurulan rüzgar türbini tahrikli, piston pompalı su pompalama sisteminde krank kolunun eksantrikliği değiştirilerek 90, 105, 114 ve 127 mm piston stroklarında deneyler yapıldı. Yapılan deneylerde rüzgar hızları ve pompalanan su debileri ölçüldü. Sisteme ait diğer karakteristik değerler bölüm 3'de açıklanan formüller kullanılarak Excell programı yardımı ile hesaplandı. Elde edilen değerler kullanılarak her bir stroğa ait farklı grafikler çizilerek karşılaştırmaları yapıldı.

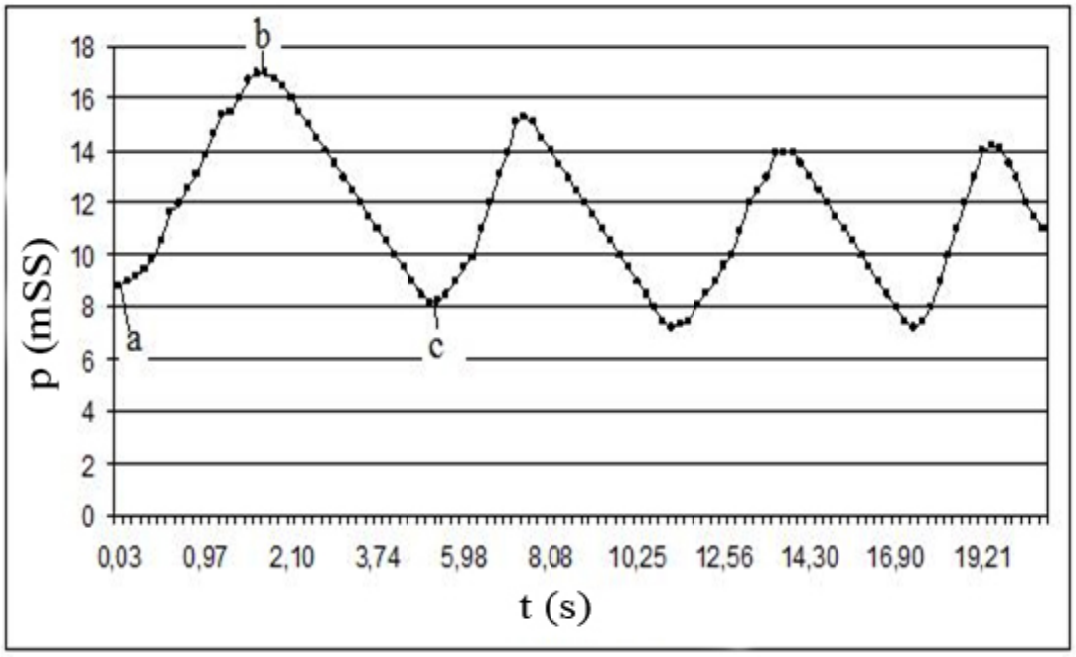
Yapılan deneyde pompalama sisteminin yapısı gereği emme ve basma hattında oluşan basınç sabit olmayıp değişken bir basınç söz konusudur. Basma hattındaki basıncın değişimi bir süre kayıt edilerek pompanın karakteristiği aşağıdaki şekilde tespit edildi.

4.1. Basma Hattındaki Basınç Değişimi

Basma hattında oluşan basınç, bölüm 3'de bahsedildiği üzere sürekli olarak değişmekte olup statik basma yüksekliği ve kayıp yüksekliği toplamına eşittir. Su akış hızı genel olarak rüzgar hızına paralel olarak değişmekle birlikte pompanın her bir devrinde maksimum ve minimum değerler arasında değişmektedir. Söz konusu basınç değişimleri grafiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Basma stroğunda (a-b) basınç yükselmekte, emme stroğunda (b-c) ise basınç düşmektedir. Basma stroğunda basınç piston hızına dolayısı ile rüzgar hızına bağlı olarak değişim gösterirken, emme stroğunda basınç değişimi her strokta aynı formda değiştiği görülmektedir. Emme stroğunda basınç değişiminin düzgün olarak meydana gelmesinin nedeni basma hattı üzerine yerleştirilen hidrolik akümülatör içerisindeki basınçlı havadır. Tüp içerisindeki basınçlı hava burada bir yay görevi görmektedir. Aksi halde pistonlu pompanın basma stroğunda sisteme su basılacak, emme stroğunda ise basılmayacaktı ve pompalama hattında kesintili bir su akışı meydana gelecekti. Hidrolik akümülatörün kullanılmaması durumunda özellikle basma

stroğunda sıvıların sıkıştırılamaması nedeniyle oluşacak ani basınç yükselmesi sistemde istenilmeyen kaza ve arızalara yol açabilir. Basma stroğunda oluşan maksimum basınçların nedeni ise anlık olarak değişen enerji kaynağı rüzgar hızındaki değişmelerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.1 Basma hattındaki basınç değişimi karakteristiği



a b c

Şekil 4.2 Basınç değişimlerinin manometre ile tespiti: a-Basma stroğu başlangıcı, b-Basma stroğu bitimi,emme stroğu başlangıcı c-Emme stroğu bitimi

4.2. Sistemle İlgili Yapılan Hesaplamalar

Yapılan deneysel çalışmada ölçülen rüzgar hızı ve pompa debisi değerleri bölüm 3'de verilen eşitlikler kullanılarak Excel programı ile hesaplandı, aşağıdaki tablolar ve grafikler oluşturuldu

4.2.1.Rüzgar türbini devir sayısının hesaplanması

Eşitlik (3.43) $n = n_p\, i = \frac{Q_ö}{\eta_v V}$ $i = \frac{4Q_ö\, i}{\eta_v \pi D^2 s}$ 'de

i= 25, $\eta_v = 0{,}95$ D = 0,6 dm $Q_ö$: (L/dak) , s : (dm) alınarak

$n = 93{,}073 x Q_ö/s$ eşitliği ile hesaplandı.

4.2.2. Kanat uç hız oranının hesaplanması

Eşitlik (3.20) $\lambda = \frac{v_ç}{v}$ ve eşitlik (3.21) $v_ç = \frac{\pi R n}{30}$ 'de

R = 0,75 m alınarak

$\lambda = 3{,}14 x 0{,}75 x n/30 x v = 0{,}07854 x n/v$ formülü ile hesaplandı.

4.2. 3.Su akış hızının hesaplanması

Eşitlik (3.33) Q = A.v düzenlenirse,

$v = Q/A$ $Q = Q_{ö}$ (m^3/s)

$v= 0{,}001xQ_{ö}\ x4/3{,}14x60xd_i^2$ halini alır. Boru iç çapı d_i =0,0127 m alınarak,

$v = 0{,}131568xQ_{ö}$ eşitliği ile hesaplandı.

4.2. 4. Reynolds sayısının hesaplanması

Eşitlik (3.33) $Re = \frac{v\, d_i}{\nu}$ 'de

$d_i = 0{,}0127$ m $n = 10^{-6}\ m^2/s$ alınarak

Re = 12700xv eşitliği ile hesaplandı.

4.2. 5. Boru sürtünme katsayısının hesaplanması

Moody diyagramından (EK-E) kauçuk(lastik)boru için ε = 0,01 mm alınarak D = 0,0127 m boru çapı için;

f = 0,034 bulundu.

4.2. 6. Manometrik emme derinliğinin hesaplanması

Eşitlik (3.32) $H_{me}= H_{se} + \sum_{i=1}^{n} K_i \frac{v_i^2}{2g} + \sum_{j=1}^{n} f_j \frac{L_j}{d_i} \frac{v_j^2}{2g}$ 'de

H_{se}= 2,5 mss , $K_i = K_e$= 7,72 , $f_j = f$= 0,034 $L_j = L_e$=5 m d_i = 0,0127 m

g = 9,81 m/s^2 $v_i = v_{j=V}$ alınarak

H_{me} =2,5 + 1,07573x v^2 eşitliği ile hesaplandı.

4.2. 7. Manometrik basma yüksekliğinin hesaplanması

Eşitlik (3.32) $H_{mb} = H_{sb} + \sum_{i=1}^{n} K_i \frac{v_i^2}{2g} + \sum_{j=1}^{n} f_j \frac{L_j}{d_i} \frac{v_j^2}{2g}$ 'de

H_s= 11,5 mss , $K_i = K_b$= 22,62 , $f_j = f$= 0,034 $L_j = L_b$=30 m d_i = 0,0127 m

g = 9,81 m/s^2 $v_i = v_{j=V}$ alınarak

H_{me} =11,5 + 5,24643x v^2 eşitliği ile hesaplandı.

4.2. 8. Emme hattında oluşan basınç farkının hesaplanması

Eşitlik (3.26) $\Delta p_e = \rho_s . g . H_m$ 'da

ρ_s=1000 kg/m^3 g= 9,81 m/**s^2** $H_m = H_{me}$yazılarak

Δp_e = 9810 x H_{me} eşitliği ile hesaplandı.

4.2. 9. Basma hattında oluşan basınç farkının hesaplanması

Eşitlik (3.26) $\Delta p_b = \rho_s.g.H_m$ 'da

ρ_s=1000 kg/m^3 g= 9,81 m/s^2 $H_m = H_{mb}$ yazılarak

Δp_b = 9810 x H_{mb} eşitliği ile hesaplandı.

4.2.10. Emme stroğunda piston kolunda oluşan kuvvetin hesaplanması

Eşitlik (3.25) $F_p=F_s+\Delta p.A_p$ 'de

$F_p = F_{pe}$ $F_s = F_{se}$ =16kgf =160 N $\Delta p = \Delta p_e$ A_p= 3,14 x $0,06^2/4$ alınarak

F_{pe} =160 + 0,00283 x Δp_e eşitliği ile hesaplandı.

4.2.11. Basma stroğunda piston kolunda oluşan kuvvetin hesaplanması

Eşitlik (3.25) $F_p=F_s+\Delta p.A_p$ 'de

$F_p = F_{pb}$ $F_s = F_{sb}$ =16kgf =160 N $\Delta p = \Delta p_b$ A_p= 3,14 x $0,06^2/4$ alınarak

Fp_b =160 + 0,00283 x Δp_b eşitliği ile hesaplandı.

4.2.12. Rüzgar gücünün hesaplanması

Eşitlik (3.7) $P_r = 1/2\ \rho_h.A.v^3$ 'de

$\rho_h = 1{,}028\ kg/m^3$ $A=3{,}14x1{,}5^2/4$ $v=v_r$ yazılarak

$P_r = 0{,}9083\ x\ v_r^3$ eşitliği ile hesaplandı .

4.2.13. Faydalı gücün hesaplanması

Eşitlik (3.23) $P_f = P_r\ \eta_t$ 'de

$\eta_t = C_p$ kabul edilerek

$P_f = P_r C_p$ eşitliği ile hesaplandı.

4.2.14. Pompalama sisteminin mekanik gücünün hesaplanması

Eşitlik (3.46) $Pm = \frac{F_p}{60}\ s\ n_p$ 'da

$n_p = n/25$ yazılarak

$P_m = 6{,}67.10^{-4} x F_p\ x\ s\ x\ n$ eşitliği ile hesaplandı.

4.2.15. Pompalama sisteminin hidrolik gücünün hesaplanması

Eşitlik (3.45) $P_H = \rho_s g H_m Q_ö$ 'de

$\rho_s = 1000$ kg/m^3 $g = 9{,}81$ m/s^2 alınarak,

$P_H = 9810 \times Q_ö \times H_m$ eşitliği ile hesaplandı.

4.2.16. Pompalama sisteminin verimi

Eşitlik (3.47) $\eta_s = \frac{P_H}{P_r}$ 'den hesaplandı.

4.2.17. Pompa verimi

Eşitlik (3.44) $\eta_p = \frac{P_H}{P_M}$ 'den hesaplandı.

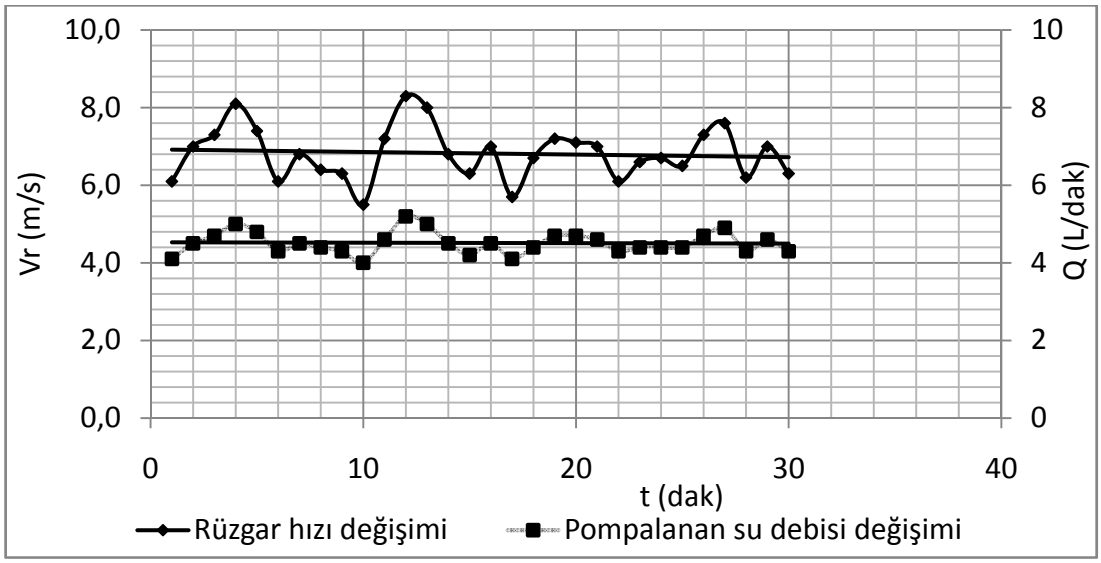
4.3. Ölçülen, Hesaplanan Değerler ve Grafikleri

Yapılan deneylerde ölçülen rüzgar hızı v_r, pompa debisi Q değerleri bölüm 3'de açıklanan yöntemler kullanılarak elde edilen sayısal değerler EK-A, EK-B, EK-C ve EK-D'de verilmiştir.

EK-A, EK-B, EK-C ve EK-D'de verilen sayısal değerler kullanılarak sisteme ait elde edilen çeşitli grafikler Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9'da ve EK-E, EK-F, EK-G, EK-H ve EK-I'de verilmiştir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'deki grafiklerden rüzgar hızı ve pompa debisi arasında doğru orantılı bir değişim olduğu görülmekte. Ancak, düşük rüzgar hızlarında mekanik sürtünmeler nedeni ile pompanın çalışmadığı anlaşılmaktadır. Elektrik üretiminde kalkış için minimum 3 m/s 'lik rüzgar hızları öngörülürken mekanik pompaların ilk harekete geçme hızının 4 m/s ve daha yüksek olduğu görülmektedir. Sistemin ilk harekete geçmesinde atalet kuvvetleri ile birlikte piston ve silindir arasındaki sürtünme kuvvetinin büyüklüğü ve basma hattında mevcut suyun ağırlığı rol oynamaktadır. Sistemde pistona karşı tepki gösteren basma hattındaki suyun etkisinin ortadan kaldırılması için basınç hattı üzerine ilave bir çekvalf kullanıldı. Diğer taraftan pistonla silindir arasındaki sürtünme kuvvetinin azaltılması emme stroğunda sistemin hava almasına ve dolayısı ile çalışmamasına, basma stroğunda ise hacimsel kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle, silindir ve piston arasındaki sürtünme optimum bir çalışma değerinde ayarlandı.

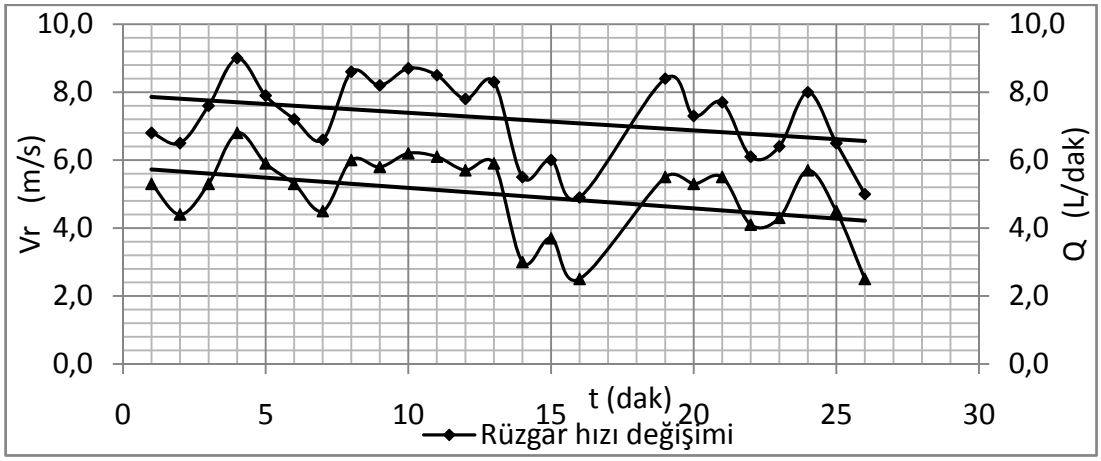
4.3.1. Deneylerde elde ölçülen rüzgar hızı ve pompa debilernin zamana göre değişim grafikleri



Şekil 4.1 Piston stroğunun 90 mm olduğu zamana ait rüzgar hızı Vr ve pompa debisi Q değişimi grafiği

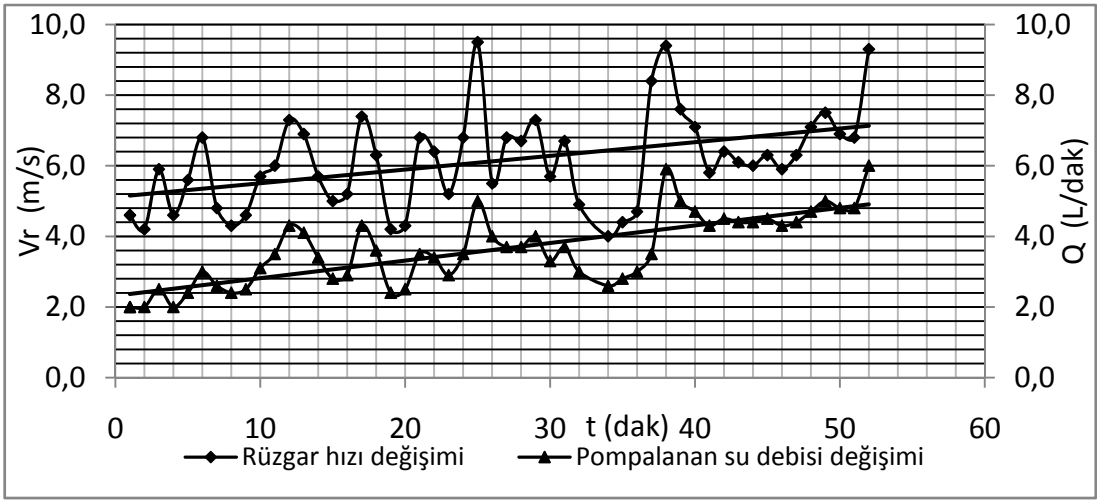
Doğal şartlarda yapılan, pompa stroğunun 90 mm olarak ayarlandığı bu deneyde 1'er dakika aralıklarla toplam 30 adet sonuç alınmıştır. Başlangıç değerleri 0 (sıfır) olduğundan ortalamayı olumsuz etkileyeceği düşüncesi ile hesaplara dahil edilmemiştir. Bu husus diğer deneylerde de aynı şekilde uygulanmıştır.

Deney süresince rüzgar hızı 5,5-8,35 m/s aralığında değişirken, pompa debisinin de rüzgar hızına paralel olarak 4-5,2 L/dak aralığında değiştiği görülmektedir.



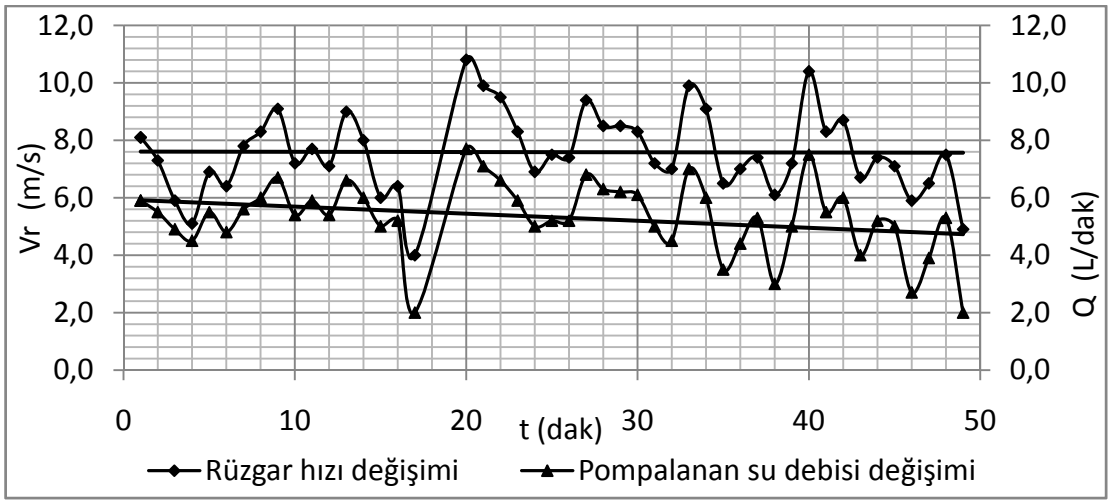
Şekil 4.2 Piston stroğunun 105 mm olduğu zamana ait rüzgar hızı Vr ve pompa debisi Q değişimi grafiği

Şekil 4.2'de de 105 mm piston stroğunda yapılan deneye ait rüzgar hızı ve pompa debisi değişimi gösterilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi deney toplam 26 dakika sürmüş ve 1'er dakika aralıklarla toplam 26 adet sonuç alınmıştır. Burada da rüzgar hızı ile pompalanan su debisinin bir birine paralel olarak değiştiği görülmektedir. Ancak, burada rüzgar hızının zamanla azalma eğiliminde olduğu, ortalama eğilim çizgisinden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3 Piston stroğunun 114 mm olduğu zamana ait rüzgar hızı Vr ve pompa debisi Q değişimi grafiği

114 mm stroklu pompa ile yapılan deneyde de toplam 52 adet sonuç alındığı Şekil 4.3'de görülmektedir. Deney süresince ortalama rüzgar hızının ve pompalanan su debisinin artması söz konusudur.



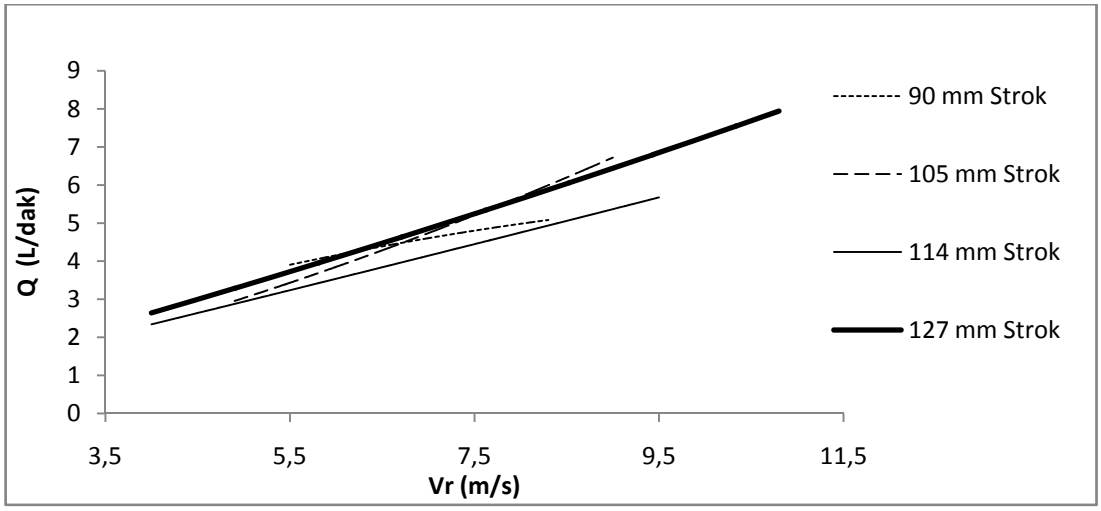
Şekil 4.4 Piston stroğunun 127 mm olduğu zamana ait rüzgar hızı Vr ve pompa debisi Q değişimi grafiği

127 mm stroklu pompa ile yapılan deneye ait rüzgar hızı ve pompa debisi değişim grafiği de Şekil 4.4'de görülmektedir. Yapılan deney 49 dakika sürmüş olup, 49 adet de sonuç alınmıştır. Deneyde minimum 4 m/s, maksimum 11 m/s rüzgar

hızları oluştuğu ve diğerlerine gore dalgalanmanın fazla olduğu görülmektedir. Ortalama rüzgar hızı sabit kalmasına rağmen pompa debisi düşmüştür. Burada çekvalf veya piston keçesi gibi hidrolik elemanlardan birinin yıpranarak hidrolik kaybına neden olabileği düşünülebilir.

4.3.2. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve pompa debisi grafikleri

Yapılan deneysel çalışmaya ait rüzgar hızı ve pompa debisi 1'er dakika aralılarla ölçülerek belirlenmiştir. Yapılan ölçümlere ait değerler EK-A, EK-B, EK-C, EK-D'de verilmiştir. Yine bu değerlere göre deneyde uygulanan stroklar için rüzgar hızı Vr, pompa debisi Q grafikleri çizildi (EK-E). Bu grafiklerden elde edilen ortalama eğilim grafikleri toplu olarak Şekil 4.5'de verildi.



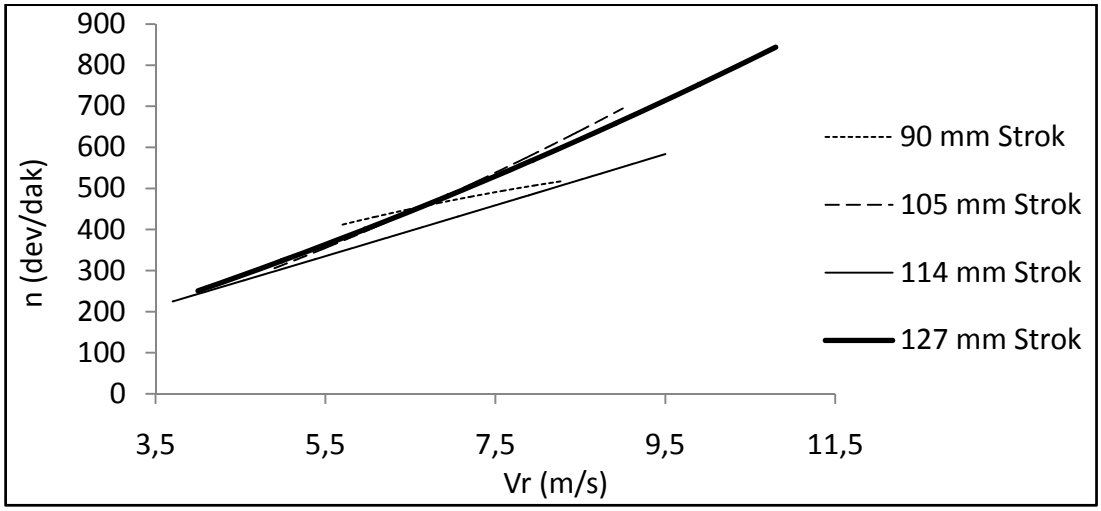
Şekil 4.5 Rüzgar hızı Vr ve pompa debisi Q değişimi

Şekil 4.5'de sisteme ait Vr-Q ilişkisi görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi sistem, yaklaşık olarak 4 m/s ve üzeri olan rüzgar hızlarında çalışmaktadır. Daha düşük hızlar sistemin ataletini yenemediği için ekonomik bir değere sahip değildir. Bütün stroklar için rüzgar hızı artışı ile birlikte pompalanan su debisi de artmaktadır. Ancak, elde edilen eğrilere göre 90 mm strokta, düşük hızlarda debinin diğerlerine

göre daha yüksek, hız yükseldikçe ise daha düşük oldoğu görülmektedir. 127 mm strokta ise bu durumun tersine olduğu görülmektedir. 114 mm stroktada 127 mm'ye uyumlu bir durum söz konusudur.

4.3.3. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve oluşan türbin devir sayısı grafikleri

Deneysel çalışmada rüzgar hızına bağlı olarak oluşan türbin devir sayıları grafikleri her bir strok için ayrı ayrı çizilerek EK-F'de verilmiştir. Sitemin tamamına ait Vr-n grafiği aşağıdaki şekildedir.

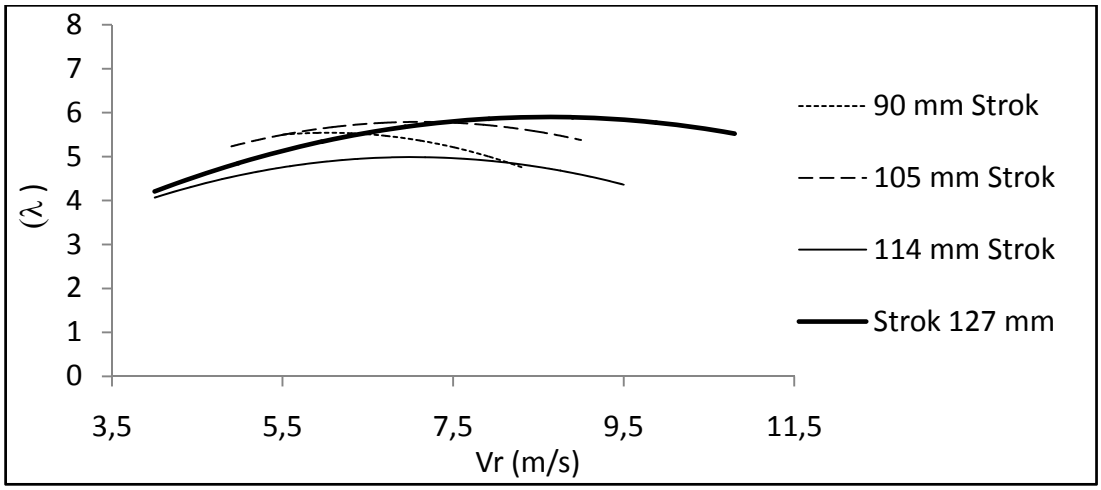


Şekil 4.6 Rüzgar hızı Vr ve türbin devir saysı n değişimi

Şekil 4.6'da rüzgar hızı artışına bağlı olarak türbin devir sayısınında arttığını görmekteyiz. Türbin devir sayıları mevcut çalışma hızlarında 220- 850 dev/dak aralığında gerçekleşmiştir.

4.3.4. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve uç hız oranı grafikleri

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan rüzgar türbinine ait oluşan uç hız oranları değişim grafikleri her bir strok için ayrı ayrı çizilerek EK-G'da verilmiştir. Sistemin genel uç hızı değişimi ise aşağıdaki grafikte görülmektedir.

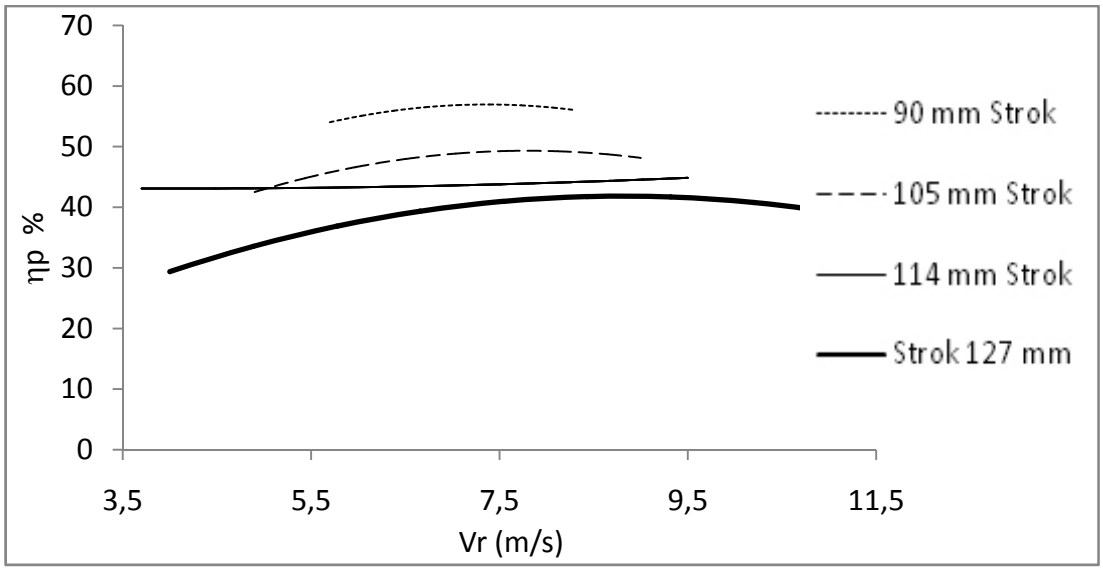


Şekil 4.7 Rüzgar hızı Vr ve türbin uç hızoranı λ değişimi

Sistemde kullanılan rüzgar turbine uç hızı oranları 4-6 arasında değişmektedir. Yaklaşık olarak her dört strok içinde 7,5 m/s rüzgar hızında maksimum uç hız oranına ulaştığı görülmektedir. En yüksek uç hız oranına 105 mm ve 127 mm stroklarda ulaşılmıştır.

4.3.5. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve pompa verimine ait grafikler

Deney sisteminde kullanılan pistonlu pompanın verimliliğini anlayabilmek için her bir strok için v_r-η_p grafikleri EK-H'de verildi. Sisteme ait v_r -η_p değişimi toplu olarak aşağıda görülmektedir.

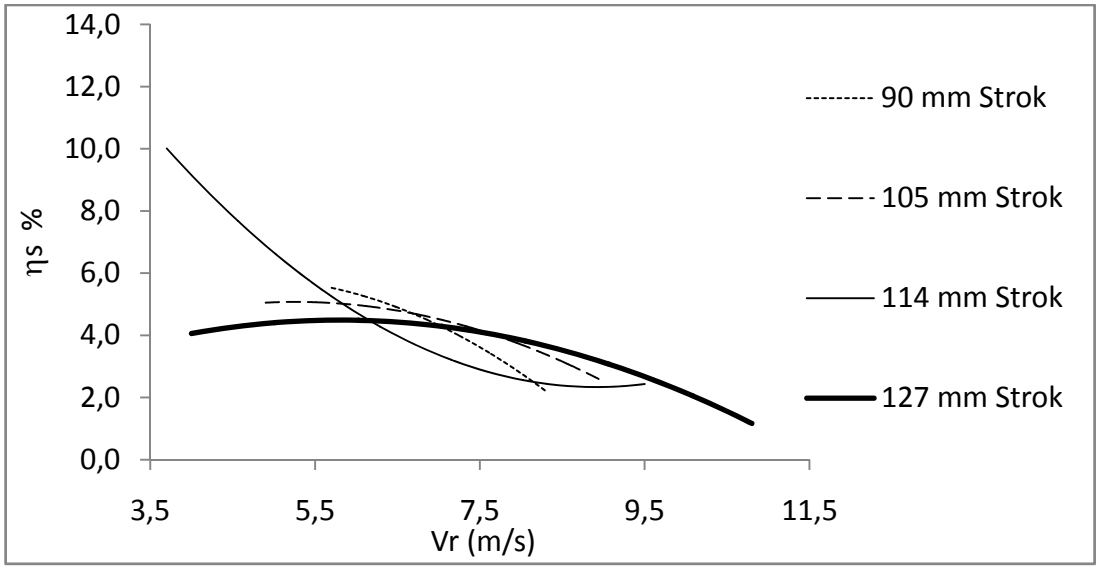


Şekil 4.8 Rüzgar hızı Vr ve pompa verimi η_p değişimi

Şekil 4.8'de deneyde kullanılan stroklar için rüzgar hızına bağlı olarak pompa verim değişimleri görülmektedir. Deneyde pompa verimi %30 -%55 aralığında elde edilmiştir. Grafiktende görüeceği gibi pompa verimi düşük hızlarda düşük iken belirli bir hıza (~7,5 m/s) kadar artarak maksimum değere ulaşmakta sonara düşmeye başlamaktadır. Düşük hızlarda pompa veriminin düşük olmasının nedeni sürtünme için harcanan kuvvetlerin oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan yüksek devir sayılarında aerodinamik direncin artması, hacimsel verimin azalması gibi nedenlerle pompa verimi azalmaktadır. En yüksek verime 90 mm strokta ulaşılıken en düşük verime ise 127 mm strokta ulaşılmıştır. Diğer iki stroktaki verimler sıra ile bu aralıkda yer almaktadır. 90 mm, 105 mm ve 127 mm strokta verim değişim karakterleri benzerlik göstermekle birlikte 114 mm farklı görünmektedir.

4.3.6. Deneylerde elde edilen rüzgar hızı ve sistem verimine ait grafikler

Çalışılan sistemin verim değişimini anlayabilme için her stroğa ait verim grafikleri çizilerek EK-I'de verilmiştir. Rüzgar hızına bağlı olarak sistem verim değişimi toplu toplu olarak aaşağıdaki şekildedir.



Şekil 4.9 Rüzgar hızı $_{Vr}$ ve system verimi η_s değişimi

Şekil 4.9'da yapılan deneysel çalışmada elde edilen sistem verimlerinin rüzgar hızı ile değişimi görülmektedir. Burada 90 mm, 105 mm ve 127 mm verimkarakterleri benzeşmekle birlikte 114 mm stroktaki verim karakteri farklı görünmektdir. Diğer üç strok göz önüne alınırsa, sistem veriminin %6- %2 aralığında değiştiği söylenebilir. Genel olarak sistem verimi düşük rüzgar hızlarında maksimum düzeyde iken yüksek rüzgar hızlarında özellikle 7,5 m/s'den sonra düşmektedir. Bu da sistemin 7,5 m/s'den daha yüksek hızlarda uygun olmadığı anlaşılmaktadır.

4.4. Yapılan Deneyde Elde Edilen Ortalama Değerler

Yapılan deneysel çalışmaya ait ortalama önemli değerler Çizelge 4.1'de hesaplanmıştır. Rüzgar hızı doğal olarak oluştuğundan çok fazla aralıklı hızlarda sonuç alınamamıştır. Deneyler 4-11 m/s rüzgar hızlarında gerçekleşmiştir. Uç hız oranları, kapasite faktörü ve sistem verimi gibi karakteristik değerler 90 mm, 105

mm ve 127 mm değerleri oldukça birbirine yakın değerlerdedir. Sisteme ait ortalama değerler ağırlıklı ortalama metoda göre hesaplanarak Çizelge 4.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Yapılan deneysel çalışmada bulunan ortalama değerler

Hesaplanan Büyüklük	Strok (mm) / Deney sayısı				**Gn.Ort**
	90/30	105/26	114/52	127/49	
Rüzgar Hızı (m/s)	6,9	7,2	6,2	6,7	**6,7**
Debi (l/dak)	4,5	5,0	3,6	4,6	**4,3**
T. Devir Sayısı	468,6	516,2	374,4	478,8	**448,5**
Uç hız oranı (λ)	5,4	5,5	4,8	5,6	**5,3**
Kapasite faktörü (Cp)	25	23	29	24	**26**
Reynolds sayısı (Re)	7585,0	8345,0	6088,5	7727,5	**7259,7**
Manometrik basma yüksekliği	16,283	16,9	15,6	16,4	**16,2**
Toplam ∑F (N)	771,4	789,0	752,3	776,2	**769,5**
P_r (W)	301,4	369,2	242,1	283,1	**287,3**
P_f (W)	75,3	92,3	60,5	70,8	**71,8**
P_m (W)	21,6	29,0	21,6	31,9	**26,0**
P_h (W)	12,1	14,0	9,5	12,6	**11,7**
η_p **%**	56,4	48,0	44	39,4	**45,6**
η_s **%**	4,3	4,1	4,9	4,2	**4,4**

HATA ANALİZİ

Yapılan deneysel çalışmada bulunan sonuçların hata oranını hesap edebilmek için hata analizi yapılmıştır. Bu nedenle sistem verimine etki eden faktörler dikkate alınmıştır.

Sistem verimi $\eta_s = \frac{P_H}{P_r}$ olarak tanımlanmıştı. Buradan

$$\eta_s = \frac{\rho_s g H m Q ö}{1/2\ \rho_h . A . v3} = \frac{1000x9{,}81xHm.Qö}{0{,}5.1{,}028.\pi.1{,}5^2.v^3/4}$$

$$\eta_s = 10800{,}24 \ \frac{\mathrm{HmQ\ddot{o}}}{\mathrm{v3}}$$

eşitliği elde edilir ve üç adet değişken bulunmaktadır. Bunlar manometrik basma yüksekliği H_m, pompa debisi $Q_{ö}$ ve rüzgar hızı v'dir. Sistemdeki toplam belirsizliği (hatayı) belirleyebilmek için Kline ve McClintock yöntemine göre η_s eşitliğinin her üç büyüklüğe göre kısmi türevleri alınarak,

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial H_m} = 10800{,}24 \frac{\mathrm{Q\ddot{o}}}{\mathrm{v3}}, \qquad \frac{\partial \eta_s}{\partial Q_{ö}} = 10800{,}24 \frac{\mathrm{Hm}}{\mathrm{v3}}, \qquad \frac{\partial \eta_s}{\partial v} = -32400{,}6 \frac{\mathrm{HmQ\ddot{o}}}{\mathrm{v4}}$$

eşitlikleri bulundu.

Deney sisteminde kullanılan ölçme cihazlarına ait hata payları;

Rüzgar hız ölçeri anemometre (0-15 m/s) ± 0, 3

Debimetre (0-0,0010 m^3/s) de 0,0001 m^3/s olursa hata payı ± 0,1 m^3/s

Manometre (0-25 mSS) ± 0,5 mSS olarak tespit edildi.

Deneysel sisteme ait ortalama değerler;

v = 6,66 m/s

H_m=16,2 mSS,

$Q_{ö} = 7{,}17.10^{-5}$ m^3/s ,

η_s= % 4,4

değerleri dikkate alınarak

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial H_m} = 10800{,}24 \frac{Q_{ö}}{v^3} = 10800{,}24 \frac{7{,}17.10-5}{6{,}66^3} = 2{,}62.10^{-3}$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial Q_{ö}} = 10800{,}24 \frac{\mathrm{Hm}}{v^3} = 10800{,}24 \frac{16{,}2}{6{,}66^3} = 591{,}9665$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial v} = -32400{,}6 \frac{\mathrm{HmQ\ddot{o}}}{\mathrm{v^4}} = -32400{,}6 \frac{16{,}2.7{,}17.10-5}{6{,}66^4} = -0{,}019$$

değerleri hesplandı. Ölçme aletlerinin hata miktarları da

w_{Hm}=0,5 mSS, $w_{Qö}$ = 0,1 m^3/s w_v=0,3 m/s

olarak dikkate alındığı zaman sistemin hata payı;

$w_{\eta s} = [(\frac{\partial \eta_s}{\partial H_m})^2 . (w_{Hm})^2 + (\frac{\partial \eta_s}{\partial Q\ddot{o}})^2 . (w_{Q\ddot{o}})^2 + (\frac{\partial \eta_s}{\partial v})^2 . (w_v)^2]^{1/2}$

$w_{\eta s} = [(2{,}62.10^{-3})^2 . (0{,}5)^2 + (591{,}9665)^2 . (0{,}0001)^2 + (-0{,}019)^2 . (0{,}3)^2]^{1/2}$

$w_{\eta s} = [(1.7161.10^{-6}) + (3504.10^{-6}) + (32{,}49.10^{-6})]^{1/2}$

$w_{\eta s} = 0{,}059$

$\eta_s = \%\ 4{,}4 \pm 0{,}059$

$\%\ \text{Hata} = \frac{w_{\eta s}}{\eta_s} = (0{,}059/4{,}4) = \%\ 1{,}35$

olarak bulundu.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yapılan deneysel çalışmada bulunan ortalama karakteristik değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Deneyler sırasında rüzgar hızı doğal olarak oluştuğundan sistemin karakteristiği hakkında tatmin edici bir sonuç çıkarılamamıştır. Deney sonuçları için çizilen grafiklerden ve yapılan hesaplamalardan sistemin karakteristiğini belirleyen λ, C_p, η_p, η_s göz önüne alınarak, pompa piston strokunun 90 mm, 105 mm ve 127 mm değerlerinin birbirlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Burada 114 mm strokta elde edilen değerler diğer üç strok değerine göre daha farklıdır. Çalışmada deneyin uzun bir sürede gerçekleşmesi nedeni ile sisteme ait bazı parçaların özelliklerinin değişmiş olabileceği düşünülebilir.

Sonuç olarak ortalama rüzgar hızının düşük olduğu bölgelerde küçük stroklu pompalar, yüksek olduğu bölgelerde de yüksek stroklu pompalar tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Aras, H. 2003 Wind energy status and its assessment in Turkey. Renewable Energy 28: 2213-220.
2. Aras, H. Yılmaz, V.Çelik, H.E. 2001. Afyon ilinin rüzgar hız verilerinin weibull dağılımına uyumu. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Kayseri, 12-13 Ekim.
3. Arıkan,C. 2007 Enerji Bağımsızlığı için yenilenebilir enerji, Bilgi Çağı 36: 14-15.
4. Arsan, L. 2007 Yenilenebilir enerji gelişiyor, bilişimin katkısı ne olacak, Bilgi Çağı 36: 20-25
5. Atlıhan, A.B. 2006. Rüzgar Enerjisi ve Dirrieus Rüzgar Çarklarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
6. Ayhan, M. 2007 Rüzgar türbini ve rüzgar çiftliği uygulamaları için öneriler. Termodinamik 178: 68-80.
7. Bilgili, M. Şahin, B. Kahraman, A. 2004 Wind energy potential in Antakya and Iskenderun Regions, Turkey. Renewable Energy 29: 1733-1745.
8. Birol, F. 2007 Alternatif enerji kaynaklarıtek başına yeterli olamaz; gaza, kömüre ve nükleer enerjiye ihtiyaç duyulacak. Bilgi Çağı 36: 16-18.
9. Borhan,Y. 1998 Mesoscale interactionson wind energy potential in the northem Aegean region: a case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2: 353-360.
10. Çalışkan, M. 2003 Rüzgar Enerji Potansiyelininbelirlenmesi. Yeni veYenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, 3-4 Ekim.
11. Durak, M. Şen, Z. 2002 Wind power potential in Turkey and Akhisar case study, Renewable Energy 25: 463-472.
12. Elhadidy, M.A., Shaahid, S.M. 2007 Wind resource assessmentof eastern coastal region of Saudi Arabia. Desalination 209: 199-208.
13. Gökçek, M., Bayülken, A., Bekdemir, Ş. 2007 İnvestigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli,Turkey. Renewable Energy 32:1739-1752.
14. Güngör, K. 2005. Rüzgar Pompası Tasarımı ve Prototip İmalatı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
15. Karaata, S., Ekmekci, U. 2002. Wind Energy and Technological Diffussion Process in Turkey. For the conference held in Slovenia in September.
16. Köse, F., Özgören, M. 2005 Rüzgar enerjisi potansiyeli ölçümü ve rüzgar türbini seçimi. Mühendis ve Makine 551: 20-30.
17. Köse, R., Özgür, M.A., Erbaş, O.,Tuğcu, A. 2004 The analysisof wind data and wind energy potential in Kutahya,Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews 8: 277-288.
18. Meishen, Li., Xianguo, Li. 2005 İnvestigation of wind characteristics and assessment of wind energy potential for Waterloo region, Canada, Energy Conversion and Management 46: 3014-3033.
19. Oğuzer,C. 2001 Rüzgar Ölçüm Sistemlerinin Esasları. Rüzgar Enerjisi Sempozyumu, Kayseri, 5-7 Nisan.
20. Özdamar, A.,Kavas,M.G. 1999. Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı Üzerine Bir Araştırma. Güneş Günü Sempozyumu'99, Kayseri, 25-27 Haziran.

21. Özdamar, A.,Gürsel, K.T.,Orer, G., Pekbey,Y. 2004 Investigation of the potential of wind-waves as a renewable energy resource: by the example of Çeşme-Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews 8: 581-592.
22. Yıldız, O. 2002. Sulama Amaçlı Bir Yatay Eksenli Rüzgar türbininin Dizaynı ve İmalatı. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
23. Öztopal, A., Şahin, A.D., Akgün, N.,Şen, Z. 2000 On the regional wind energy potential of Turkey. Energy 25: 189-200.
24. Sayındı, M. 1994. Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbini Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
25. Şen,Z., Şahin, A.D. 1998 Regional wind energy evaluation in some parts of Turkey. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76: 345-353.
26. Şimşek,V. 2007. Rüzgar Enerjisi ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
27. Tetik,Z.S. 2004. Rüzgar Enerjisi ve Rüzgardan Faydalanmada Rüzgar Türbini Teknolojileri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
28. Toklu, M. Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2002.
29. Tolun, A.L.B. 2001 Wind data evaluation and treatment of measured data. Rüzgar Enerjisi Sempozyumu, İzmir, 5-7 Nisan.
30. Türksoy,F. 2001 Rüzgar Verisi Ölçümü ve Analizi, Rüzgar Enerjisi Sempozyumu, Kayseri, 5-7 Nisan.
31. Uçar,S. 2007. Rüzgar Enerjisi ile Elektrik üretimi ve Kayseri İli İçin Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
32. Uğuz, S. 2005. Rüzgar Enerjisi ile Elektrik Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
33. Ültanır, M.Ö. 2006 İklim ve Enerji İlişkisinden Nükleere Uzanan Yol. Kamu'da Soyal Politika 1: 3-8.
34. Yalçın, U. 2007. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanarak Rüzgar Enerjisi Santral Seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, istanbul.
35. www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr
36. www.eie.gov.tr
37. www.epdk.gov.tr
38. www.enerji.gov.tr
39. (http://teamneta.com/meteoroloji.html

EKLER:

EK-A Pistonlu pompa strokunun 90 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar
EK-B Pistonlu pompa strokunun 105 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar
EK-C Pistonlu pompa strokunun 114 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar
EK-D Pistonlu pompa strokunun 127 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar
EK-E Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına gore pompalanan su debi grafikleri
EK-F Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre türbin devir sayısı grafikleri
EK-G Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre türbin uç hız oranı grafikleri
EK-H Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre pompa verim grafikleri
EK-I Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre sistem verim grafikleri
EK- J Moody diyagramı

Rüzgar Hızı (m/s)	Debi (L/dak)	T. Devir Sayısı (dev/dak)	Uç hız oranı (λ)	Su akış hızı (m/s)	Re	f	Hme (m)	Hmb (m)	∆pe (N/m2)	∆pb (N/m2)	Fpe (N)	Fpb (N)	∑F (N)	Pr (W)	Pf (W)	Pm (W)	Ph (W)	Cp	ηp %	ηs %	EK-A Pistonlu pompa strokunun 90 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar
5,5	4	414	5,9	0,53	6731	0,034	2,8	13	27468	127530	237,73	520,91	759	151	28,8	19	10	19	53	6,6	
5,7	4,1	424	5,8	0,54	6858	0,034	2,8	13	27468	127530	237,73	520,91	759	168	34,3	19	11	20	58	6,5	
6,1	4,1	424	5,5	0,54	6858	0,034	2,8	13	27468	127530	237,73	520,91	759	206	49,7	19	11	24	58	5,3	
6,1	4,3	445	5,7	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,46	764	206	44,8	20	11	22	55	5,3	
6,1	4,3	445	5,7	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,46	764	206	44,8	20	11	22	55	5,3	
6,2	4,3	445	5,6	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,46	764	216	49,6	20	11	23	55	5,1	
6,3	4,3	445	5,5	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,46	764	227	54,8	20	11	24	55	4,8	
6,3	4,2	434	5,4	0,55	6985	0,034	2,8	13,1	27468	128511	237,73	523,69	761	227	57,3	20	11	25	55	4,8	
6,3	4,3	445	5,5	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,46	764	227	54,8	20	11	24	55	4,8	
6,4	4,4	455	5,6	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	238	54,6	21	12	23	57	5,0	
6,5	4,4	455	5,5	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	249	60,1	21	12	24	57	4,8	
6,6	4,4	455	5,4	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	261	65,9	21	12	25	57	4,6	
6,7	4,4	455	5,3	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	273	71,8	21	12	26	57	4,4	
6,7	4,4	455	5,3	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	273	71,8	21	12	26	57	4,4	
6,8	4,5	465	5,4	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	286	72,2	21	12	25	57	4,2	
6,8	4,5	465	5,4	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	286	72,2	21	12	25	57	4,2	
7,0	4,5	465	5,2	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	312	85,1	21	12	27	57	3,8	
7,0	4,5	465	5,2	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,24	770	312	85,1	21	12	27	57	3,8	
7,0	4,6	476	5,3	0,61	7747	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,79	775	312	82	22	12	26	55	3,8	
7,0	4,6	476	5,3	0,61	7747	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,79	775	312	82	22	12	26	55	3,8	
7,1	4,7	486	5,4	0,62	7874	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,79	775	325	82	23	13	25	57	4,0	
7,2	4,6	476	5,2	0,61	7747	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,79	775	339	92,4	22	12	27	55	3,5	
7,2	4,7	486	5,3	0,62	7874	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,79	775	339	89,1	23	13	26	57	3,8	
7,3	4,7	486	5,2	0,62	7874	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,79	775	353	96,3	23	13	27	57	3,7	
7,3	4,7	486	5,2	0,62	7874	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,79	775	353	96,3	23	13	27	57	3,7	
7,4	4,8	496	5,3	0,63	8001	0,034	2,9	13,6	28449	133416	240,51	537,57	778	368	96,7	23	13	26	57	3,5	
7,6	4,9	507	5,2	0,64	8128	0,034	2,9	13,6	28449	133416	240,51	537,57	778	399	109	24	13	27	54	3,3	
8,0	5	517	5,1	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,12	786	465	131	24	14	28	58	3,0	
8,1	5	517	5	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,12	786	483	140	24	14	29	58	2,9	
8,3	5,2	538	5,1	0,68	8636	0,034	3	13,9	29430	136359	243,29	545,9	789	519	146	25	14	28	56	2,7	
6,9	**4,5**	**468,6**	**5,4**	**0,6**	**7585,**	**0,034**	**2,88**	**13,4**	**28279,9**	**131251,0**	**240,0**	**531,4**	**771,4**	**301,4**	**78,3**	**21,6**	**12,1**	**25**	**56**	**4,3**	**Ort.**

Rüzgar Hızı (m/s)	Debi (L/dak)	T. Devir Sayısı (dev/dak)	Uç hız oranı (λ)	Su akış hızı (m/s)	Re	f	Hme (m)	Hmb (m)	∆pe (N/m2)	∆pb (N/m2)	Fpe (N)	Fpb (N)	∑F (N)	Pr (W)	Pf (W)	Pm (W)	Ph (W)	Cp	ηp %	ηs %	**EK-B Pistonlu pompa strokunun 105 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar**
2,8	1,0	103	2,9	0,13	1651	0,034	2,5	11,6	24525	113796	229,4	482	711	20	6,56	5	2	33	40	10,0	
4,9	2,5	259	4,2	0,33	4191	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,2	495,9	728	107	36,1	13	6	34	46	5,6	
5,0	2,5	259	4,1	0,33	4191	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,2	495,9	728	114	38,8	13	6	34	46	5,3	
5,5	3,0	310	4,4	0,39	4953	0,034	2,7	12,3	26487	120663	235	501,5	736	151	49,7	16	7	33	44	4,6	
6,0	3,7	383	5	0,49	6223	0,034	2,8	12,8	27468	125568	237,7	515,4	753	196	56,9	20	9	29	45	4,6	
6,1	4,1	424	5,5	0,54	6858	0,034	2,8	13	27468	127530	237,7	520,9	759	206	49,7	23	11	24	48	5,3	
6,4	4,3	445	5,5	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,7	526,5	764	238	57,4	24	11	24	46	4,6	
6,5	4,4	455	5,5	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,5	529,2	770	249	60,1	25	12	24	48	4,8	
6,5	4,5	465	5,6	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,5	529,2	770	249	57,2	25	12	23	48	4,8	
6,6	4,5	465	5,5	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,5	529,2	770	261	63	25	12	24	48	4,6	
6,8	5,3	548	6,3	0,7	8890	0,034	3	14,1	29430	138321	243,3	551,4	795	286	37,3	31	15	13	48	5,2	
7,2	5,3	548	6	0,7	8890	0,034	3	14,1	29430	138321	243,3	551,4	795	339	59,9	31	15	18	48	4,4	
7,3	5,3	548	5,9	0,7	8890	0,034	3	14,1	29430	138321	243,3	551,4	795	353	67,3	31	15	19	48	4,2	
7,6	5,3	548	5,7	0,7	8890	0,034	3	14,1	29430	138321	243,3	551,4	795	399	86,7	31	15	22	48	3,8	
7,7	5,5	569	5,8	0,72	9144	0,034	3,1	14,2	30411	139302	246,1	554,2	800	415	84,8	32	16	20	50	3,9	
7,8	5,7	589	5,9	0,75	9525	0,034	3,1	14,5	30411	142245	246,1	562,6	809	431	82,2	34	16	19	47	3,7	
7,9	5,9	610	6,1	0,78	9906	0,034	3,2	14,7	31392	144207	248,8	568,1	817	448	72,5	35	17	16	49	3,8	
8,0	5,7	589	5,8	0,75	9525	0,034	3,1	14,5	30411	142245	246,1	562,6	809	465	95	34	16	20	47	3,4	
8,2	5,8	600	5,7	0,76	9652	0,034	3,1	14,5	30411	142245	246,1	562,6	809	501	109	34	17	22	50	3,4	
8,3	5,9	610	5,8	0,78	9906	0,034	3,2	14,7	31392	144207	248,8	568,1	817	519	106	35	17	20	49	3,3	
8,4	5,5	569	5,3	0,72	9144	0,034	3,1	14,2	30411	139302	246,1	554,2	800	538	141	32	16	26	50	3,0	
8,5	6,1	631	5,8	0,8	10160	0,034	3,2	14,9	31392	146169	248,8	573,7	822	558	114	36	18	20	50	3,2	
8,6	6,0	620	5,7	0,79	10033	0,034	3,2	14,8	31392	145188	248,8	570,9	820	578	126	36	18	22	50	3,1	
8,7	6,2	641	5,8	0,82	10414	0,034	3,2	15	31392	147150	248,8	576,4	825	598	122	37	18	20	49	3,0	
9,0	6,8	703	6,1	0,89	11303	0,034	3,4	15,7	33354	154017	254,4	595,9	850	662	107	42	21	16	50	3,2	
7,2	**5,0**	**516,2**	**5,5**	**0,7**	**8345,0**	**0,034**	**3,0**	**13,9**	**29389,1**	**136318,1**	**243,2**	**545,8**	**789,0**	**369,2**	**78,3**	**29,0**	**14,0**	**23**	**48**	**4,1**	**Ort.**

EK-C Pistonlu pompa strokunun 114 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar

Rüzgar Hızı (m/s)	Debi (l/dak)	T. Devir Sayısı (dev/dak)	Uç hız oranı (λ)	Su akış hızı (m/s)	Re	f	Hme (m)	Hmb (m)	∆pe (N/m2)	∆pb (N/m2)	Fpe (N)	Fpb (N)	∑F (N)	Pr (W)	Pf (W)	Pm (W)	Ph (W)	Cp	ηp %	ηs %
3,7	2,5	259	5,5	0,33	4191	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,18	495,9	728	46	11,1	14	6	24	43	13,0
4,0	2,6	269	5,3	0,34	4318	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,18	495,9	728	58	15,2	15	6	26	40	10,3
4,2	2,0	207	3,9	0,26	3302	0,034	2,6	11,9	25506	116739	232,18	490,4	723	67	23,1	11	5	34	45	7,5
4,2	2,4	248	4,6	0,32	4064	0,034	2,6	12	25506	117720	232,18	493,1	725	67	21,4	14	6	32	43	9,0
4,3	2,4	248	4,5	0,32	4064	0,034	2,6	12	25506	117720	232,18	493,1	725	72	23,3	14	6	32	43	8,3
4,3	2,5	259	4,7	0,33	4191	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,18	495,9	728	72	22,5	14	6	31	43	8,3
4,4	2,8	290	5,2	0,37	4699	0,034	2,6	12,2	25506	119682	232,18	498,7	731	77	21	16	7	27	44	9,1
4,6	2,0	207	3,5	0,26	3302	0,034	2,6	11,9	25506	116739	232,18	490,4	723	88	30,4	11	5	35	45	5,7
4,6	2,0	207	3,5	0,26	3302	0,034	2,6	11,9	25506	116739	232,18	490,4	723	88	30,4	11	5	35	45	5,7
4,6	2,5	259	4,4	0,33	4191	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,18	495,9	728	88	29	14	6	33	43	6,8
4,7	3,0	310	5,2	0,39	4953	0,034	2,7	12,3	26487	120663	234,96	501,5	736	94	25,6	17	7	27	41	7,4
4,8	2,6	269	4,4	0,34	4318	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,18	495,9	728	100	32,9	15	6	33	40	6,0
4,9	3,0	310	5	0,39	4953	0,034	2,7	12,3	26487	120663	234,96	501,5	736	107	31,1	17	7	29	41	6,5
5,0	2,8	290	4,6	0,37	4699	0,034	2,6	12,2	25506	119682	232,18	498,7	731	114	36,3	16	7	32	44	6,1
5,2	2,9	300	4,5	0,38	4826	0,034	2,7	12,3	26487	120663	234,96	501,5	736	128	41,5	17	7	32	41	5,5
5,2	2,9	300	4,5	0,38	4826	0,034	2,7	12,3	26487	120663	234,96	501,5	736	128	41,5	17	7	32	41	5,5
5,5	4,0	310	4,4	0,53	6731	0,034	2,8	13	27468	127530	237,73	520,9	759	151	49,7	18	10	33	56	6,6
5,6	2,4	248	3,5	0,32	4064	0,034	2,6	12	25506	117720	232,18	493,1	725	160	55,2	14	6	35	43	3,8
5,7	3,1	321	4,4	0,41	5207	0,034	2,7	12,4	26487	121644	234,96	504,3	739	168	55,3	18	8	33	44	4,8
5,7	3,4	352	4,9	0,45	5715	0,034	2,7	12,6	26487	123606	234,96	509,8	745	168	50,1	20	9	30	45	5,4
5,7	3,3	341	4,7	0,43	5461	0,034	2,7	12,5	26487	122625	234,96	507	742	168	52,5	19	8	31	42	4,8
5,8	4,3	445	6	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,5	764	177	31,3	26	11	18	42	6,2
5,9	2,5	259	3,4	0,33	4191	0,034	2,6	12,1	25506	118701	232,18	495,9	728	187	64,3	14	6	34	43	3,2
5,9	4,3	445	5,9	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,5	764	187	35,7	26	11	19	42	5,9
6,0	3,5	362	4,7	0,46	5842	0,034	2,7	12,6	26487	123606	234,96	509,8	745	196	61,3	21	9	31	43	4,6
6,0	4,4	455	6	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,2	770	196	34,6	27	12	18	44	6,1

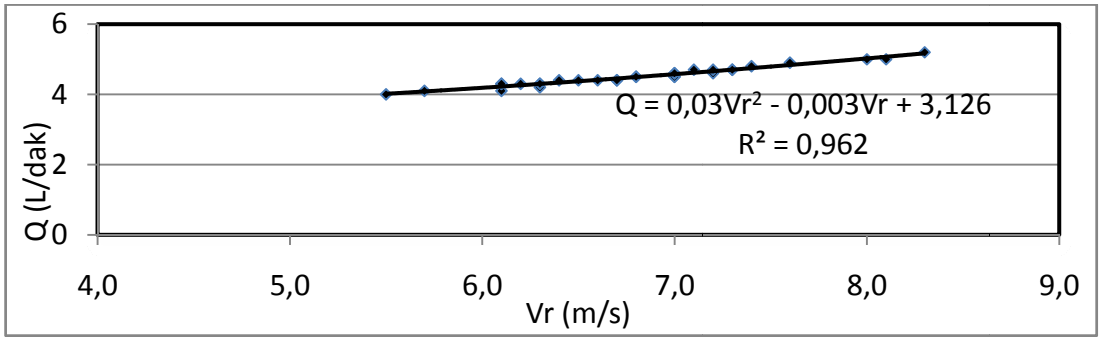
Rüzgar Hızı (m/s)	Debi (L/dak)	T. Devir Sayısı (dev/dak)	Uç hız oranı (λ)	Su akış hızı (m/s)	Re	f	Hme (m)	Hmb (m)	∆pe (N/m^2)	∆pb (N/m^2)	Fpe (N)	Fpb (N)	∑F (N)	Pr (W)	Pf (W)	Pm (W)	Ph (W)	Cp	ηp %	ηs %	**EK-C (Devamı) Pistonlu pompa strokunun 114 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar**
6,1	4,4	455	5,9	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,	770	206	39,3	27	12	19	44	5,8	
6,3	3,6	372	4,6	0,47	5969	0,034	2,7	12,7	26487	124587	234,96	512,	748	227	72,3	21	9	32	43	4,0	
6,3	4,5	465	5,8	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,	770	227	46,4	27	12	20	44	5,3	
6,3	4,4	455	5,7	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,	770	227	49,3	27	12	22	44	5,3	
6,4	3,4	352	4,3	0,45	5715	0,034	2,7	12,6	26487	123606	234,96	509,	745	238	79,3	20	9	33	45	3,8	
6,4	4,5	465	5,7	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,	770	238	51,7	27	12	22	44	5,0	
6,7	3,7	383	4,5	0,49	6223	0,034	2,8	12,8	27468	125568	237,73	515,	753	273	88,5	22	9	32	41	3,3	
6,7	3,7	383	4,5	0,49	6223	0,034	2,8	12,8	27468	125568	237,73	515,	753	273	88,5	22	9	32	41	3,3	
6,8	3,0	310	3,6	0,39	4953	0,034	2,7	12,3	26487	120663	234,96	501,	736	286	98,9	17	7	35	41	2,4	
6,8	3,5	362	4,2	0,46	5842	0,034	2,7	12,6	26487	123606	234,96	509,	745	286	96,4	21	9	34	43	3,1	
6,8	3,5	362	4,2	0,46	5842	0,034	2,7	12,6	26487	123606	234,96	509,	745	286	96,4	21	9	34	43	3,1	
6,8	3,7	383	4,4	0,49	6223	0,034	2,8	12,8	27468	125568	237,73	515,	753	286	94,1	22	9	33	41	3,1	
6,8	4,8	496	5,7	0,63	8001	0,034	2,9	13,6	28449	133416	240,51	537,	778	286	62,1	29	13	22	45	4,5	
6,9	4,1	424	4,8	0,54	6858	0,034	2,8	13	27468	127530	237,73	520,	759	298	91,1	25	11	31	44	3,7	
6,9	4,8	496	5,6	0,63	8001	0,034	2,9	13,6	28449	133416	240,51	537,	778	298	68,4	29	13	23	45	4,4	
7,1	4,7	486	5,4	0,62	7874	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,	775	325	82	29	13	25	45	4,0	
7,1	4,7	486	5,4	0,62	7874	0,034	2,9	13,5	28449	132435	240,51	534,	775	325	82	29	13	25	45	4,0	
7,3	4,3	445	4,8	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,	764	353	108	26	11	31	42	3,1	
7,3	4,0	414	4,5	0,53	6731	0,034	2,8	13	27468	127530	237,73	520,	759	353	114	24	10	32	42	2,8	
7,4	4,3	445	4,7	0,57	7239	0,034	2,8	13,2	27468	129492	237,73	526,	764	368	115	26	11	31	42	3,0	
7,5	5,0	517	5,4	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,	786	383	96,7	31	14	25	45	3,7	
7,6	5,0	517	5,3	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,	786	399	105	31	14	26	45	3,5	
8,4	3,5	362	3,4	0,46	5842	0,034	2,7	12,6	26487	123606	234,96	509,	745	538	185	21	9	34	43	1,7	
9,3	6,0	620	5,2	0,79	10033	0,034	3,2	14,8	31392	145188	248,84	570,	820	731	199	39	18	27	46	2,5	
9,4	5,9	610	5,1	0,78	9906	0,034	3,2	14,7	31392	144207	248,84	568,	817	754	213	38	17	28	45	2,3	
9,5	5,0	517	4,3	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,	786	779	260	31	14	33	45	1,8	
6,2	**3,6**	**374,4**	**4,8**	**0,5**	**6088,5**	**0,034**	**2,8**	**12,8**	**27141,**	**125625,**	**236,8**	**515,**	**752,**	**242,**	**70,5**	**21,6**	**9,5**	**29**	**43**	**4,9**	**Ort**

Rüzgar Hızı (m/s)	Debi (L/dak)	T. Devir Sayısı (dev/dak)	Uç hız oranı (λ)	Su akış hızı (m/s)	Re	f	H_{me} (m)	H_{mb} (m)	Δp_e (N/m^2)	Δp_b (N/m^2)	F_{pe} (N)	F_{pb} (N)	$\sum F$ (N)	P_r (W)	P_f (W)	P_m (W)	P_h (W)	Cp	η_p %	η_s %	**EK-D Pistonlu pompa strokunun 127 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar**
4,0	2,0	207	4,1	0,26	3302	0,034	2,6	11,9	25506	116739	232,18	490,4	723	58	19,72	13	5	34	38	8,6	
4,9	2,0	207	3,3	0,26	3302	0,034	2,6	11,9	25506	116739	232,18	490,4	723	107	36,58	13	5	34	38	4,7	
5,9	2,7	279	3,7	0,36	4572	0,034	2,6	12,2	25506	119682	232,18	498,7	731	187	64,68	17	7	35	41	3,7	
6,1	3,0	310	4	0,39	4953	0,034	2,7	12,3	26487	120663	234,96	501,5	736	206	70,53	19	7	34	37	3,4	
6,4	4,8	496	6,1	0,63	8001	0,034	2,9	13,6	28449	133416	240,51	537,6	778	238	38,51	33	13	16	39	5,5	
6,5	3,5	362	4,4	0,46	5842	0,034	2,7	12,6	26487	123606	234,96	509,8	745	249	81,94	23	9	33	39	3,6	
6,5	3,9	403	4,9	0,51	6477	0,034	2,8	12,9	27468	126549	237,73	518,1	756	249	74,32	26	10	30	38	4,0	
6,7	4,0	414	4,9	0,53	6731	0,034	2,8	13	27468	127530	237,73	520,9	759	273	81,49	27	10	30	37	3,7	
6,9	5,5	569	6,5	0,72	9144	0,034	3,1	14,2	30411	139302	246,06	554,2	800	298	28,73	39	16	10	41	5,4	
6,9	5,0	517	5,9	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,1	786	298	56,85	35	14	19	40	4,7	
7,0	4,5	465	5,2	0,59	7493	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,2	770	312	85,08	30	12	27	40	3,8	
7,0	4,4	455	5,1	0,58	7366	0,034	2,9	13,3	28449	130473	240,51	529,2	770	312	87,95	30	12	28	40	3,8	
7,1	5,4	558	6,2	0,71	9017	0,034	3	14,1	29430	138321	243,29	551,4	795	325	47,57	38	15	15	39	4,6	
7,1	5,0	517	5,7	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,1	786	325	70,62	35	14	22	40	4,3	
7,2	5,4	558	6,1	0,71	9017	0,034	3	14,1	29430	138321	243,29	551,4	795	339	54,85	38	15	16	39	4,4	
7,2	5,0	517	5,6	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,1	786	339	77,83	35	14	23	40	4,1	
7,2	5,0	517	5,6	0,66	8382	0,034	3	13,8	29430	135378	243,29	543,1	786	339	77,83	35	14	23	40	4,1	
7,3	5,5	569	6,1	0,72	9144	0,034	3,1	14,2	30411	139302	246,06	554,2	800	353	57,12	39	16	16	41	4,5	
7,4	5,2	538	5,7	0,68	8636	0,034	3	13,9	29430	136359	243,29	545,9	789	368	79,96	36	14	22	39	3,8	
7,4	5,3	548	5,8	0,7	8890	0,034	3	14,1	29430	138321	243,29	551,4	795	368	75,2	37	15	20	41	4,1	
7,4	5,2	538	5,7	0,68	8636	0,034	3	13,9	29430	136359	243,29	545,9	789	368	79,96	36	14	22	39	3,8	
7,5	5,2	538	5,6	0,68	8636	0,034	3	13,9	29430	136359	243,29	545,9	789	383	87,94	36	14	23	39	3,7	

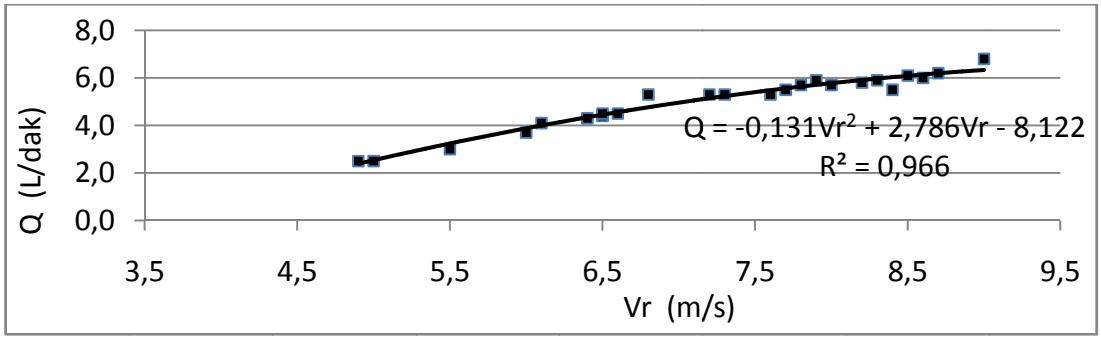
EK-D (Devamı) Pistonlu pompa strokunun 127 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar

Rüzgar Hızı (m/s)	Debi (l/dak)	T. Devir Sayısı (dev/dak)	Uç hız oranı (λ)	Su akış hızı (m/s)	Re	f	Hme (m)	Hmb (m)	Δpe (N/m2)	Δpb (N/m2)	Fpe (N)	Fpb (N)	∑F (N)	Pr (W)	Pf (W)	Pm (W)	Ph (W)	Cp	ηp %	ηs %	
7,5	5,3	548	5,7	0,7	8890	0,034	3	14,1	29430	138321	243,29	551,4	795	383	83,22	37	15	22	41	3,9	
7,7	5,9	610	6,2	0,78	9906	0,034	3,2	14,7	31392	144207	248,84	568,1	817	415	60,75	42	17	15	40	4,1	
7,8	5,6	579	5,8	0,74	9398	0,034	3,1	14,4	30411	141264	246,06	559,8	806	431	88,07	40	16	20	40	3,7	
8,0	6,0	620	6,1	0,79	10033	0,034	3,2	14,8	31392	145188	248,84	570,9	820	465	75,24	43	18	16	42	3,9	
8,1	5,9	610	5,9	0,78	9906	0,034	3,2	14,7	31392	144207	248,84	568,1	817	483	92,15	42	17	19	40	3,5	
8,3	6,0	620	5,9	0,79	10033	0,034	3,2	14,8	31392	145188	248,84	570,9	820	519	99,01	43	18	19	42	3,5	
8,3	5,9	610	5,8	0,78	9906	0,034	3,2	14,7	31392	144207	248,84	568,1	817	519	106,1	42	17	20	40	3,3	
8,3	6,1	631	6	0,8	10160	0,034	3,2	14,9	31392	146169	248,84	573,7	822	519	91,66	44	18	18	41	3,5	
8,3	5,5	569	5,4	0,72	9144	0,034	3,1	14,2	30411	139302	246,06	554,2	800	519	131	39	16	25	41	3,1	
8,5	6,3	652	6	0,83	10541	0,034	3,2	15,1	31392	148131	248,84	579,2	828	558	98,54	46	19	18	41	3,4	
8,5	6,2	641	5,9	0,82	10414	0,034	3,2	15	31392	147150	248,84	576,4	825	558	106,5	45	18	19	40	3,2	
8,7	6,0	620	5,6	0,79	10033	0,034	3,2	14,8	31392	145188	248,84	570,9	820	598	137,3	43	18	23	42	3,0	
9,0	6,6	683	6	0,87	11049	0,034	3,3	15,5	32373	152055	251,62	590,3	842	662	116,9	49	20	18	41	3,0	
9,1	6,7	693	6	0,88	11176	0,034	3,3	15,6	32373	153036	251,62	593,1	845	684	120,8	50	21	18	42	3,1	
9,1	6,0	620	5,4	0,79	10033	0,034	3,2	14,8	31392	145188	248,84	570,9	820	684	172,6	43	18	25	42	2,6	
9,4	6,8	703	5,9	0,89	11303	0,034	3,4	15,7	33354	154017	254,39	595,9	850	754	143,8	51	21	19	41	2,8	
9,5	6,6	683	5,6	0,87	11049	0,034	3,3	15,5	32373	152055	251,62	590,3	842	779	178,9	49	20	23	41	2,6	
9,9	7,1	734	5,8	0,93	11811	0,034	3,4	16	33354	156960	254,39	604,2	859	881	180	54	23	20	43	2,6	
9,9	7,0	724	5,7	0,92	11684	0,034	3,4	15,9	33354	155979	254,39	601,4	856	881	191,4	53	22	22	42	2,5	
10,4	7,5	776	5,9	0,99	12573	0,034	3,6	16,6	35316	162846	259,94	620,9	881	1022	195	58	25	19	43	2,4	
10,8	7,7	796	5,8	1,01	12827	0,034	3,6	16,9	35316	165789	259,94	629,2	889	1144	233,8	60	26	20	43	2,3	
6,8	**4,5**	**470,2**	**5,3**	**0,6**	**7589,8**	**0,034**	**2,9**	**13,5**	**28542,4**	**132061,3**	**240,8**	**533,7**	**774,5**	**297,0**	**67,4**	**31,3**	**12,4**	**24**	**39**	**4,2**	**Ort.**

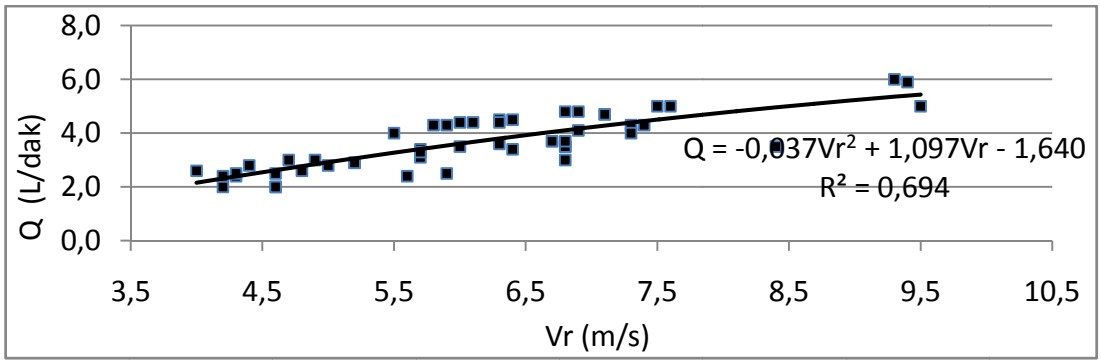
EK-E Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına gore pompalanan su debi grafikleri



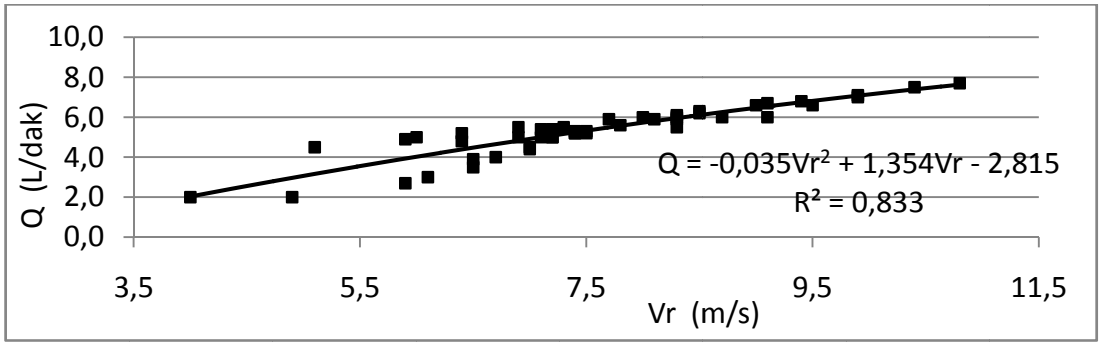
a



b

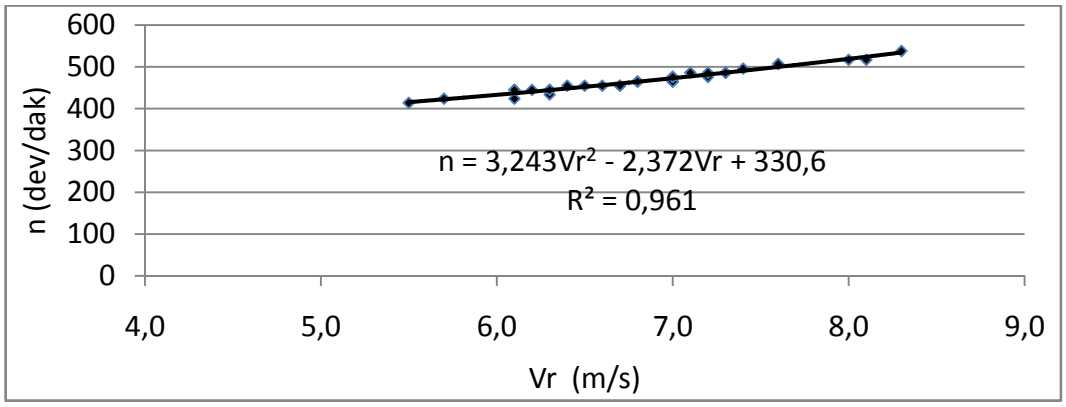


c

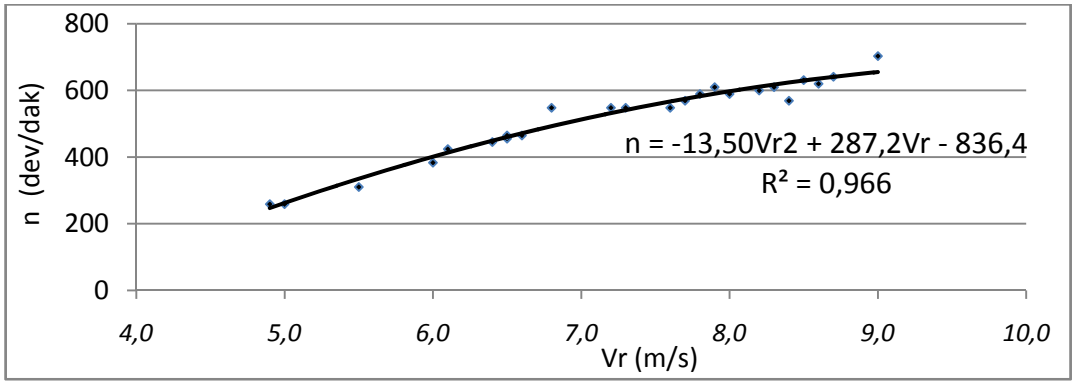


d

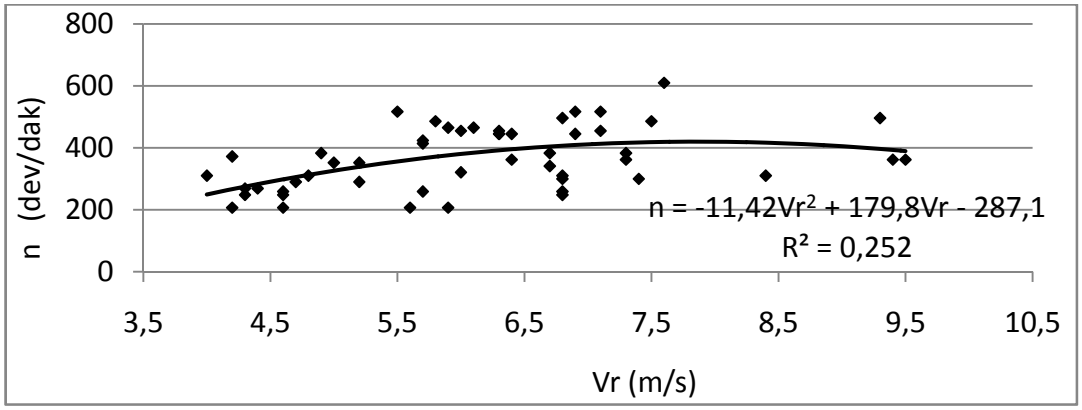
EK-F Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre türbin devir sayısı grafikleri



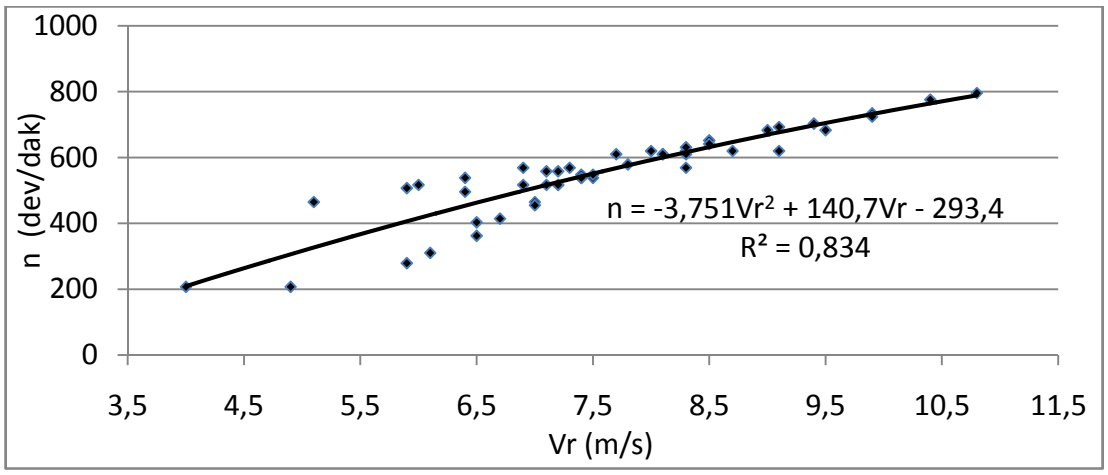
a



b

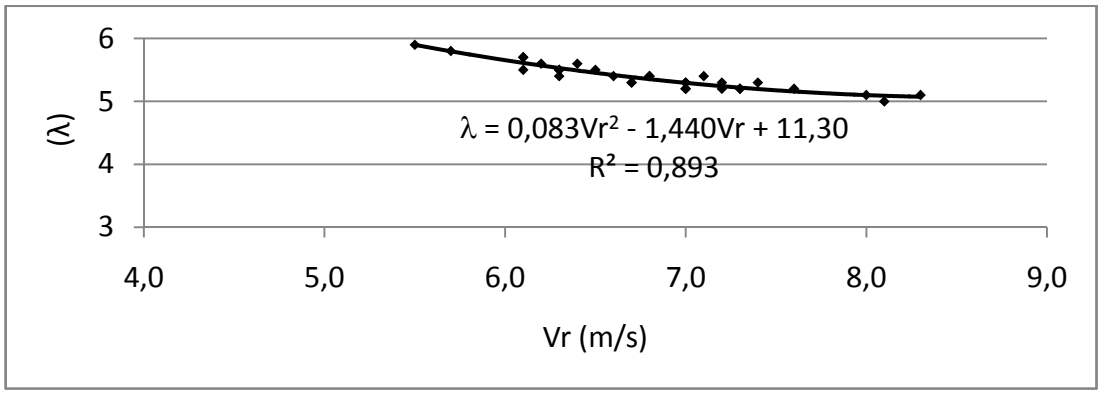


c

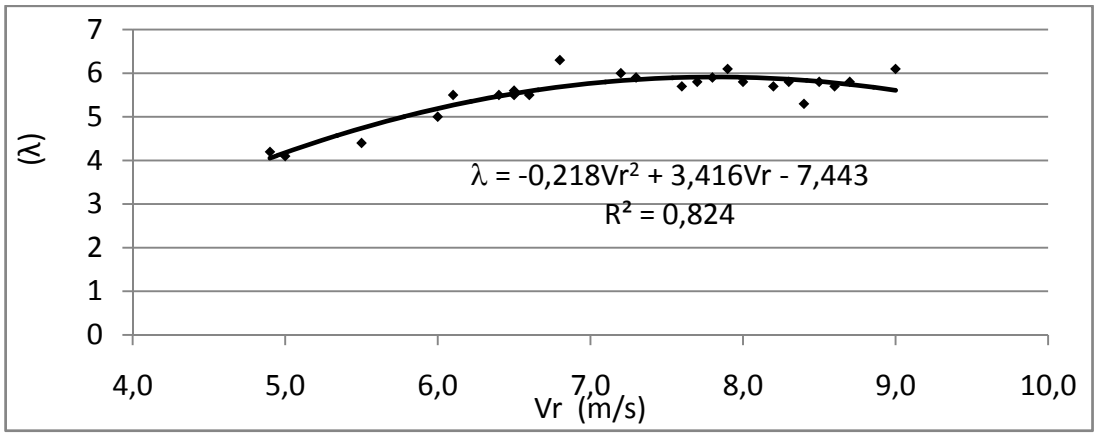


d

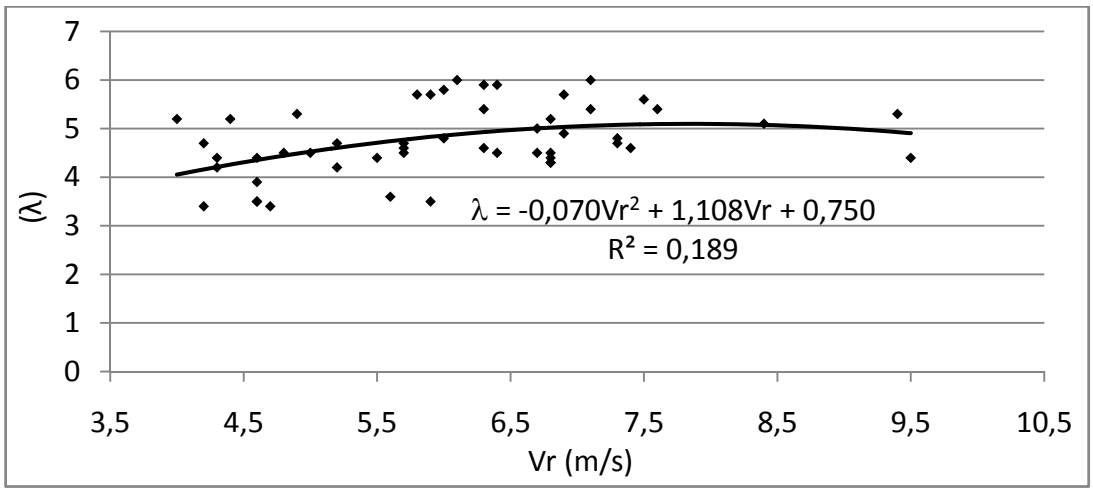
EK-G Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre türbin uç hız oranı grafikleri



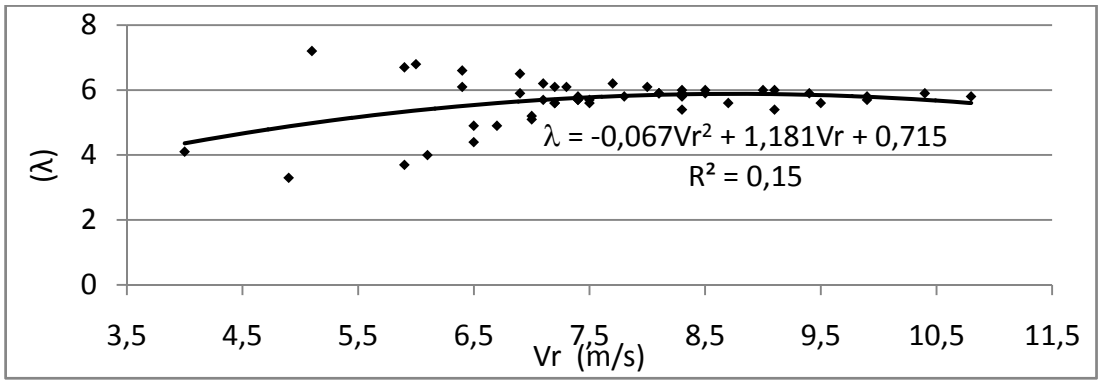
a



b

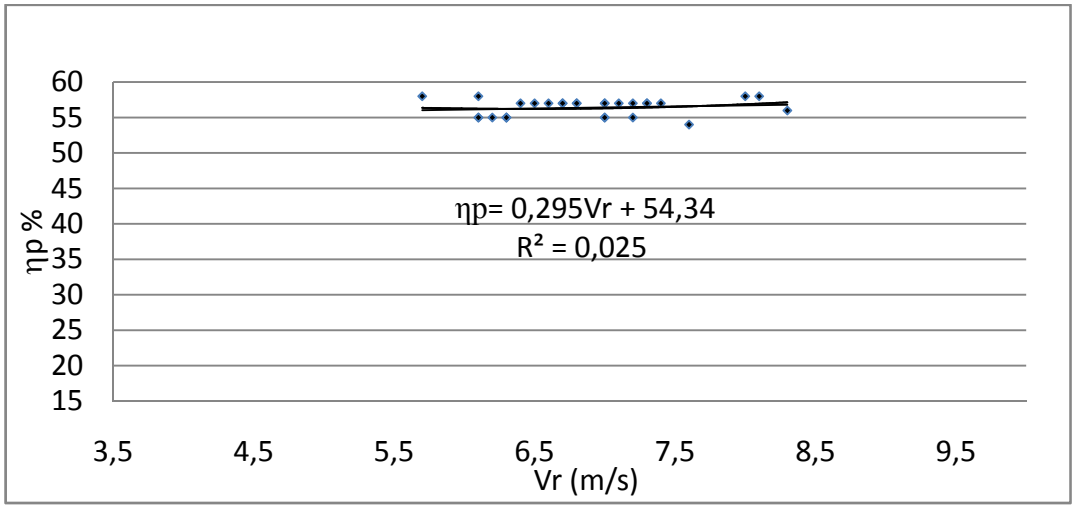


c

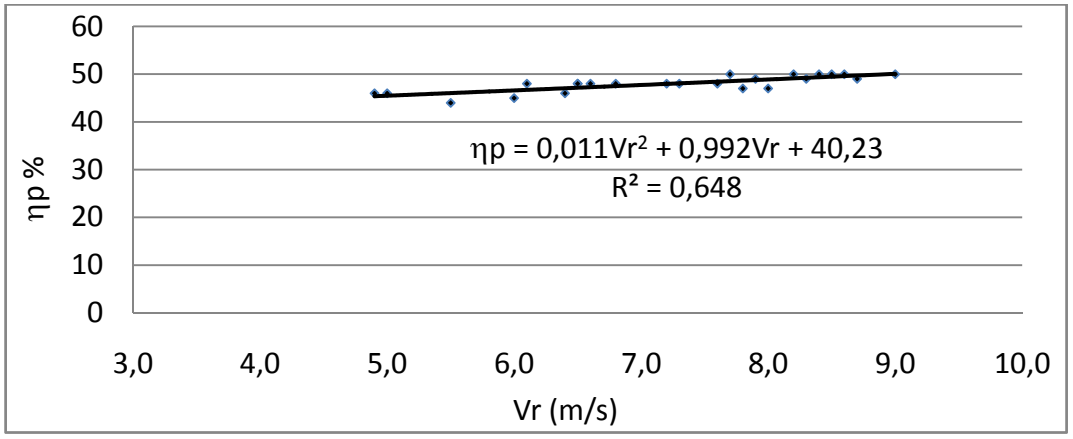


d

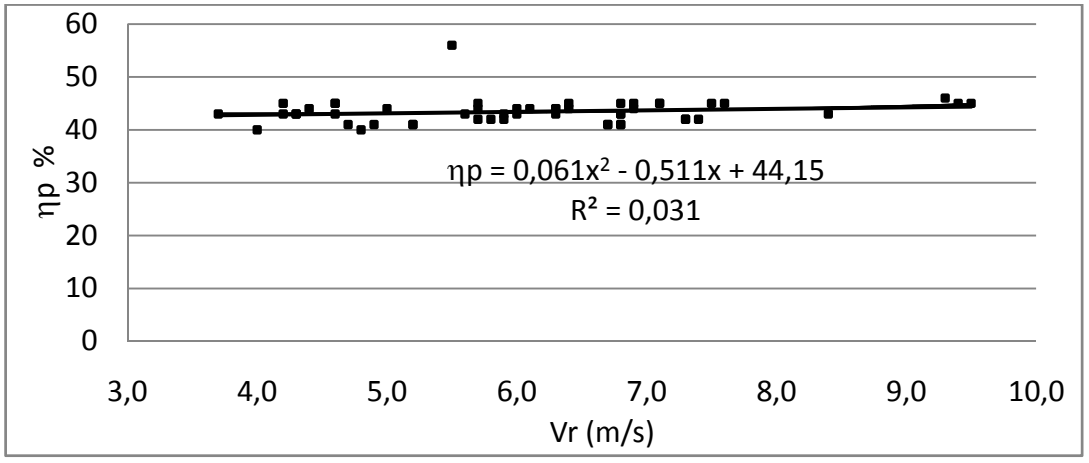
EK-H Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre pompa verim grafikleri



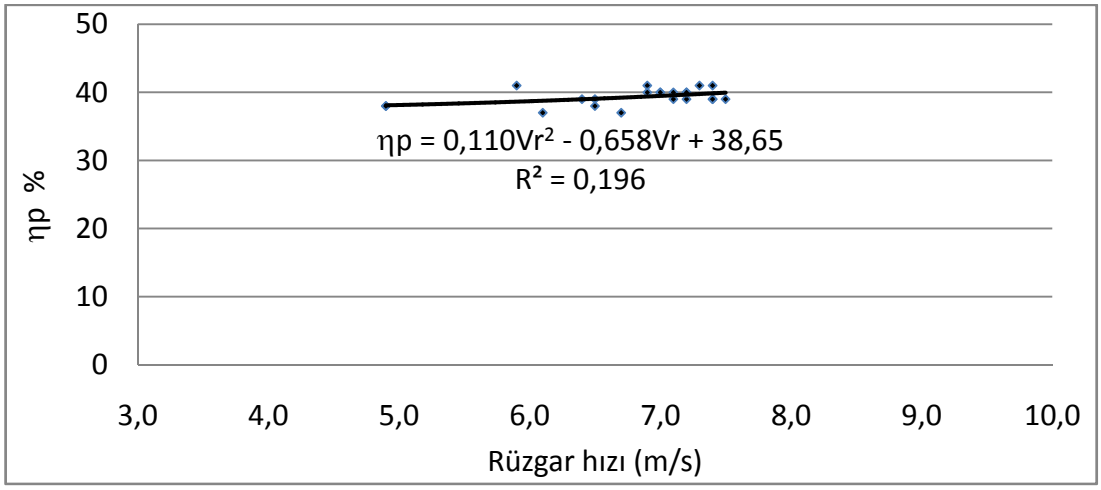
a


60
50
40
30
20
10
0
ηp %
ηp = 0,011Vr² + 0,992Vr + 40,23
R² = 0,648
3,0
4,0
5,0
6,0
7,0
8,0
9,0
10,0
Vr (m/s)

b

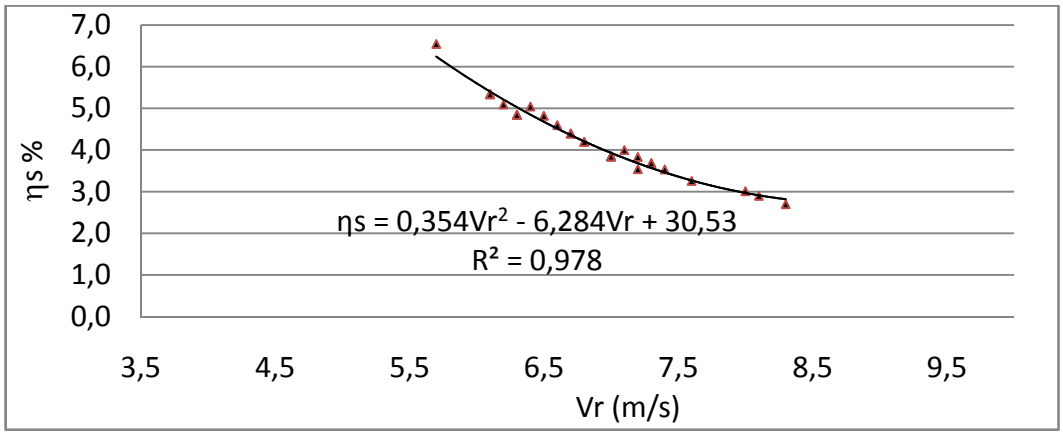

60
50
40
30
20
10
0
ηp %
ηp = 0,061x² - 0,511x + 44,15
R² = 0,031
3,0
4,0
5,0
6,0
7,0
8,0
9,0
10,0
Vr (m/s)

c

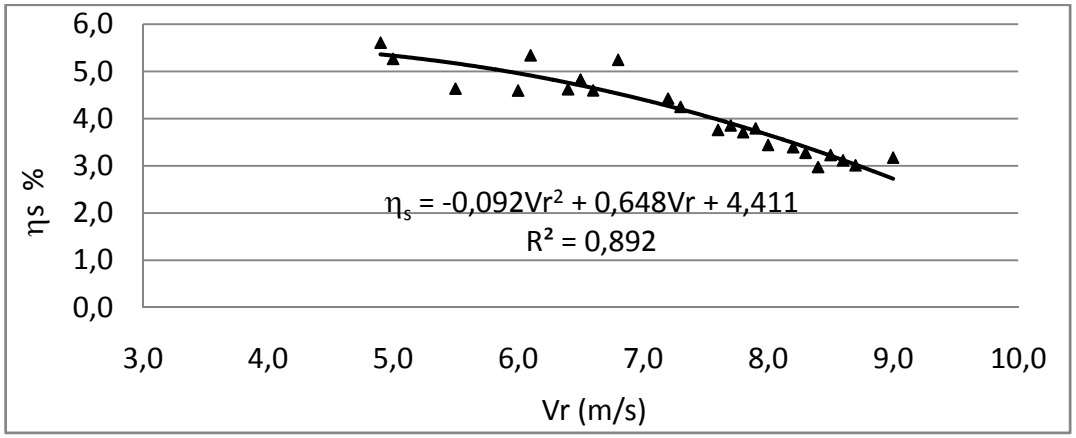

50
40
30
20
10
0
ηp %
ηp = 0,110Vr² - 0,658Vr + 38,65
R² = 0,196
3,0
4,0
5,0
6,0
7,0
8,0
9,0
10,0
Rüzgar hızı (m/s)

d

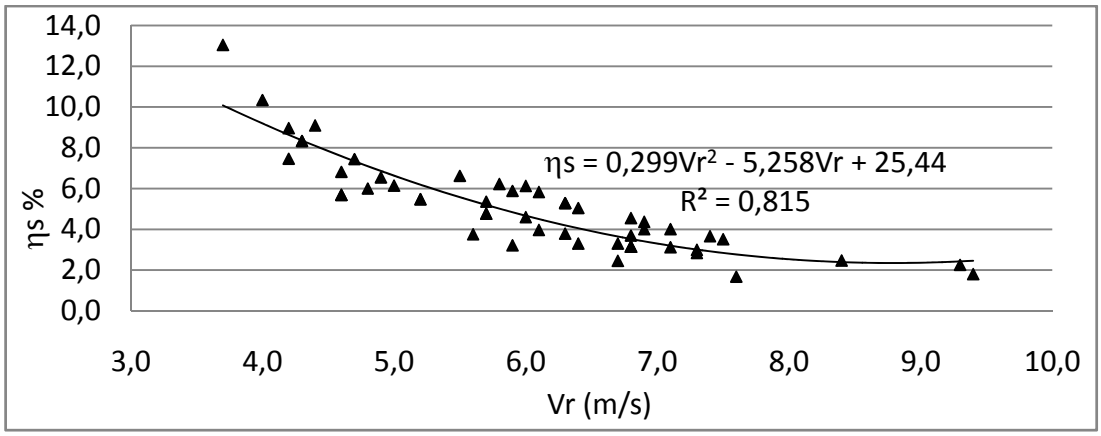
EK-I Deney sisteminde a-90 mm Strok, b-105 mm Strok, c-114 mmStrok, d-127 mm strok değerlerinde rüzgar hızlarına göre sistem verim grafikleri



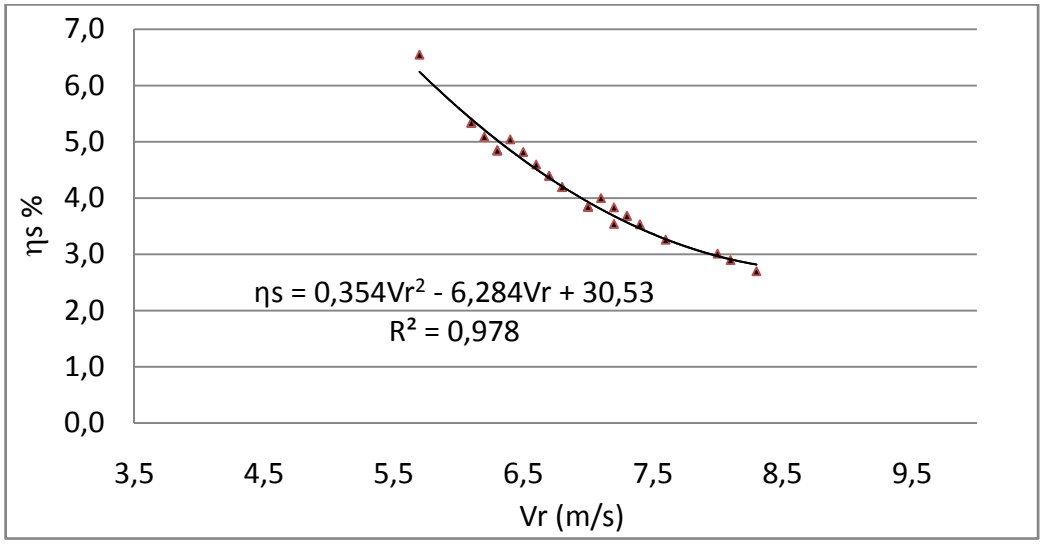
a



b



c


7,0
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
ηs %
ηs = 0,354Vr² - 6,284Vr + 30,53
R² = 0,978
3,5
4,5
5,5
6,5
7,5
8,5
9,5
Vr (m/s)

d

EK- J Moody diyagramı

