



**T.C.  
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KÜÇÜK DELTA TİPİ DARRİEUS RÜZGÂR TÜRBİNİ  
VERİMİNE FARKLI DÜŞEY KANAT AÇISI VE UÇ  
AÇIKLIKLARININ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK  
ARAŞTIRILMASI**

**Adem ÜNAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz-2021  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this seminar document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Adem ÜNAL

Tarih: 13.07.2021

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS

# KÜÇÜK DELTA TİPİ DARRIEUS RÜZGÂR TÜRBİNİ VERİMİNE FARKLI DÜŞEY KANAT AÇISI VE UÇ AÇIKLIKLARININ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Adem ÜNAL

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Faruk KÖSE

2021, 79 Sayfa

Jüri  
Doç. Dr. Faruk KÖSE  
Prof. Dr. Saim KOÇAK  
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Bu tez çalışmasında, yerleşim yerlerinde ve elektriğin ulaşmadığı noktalarda kullanıma uygun olan 100 W güç kapasitesine sahip küçük Delta Tipi Darrieus rüzgar türbininin düşey kanat açılarının ve uç açıklıklarının değişiminin türbin verimliliğine olan etkisi araştırılmıştır. Rüzgar tüneline elde edilen farklı rüzgar hızlarında delta tipi darrieus rüzgar türbininin kuvvet değerleri tek akışlı tüp modeli ve kanat eleman metodu ile her bir kanat beş parçaya bölünerek ayrı ayrı hesaplanmış, tasarımı yapılan rüzgar türbini literatürde yaygın olarak kullanılan Naca0018 kanat profili ile imal edilmiş ve ikili, üçlü ve dörtlü kanatçıklar ile düşey kanat açıları kademeli olarak değiştirilerek türbin verimliliğinin nasıl etkilendiği yapılan deneyler ile gözlemlenmiştir. Hesaplamalar ile elde edilen değerler deney sonunda elde edilen değerler ile karşılaştırılmış, kanatların düşey kanat açılarının azaltılmasıyla verimliliğin de azaldığı tespit edilmiştir. Son kısımda deney sonuçları tartışılmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** DERT, Dikey Eksenli Rüzgar Türbini, Delta Tipi Darrieus Rüzgar Türbini, Rüzgar Enerjisi

## **ABSTRACT**

## **MS THESIS**

# **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT VERTICAL BLADE ANGLES AND TIP SPANS ON SMALL DELTA TYPE DARRIEUS WIND TURBINE EFFICIENCY**

**Adem ÜNAL**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Machine Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Faruk KÖSE**

**2021, 79 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Faruk KOSE**

**Prof. Dr. Saim KOCAK**

**Prof. Dr. Ali KAHRAMAN**

In this thesis study, the effect of the variation of the vertical blade angles and tip spans of the small Delta Type Darrieus Wind Turbine with a power capacity of 100 W, which is suitable for use in residential areas and at points where electricity does not reach, on the turbine efficiency has been investigated. The force values of the delta type Darrieus wind turbine at different wind speeds obtained in the wind tunnel were calculated separately by dividing each blade into five parts by the blade element method and single stream tube model. It has been investigated how the efficiency is affected by the experiments. The target values obtained with the calculations and the values obtained at the end of the experiment were compared, and it was observed that the efficiency decreased by decreasing the vertical blade angles of the blades with double, triple and quadruple blades. In the last part, the results of the experiment were discussed and some suggestions were made.

**Keywords:** VAWT, Vertical Axis Wind Turbine, Delta Type Darrieus Wind Turbine, Wind Energy

## ÖNSÖZ

Dünya’da ve Türkiye’de her geçen yıl artan enerji tüketimi, kaynakların azalmasına yol açarken enerji maliyetlerini de büyük ölçüde artırmaktadır. Dünya üzerindeki mevcut enerji ihtiyacı hala ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ülke olarak enerji tedarikinde büyük oranda dışa bağımlı olduğumuz ve fosil yakıtlı kaynakların zamanla tükeneceği göz önüne alındığında dışa bağımlılık ve olası fiyat artışları büyük ekonomik riskleri beraberinde getirmektedir. Son dönemde fosil yakıtların tüketiminden kaynaklı olarak ekolojinin de büyük oranda etkilendiği, küresel ısınmadan çevre kirliliğine kadar birçok yönden doğaya zarar verdiği görülmektedir. Dünyanın ve insanlığın geleceği düşünüldüğünde düşük emisyonlu, doğa ile dost olan rüzgar enerjisi; güneş enerjisi, biyoenerji, dalga enerjisi, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek kaçınılmaz hale gelmiştir. 1973 yılındaki petrol krizi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları alanında çalışmalar yoğunlaşmış, sistem verimlilikleri yeni uygulamalar ile artırılmış ve kullanım sahaları genişletilmiştir.

Bu çalışmamız kapsamında öncelikle rüzgâr enerjisi tanıtılmış, rüzgâr türbinleri ve çeşitlerinden bahsedilmiş, dünyanın ve Türkiye’nin genel rüzgar enerjisi görünümüne değinilmiştir. Genel olarak daha çok yerleşim yerlerinde ve elektriğin ulaşamadığı noktalarda kullanıma uygun 100 W güç kapasitesine sahip Delta Tipi Darrieus rüzgar türbininde düşey kanat açılarının ve uç açıklıklarının değişiminin türbin verimine olan etkisi sayısal olarak hesaplanmış, imal edilen rüzgar türbini ile farklı rüzgar hızlarında deneyler yapılmış, sonuçlar çalışmanın sonunda tartışılmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışma sürecinde bana destek olan ve her konuda beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Faruk Köse’ye saygı ve şükranlarımı sunarım.

Adem ÜNAL  
KONYA-2021

## İÇİNDEKİLER

|                                                               |      |
|---------------------------------------------------------------|------|
| ABSTRACT.....                                                 | iv   |
| ÖNSÖZ .....                                                   | v    |
| İÇİNDEKİLER .....                                             | vi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                 | viii |
| 1. GİRİŞ .....                                                | 1    |
| 1.1. Rüzgâr Enerjisi .....                                    | 2    |
| 1.1.1. Rüzgârın oluşumu ve önemi .....                        | 4    |
| 1.1.2 Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları .....  | 5    |
| 1.1.3 Rüzgâr enerjisinin uygulama alanları .....              | 6    |
| 1.1.4. Rüzgâr enerjisinin çevresel etkileri.....              | 7    |
| 1.1.5. Rüzgâr hızının ölçülmesi .....                         | 7    |
| 1.1.6. Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisinin durumu.....  | 8    |
| 1.1.7. Küçük rüzgar türbinlerinin optimizasyonu projesi ..... | 11   |
| 1.2. Rüzgâr Türbinleri.....                                   | 12   |
| 1.2.1. Güç esasına göre sınıflandırma .....                   | 13   |
| 1.2.2. Dönme eksenine göre sınıflandırma .....                | 14   |
| 1.3. Darrieus Rüzgâr Türbinleri .....                         | 16   |
| 1.4. H Tipi Darrieus Rüzgâr Türbinleri .....                  | 17   |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....                                   | 19   |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....                                    | 22   |
| 3.1. Betz Limiti .....                                        | 23   |
| 3.2. Kanada Etki Eden Kuvvet Bileşenleri ve Hesapları .....   | 24   |
| 3.3. Kanat Elemanı Metodu .....                               | 32   |
| 3.4. Rüzgâr Türbininin Tasarım Kriterleri.....                | 33   |
| 3.4.1. Güç katsayısı, $C_p$ .....                             | 34   |
| 3.4.2. Kanat uç hız oranı ( $\lambda$ ) .....                 | 34   |
| 3.4.3. Süpürme alanı ve R/H oranı.....                        | 35   |
| 3.4.4. Kanat sayısı ve türbin katılık oranı .....             | 36   |
| 3.4.5. Kanat profili.....                                     | 37   |
| 3.4.6. Viter uzunluğu.....                                    | 38   |
| 3.5. Türbin Tasarımı ve İmalatı .....                         | 39   |
| 3.5.1. Türbin boyutlarının hesaplanması .....                 | 39   |
| 3.5.2. Kanada gelen kuvvetlerin hesaplanması.....             | 43   |
| 3.6. Rüzgar Türbininin İmalatı .....                          | 49   |
| 3.6.1. Rüzgar türbinlerinde kanat yapısı ve malzemeler.....   | 49   |
| 3.6.2. Kanatçıkların hazırlanışı .....                        | 50   |
| 3.6.3. Kanat imalatı ve konstrüksiyonu .....                  | 53   |
| 3.7. Rüzgar Hızı Ölçümleri.....                               | 54   |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4- ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>         | <b>56</b> |
| 4.1. Sonuçlar .....                                     | 56        |
| 4.1.1. İki kanatlı rüzgar türbini deney sonuçları ..... | 57        |
| 4.1.2. Üçlü kanatlı rüzgar türbini deney sonuçları..... | 59        |
| 4.1.3. Dört kanatlı rüzgar türbini ölçüm sonuçları..... | 62        |
| 4.2. Belirsizlik Analizi .....                          | 63        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                    | <b>65</b> |
| 5.1. Sonuçlar .....                                     | 65        |
| 5.2. Öneriler .....                                     | 66        |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                   | <b>67</b> |
| <b>KAYNAKÇA.....</b>                                    | <b>68</b> |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                |                                   |
|----------------|-----------------------------------|
| S              | : Süpürme alanı (m <sup>2</sup> ) |
| C <sub>p</sub> | : Güç katsayısı                   |
| D              | : Çark Çapı (m)                   |
| N              | : Devir sayısı (d/d)              |
| T              | : Zaman (saniye)                  |
| V              | : Hız (m/s)                       |
| V <sub>a</sub> | : Rüzgâr hızı (m/s)               |
| λ              | : Uç hız oranı                    |
| ρ              | : Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )   |
| ω              | : Açısal hız (rad/s)              |
| P              | : Rüzgar gücü (W)                 |
| A              | : Amper                           |

### Kısaltmalar

|       |                                        |
|-------|----------------------------------------|
| DERT  | : Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini         |
| GW    | : Gigavat                              |
| GWh   | : Gigavat saat                         |
| HAD   | : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği      |
| KWh   | : Kilovat saat                         |
| MW    | : Megavat                              |
| MWh   | : Megavat saat                         |
| REPA  | : Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası   |
| RT    | : Rüzgâr Türbini                       |
| YEGM  | : Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü |
| YERT  | : Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini         |
| TUREB | : Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği      |
| RES   | : Rüzgar Enerji Santrali               |

## 1. GİRİŞ

Enerji ülkelerin gelişmişlik durumlarını gösteren önemli faktörlerden biridir. Enerji üretiminde büyük oranda fosil yakıtların kullanılması, bu yakıtların hızla tükenmesine neden olmaktadır. Ayrıca konvansiyonel kaynaklara (kömür, petrol ve yan ürünleri) sahip olmayan ülkeler için fosil yakıtlar dışı bağımlılığı artırmaktadır. Konvansiyonel yakıtların kullanılması ile ortaya çıkan zararlı gazlar ve nükleer enerjiye karşı gösterilen tepkiler bilim insanlarını, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmeye yöneltmiştir. Türkiye tükettiği enerjinin yaklaşık %70,3'lük kısmını ithal etmektedir (Köse, 2012). Bu nedenle yenilenebilir enerji teknolojileri Türkiye için ayrı bir önem taşımaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından ülkemiz oldukça iyi bir potansiyele sahiptir. Rüzgâr, yenilenebilir enerji kaynaklarının içinde en önemlilerinden biri olup atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır. Rüzgâr, doğası gereği kinetik enerji taşımaktadır. Havanın özgül kütlesi düşük olduğundan rüzgârdan sağlanacak enerji miktarı daha çok hızına bağlıdır (Dursun, 2006).

Yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmeler rüzgâr enerjisi ile enerji üretiminin de önemini artırmıştır. 2010 yılı itibariyle dünyadaki toplam rüzgâr güç üreticilerinin kapasitesi 197 GW, elektrik üretimi ise 430 TWh olmuştur. Bu da dünya elektrik tüketiminin %2,5'luk dilimine denk gelmektedir. Bazı ülkeler elektrik enerjisi üretiminde rüzgâr enerjisinin kullanımı bakımından yüksek oranlara ulaşmışlardır. Danimarka toplam elektrik üretiminin %21 ini, Portekiz %18 ini, İrlanda %14 ünü, Almanya ise %9 unu rüzgâr enerjisinden sağlamaktadır. Dünyada rüzgâr enerjisini ticari anlamda kullanan ülkelerin sayısı 83'e yükselmiştir (Anonymous, 2005, 2010, 2011). Türkiye'de 2020 yılı Aralık ayının sonunda toplam rüzgâr enerjisi üreticilerinin kapasitesi son yıllardaki büyük artışla birlikte 9305 MW olmuştur ve Dünyada kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi sıralamasında 7. sıradadır ve gelişmiş ülkeler ile rekabet edebilir konumdadır (TUREB, 2021). Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından yapılan potansiyel belirleme çalışmasına göre yeryüzünden 50 m yükseklikteki rüzgâr hızı 7 m/s nin üzerinde olan alanlarda Türkiye'nin 48.000 MW'lık RES potansiyeline karşılık yaklaşık 130 Milyar kWh elektrik üretilir (Anonim, 2010).

Türkiye'nin rüzgâr potansiyeli oldukça iyi olmasıyla birlikte, elektrik üretimi veya farklı bir amaçta insanlığın hizmetine sunulması konusunda sürekli yeni adımlar atılmaktadır. Türkiye'nin kurulu rüzgâr gücü, mevcut potansiyelinin yanında düşük kalmaktadır. Türkiye'nin değişik bölgelerinde rüzgâr hızları belirli aralıklarla değişim göstermektedir. Her rüzgâr hızına uygun bir rüzgâr türbini tasarlamak mümkündür. Rüzgâr türbini seçimine; rüzgâr türbininin kurulacağı bölgeden alınmış son beş yıl içinde en az 100 m yükseklikte rüzgâr hızı ölçümleri değerlendirilerek karar verilir. Burada ana kıstas rüzgâr hızına uygun optimum rüzgâr türbinini seçmek ve tasarımı gerçekleştirmektir (Dursun, 2006).

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında öncelikle rüzgâr enerjisi ile ilgili genel tanımlardan bahsedilmiştir. Dünya'nın ve Türkiye'nin son durumu ele alınmış, Dert'lerin dünyadaki trendinden ve Türkiye'deki sektörel fırsatlarından bahsedilmiştir. Genel olarak şehir içlerinde, yazlık evlerde, yol kenarlarında ve yüksek binalarda da kullanılabilecek olan 100 Watt güç kapasitesine sahip Delta Tipi Darrieus rüzgar türbininin düşey kanat açılarının değişiminin güç hesaplamaları yapılmış, türbin verimine olan etkisi örnek uygulamalar ile mercek altına alınmıştır.

### **1.1. Rüzgâr Enerjisi**

Rüzgâr enerjisi; kaynağı güneş olan, çok eski çağlardan beri bilinen ve kullanılan enerji kaynaklarından birisidir. Rüzgârlar, yeryüzündeki farklı güneş ışıınımı dağılımının neden olduğu basınç ve sıcaklık farklarının dengelenmesiyle oluşan hava akımlarıdır. Yeryüzü kabuğunun homojen olarak ısınma ve soğuma davranışı göstermemesi nedeniyle, büyük hava kütlelerinin hareket etmesine rüzgâr denir. Rüzgârlar, sürekliliklerine göre bütün bir yıl boyunca esen rüzgârlar ve belli zamanlarda esen süresiz rüzgârlar olarak iki grupta incelenebilir (Özdamar, 2000).

Dünya nüfusunun hızla artması ile ortaya çıkan enerji ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük önem kazanması sonucunda, rüzgâr enerjisi sistemleri zaman içerisinde önem kazanarak hızla gelişmiştir. Rüzgâr enerjisindeki hızlı gelişimin önemli nedeni; bu kaynağın çevre dostu, temiz ve dışa bağımlı olmayan bir kaynak oluşudur. Geleneksel güç santrallerinin çevrede yarattığı asit yağmurları, petrol sızıntıları ve iklim değişikliğine etkilerinin yanında, rüzgâr enerjisinin bu gibi çevresel etkilerinin olmaması en büyük avantajdır. Rüzgâr enerjisinin tek dezavantajı süresizliği ve depolanma zorluğudur.

Rüzgâr enerjisi; özellikle kırsal alanlarda, elektrik üretimi ve sulama amaçlı tarımsal alanlarda kullanılmıştır. En eski rüzgâr çarkları, M.Ö. 3000 yıllarında Mısır'da, İskenderiye yakınlarında kurulmuş ve Nil vadisinde toprakların sulanmasında kullanılmıştır. Rüzgâr çarkları, Ortaçağda 11. Yüzyılda haçlı seferleri esnasında Anadolu'dan götürülmüştür. 17. Yüzyılda Hollanda'da gemi ve yel değirmenlerinde uygulanmasıyla, bu ülkenin dünyanın gelişmiş endüstriyel ülkesi haline gelmesine katkı sağlamıştır. Başlangıçta genellikle su pompalama, tahıl öğütme gibi amaçlar için küçük çapta imal edilen rüzgâr çarklarından ilk defa elektrik enerjisi üretimi, 1890'da Danimarka'da Paul La Cour adındaki bir Fransız tarafından 9 kW'lık iki tane jeneratörün çalıştırılmasıyla başlamıştır (Eldridge, 1980).

1941 yılında Palmer C. Putnam isimli bir Amerikalı mühendis, Amerika Birleşik Devletleri'nde Smith-Putnam adıyla bilinen ilk büyük rüzgâr jeneratörünü tasarlayarak imal etmiştir. İngiltere'de 1940'lı yılların sonlarında ve 1950'li yıllarda, rüzgâr gücünden yararlanarak elektrik üretmede önemli çalışmalar yapmıştır (Eldridge, 1980).

Fransızlar, 1958 ile 1960 yılları arasında birçok rüzgâr jeneratörü kurup çalıştırmışlardır. Almanya'da rüzgâr türbinleri ile ilgili çalışmalar 1950-1960 yılları arasında Hunter tarafından yapılmıştır.

Fosil enerji kaynaklarının azalması, petrol fiyatının hızla artması ve enerji ihtiyacının her geçen gün büyümesi sonucunda, rüzgâr enerjisinden yararlanmak için birçok ülkede çalışmalar yapılmış ve hala bu çalışmalar devam etmektedir. Rüzgâr enerjisinden yararlanarak elektrik enerjisini üretilip, enerji ihtiyacını karşılamak için çalışmalar yapan ülkeler arasında Rusya, İsveç, Kanada, Almanya, Fransa, Danimarka, İngiltere, Hollanda, ABD yer almaktadır. Bu arada ülkemizde de bu konuda çalışmalar sürdürülmekte; Çeşme Alaçatı, Germiyan, Bozcaada da modern rüzgâr santralleri kurulmuş ve enerji üretmektedir.

Bir raporda yenilenebilir enerjiye dair gelecek perspektifinde gelecek 30 yıl içinde rüzgar enerjisinin ve güneş enerjisinin trendi en yüksek olan yenilenebilir enerji kaynaklarından olacağı paylaşılmaktadır. Verimliliğin kazanç ile eşdeğer olduğu çağımızda yüksek ölçekte enerji yatırımları olacak olan rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi sistemlerinin iyileştirilmesi için daha fazla çalışma yapılacağını göstermektedir. Şehirlerde artmaya devam eden nüfus, yeni teknolojilerin gelişmesi, ulaşımında elektrikli araçların kullanımının artmaya devam etmesi, tüketimin artmasıyla üretimin de bu minvalde artacak olması elektrik talebini de artıracaktır. Bütün bunlar düşünüldüğünde

enerji tüketiminde elektrik enerjisinin payı önümüzdeki 30 yılda önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir (TSKB, 2020).

### 1.1.1. Rüzgârın oluşumu ve önemi

Hava hareketlerinin temel prensibi, mevcut atmosfer basıncının bölgeler arasında değişmesidir. Rüzgâr, alçak basınçla yüksek basınç bölgeleri arasında yer değiştiren hava akımıdır. Rüzgâr daima yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru gider. İki bölge arasındaki basınç farkı ne kadar büyük olursa, hava akımı hızı o kadar fazla olur. Rüzgâr sahip olduğu hıza göre fırtına, hortum gibi isimler alır (Kaymak, 2009).

Rüzgârın yönü rüzgârgülü, hızı ise anemometre ile ölçülür. Anemometre; pervanenin dönüş hızından, rüzgârın hızını gösteren basit bir ölçü aletidir. Yükseklerdeki rüzgârlar balonlar yardımıyla ölçülmektedir. Bunun için yükselme hızı bilinen balonlar, belirli bir yüksekliğe gelince rüzgâr hızından yol almaya başlar. Balonun birim zamanda kat ettiği yoldan, trigonometrik hesaplarla hızı bulunur. Daha hassas ölçümler için balon, ya radarla takip edilir ya da balona bir telsiz vericisi monte edilir (Kaymak, 2009).

Okyanustaki akımların ve dalgaların meydana gelmesinde rüzgârların büyük rolü vardır. Rüzgârlar, karaların şekillerinin değişmesine de sebep olur. Bilhassa çöllerde kimi tepeler, rüzgârlar sebebiyle devamlı değişir. Rüzgârların bitki sporlarını sağa sola taşıyarak, çiçeklerin döllenmesine sebep olması bitki neslinin devamı yönünden çok önemlidir. Rüzgâr gücünden yel değirmeni, yelkenli gemi işletmesinde de istifade edilir (Kaymak, 2009)

Rüzgârın meydana geliş sebepleri:

- Dünyanın dönme hareketi
- Yüzey sürtünmeleri
- Yerel ısı yayılması
- Rüzgâr yönünde başka atmosferik olayların oluşması
- Yeryüzünün topografik yapısı sebebiyle şekillenir.

Rüzgâr, alçak (siklon) ve yüksek (antisiklon) alanlarda farklı özellikler taşır. Siklon içerisinde; basınç radyal olarak içe, doğru santrifüj kuvvetler ve koriolis kuvvet dışı doğru etki eder. Antisiklon içerisinde ise; koriolis kuvvet içe doğru, santrifüj kuvvet ve basınç değişimi radyal olarak dışarıya doğru etki eder. Bütün bunların etkisi

sonucunda rüzgâr eşit basınç noktalarında yoluna devam eder. Bu hatların bir harita üzerinde çizilmesiyle meteoroloji haritaları elde edilir. Yüzey sürtünmeleri rüzgârın yönünü alçak basınç yönüne doğru çevirir. Denizlerde bu açı  $20^\circ$ , karalarda ise  $30^\circ$  ile  $45^\circ$  arasında değişir (Kaymak, 2009)

Atmosferin alt tabakalarında meydana gelen rüzgârlar, yerin ısı ve mekanik özelliklerinden dolayı türbülans meydana getirir. Türbülans meydana getirmeden, basınç alanları arasında dolaşan rüzgârlara meyilli rüzgârlar denir. Eğer rüzgâr hafif meyilli karadan denize doğru eserse logaritmik olarak alçalan bir spiral hat çizerek ilerler. Kuzey yarım kürede bu spiralin dönüş yönü saat ibresinin dönüş yönüdür. Atmosferin üst tabakalarında rüzgâr hızı saatte 400 km'ye kadar çıkabilir (Kaymak, 2009)

### 1.1.2 Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları

Geçmişi eskilere dayanan ve temiz bir enerji kaynağı olarak bilinen rüzgâr enerjisinin sahip olduğu avantajlar şunlardır:

- Rüzgâr enerjisi, tükenmeyen ve bedava bir enerji kaynağıdır. Zaman içerisinde tükenme ve fiyatının artma riski yoktur.
- Rüzgâr enerjisi, kirlilik yaratmayan ve çevreye çok az zarar veren, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Çevreyi ve atmosferi kirletmez.
- Yerli kaynaklar kullanıldığından, dışa bağımlılığı yoktur.
- Başka enerjilere dönüştürme teknikleri kolaydır.
- Rüzgâr, hava hareketi ile oluştuğu için enerjinin iletim sorunu yoktur.
- Rüzgâr türbinleri karmaşık olmayan otomatik makinalardır ve periyodik bakımlar sonucu uzun yıllar sorunsuz çalışabilir.
- Gelişen aerodinamik malzeme ve konstrüksiyon teknikleriyle, rüzgâr enerjisi çevrim sistemlerinin yaygın kullanım olanakları vardır.
- Gelişen teknoloji ile birlikte, enerji birim maliyetleri düşmektedir.

Dezavantajları ise;

- Enerji üretimi rüzgâra bağlıdır. Rüzgârın kesilmesi veya hızının azalmasıyla enerji kaybı oluşur.
- Rüzgâr türbinleri, rüzgâr miktarına bağımlı bir enerji olduğu için sadece yeterli rüzgârın bulunduğu alanlarda kurulabilir.

- Rüzgâr türbinlerinin kurulacağı alanların durumu önemlidir. Örneğin arazinin engebeli oluşu veya sit alanlarına yakın olma durumu olumsuzluk yaratabilir.
- Rüzgâr türbinlerinin meydana getirdiği ses şiddeti çevreye gürültü olarak yansıyabilir.
- Türbin maliyetleri yüksek olabilmektedir. Gelişen teknoloji ve yaygınlaşma ile maliyetler giderek azalmaktadır.
- Türbin, büyük dönel bir makine olduğundan dolayı çevrede kuş ölümlerine neden olabilmektedir.
- Türbinler, ortamda bulunan elektromanyetik dalgayı etkileyebilir (Uysal, 2008).

### **1.1.3 Rüzgâr enerjisinin uygulama alanları**

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri; diğer enerji kaynakları arasında dönüştürme tekniklerinin basit, işletme ve bakımının kolay olması nedeniyle önemli bir yere sahiptir. Rüzgâr enerjisinden, dönüştürücüler vasıtasıyla aşağıdaki şekillerde yararlanmak mümkündür:

#### **1.1.3.1 Rüzgâr enerjisinin mekanik uygulamaları**

Rüzgâr enerjisi mekanik enerjiye çevrilerek, özellikle tarımsal alanlarda sulama ve su temini için su pompalanmasında yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, rüzgâr enerjisi mekanik su pompalamasının dışında; çiftliklerde hayvanların su ihtiyacının karşılanmasında, arazi ve bataklık gibi alanların kurutulmasında ve evsel kullanım için iyi bir alternatif enerji kaynağıdır (Altan, 2006). Son dönemdeki gelişmeler ile sokak aydınlatmalarında da kullanıldığı örnekler mevcuttur.

#### **1.1.3.2. Rüzgâr enerjisinin elektriksel uygulamaları**

Rüzgâr enerjisi, kırsal alanda elektrik enerjisi üretiminin yanında ulusal elektrik şebekesini beslemek için de kullanılmaktadır. Özellikle elektrik şebekesinin ulaşmadığı uzak yerleşim merkezlerinde, kırsal alanlarda, adalarda, ormanlık ve dağlık bölgelerde kurulmuş iletişim birimlerinde, yangın gözetleme kulelerinde, çiftliklerde, dağ evlerinde ve deniz fenerleri gibi elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan yerlerde rüzgâr enerjisinden yararlanılmaktadır (Altan, 2006).

### 1.1.3.3. Rüzgâr enerjisinin ısı enerjisi uygulamaları

Rüzgâr enerjisinden elde edilen mekanik enerjinin, ısı enerjisiye dönüştürüldüğü sistemlerdir. Tankta suyun ısıtılmasıyla enerji depolayan bu sistemler; yerel ısıtma, kurutma, sıcak su hazırlama amaçlarına yönelik olarak kullanılabilirler (Altan, 2006).

### 1.1.4. Rüzgâr enerjisinin çevresel etkileri

Rüzgâr enerjisi çevresel açıdan çok sorun oluşturmeyen bir enerji türüdür. Termik ve nükleer santraller gibi geleneksel güç tesisleri ile karşılaştırıldığında, çevre kirliliğine yol açmayan bir güç kaynağı olarak ele alınabilir.

Rüzgâr enerjisi sistemlerinden kaynaklanabilecek çevresel etkiler; genellikle yöresel boyutlarda olup, uygun önlemler ile en az düzeye indirilebilecek niteliktedir. Ayrıca kömür ve fosil yakıtların kullanılması sonucu oluşabilecek çevresel etkilerle karşılaştırıldığında, rüzgâr enerjisinden kaynaklanan çevresel sorunlar oldukça önemsiz kalmaktadır.

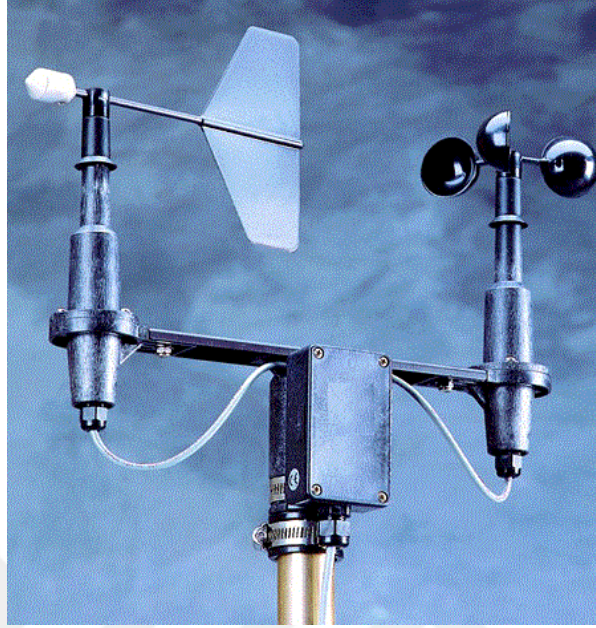
Rüzgâr enerjisi tesisleri gürültü ve görüntü kirliliği oluşturabilir ancak bu tesisler, yerleşim merkezlerinden uzakta inşa edildiklerinde büyük sorun yaratmazlar. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin tasarımı ve yer seçimi sırasında estetik faktörler göz önüne alınırsa, bu tür sorunlar en aza indirilebilir. Gürültü kirliliği ve görsel kirlilik, kişiye bağlı olarak değişen unsurlardır. Yapılan çalışmaların sonucunda, rüzgâr enerjisi sistemlerinin oluşturduğu işitilebilir gürültünün, büyük çevresel etki göstermediği belirlenmiştir.

Büyük rüzgâr tarlaları tesis edilirken; bağlantı yolları, kablo çekimi ve su deposu kurma gibi nedenlerle toprağın bozulması sonucu bölgedeki bitki ve hayvan topluluğu etkilenebilir. Ancak, rüzgâr tarlasının montaj süresi, konvansiyonel güç santrallerine oranla çok kısadır. Tesis kurulduktan sonra, arazi çok kısa bir sürede yeniden tarıma elverişli konuma getirilebilir (Altan, 2006).

### 1.1.5. Rüzgâr hızının ölçülmesi

Rüzgâr hızı ölçümleri anemometre adı verilen cihazlar yardımıyla yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisinin üretiminde rüzgâr verilerinin doğru elde edilebilmesi çok önemlidir. Çünkü rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenecek bölgenin rüzgâr karakteristiklerinin bu bölge için seçimi gerçekleştirilecek rüzgâr türbininin veya türbin elemanlarının seçimi ve yerleşimini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 1.1’de rüzgâr hızı ve rüzgar yönü

ölçümünde kullanılan bir anemometre gösterilmiştir. Bölgenin rüzgâr haritasının çıkarılması için bu tür anemometreler belirli aralıklarda ve yükseklikte kurularak en az bir yıllık ölçüm alınmaktadır.



Şekil 1.1. Anemometre

Rüzgâr ölçümlerinde kullanılan anemometreler temelde analog ve sayısal anemometreler olmak üzere iki tipe üretilirler. Bu anemometreler arasında kup anemometre, pervane tipli anemometre veya ultrasonik anemometre gibi farklı çeşitler bulunmakla birlikte en yaygın olarak kullanılanı ise kup anemometredir. Kup anemometreler İrlandalı T. R. Robinson tarafından icat edilmiş olup, genellikle rüzgâr hızı ölçme amaçlı kullanılmaktadırlar (Krinstensen, 1999).

#### 1.1.6. Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisinin durumu

Gelişen teknoloji ile artık ülkeler de enerji yatırımları ile yarış halindeler. Herkes bu yarışta önde olmayı hedeflemektedir. Enerji bağımlılığının önüne geçen yenilenebilir enerji teknolojisi ve yatırımları gelecekte çok daha kritik öneme sahip olacaktır.

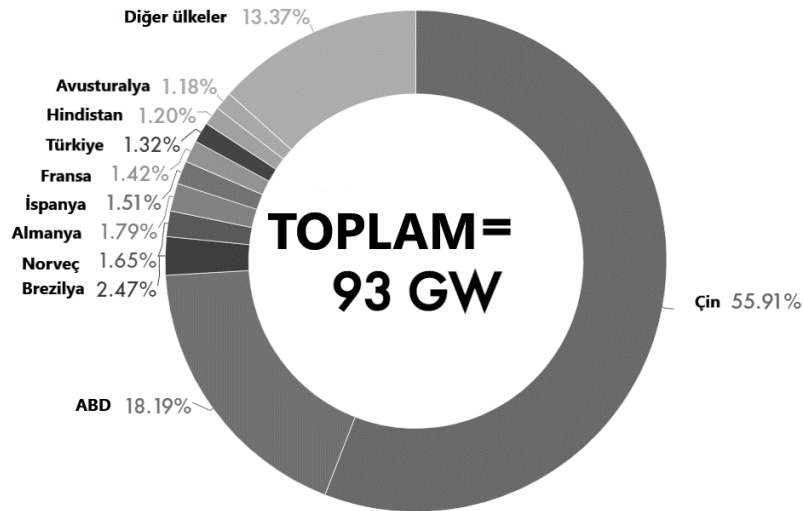
##### 1.1.6.1. Dünya’da rüzgar enerjisinin durumu

Dünyadaki kurulu güce bakacak olursak Çin, ABD, Almanya, Hindistan ve İspanya ilk beş sırada yer alan ülkeler. Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi’nin (GWEC – Global Wind Energy Cocuncil) 2017 yılı sonunda yayınladığı rapora göre Çin 188,392

MW kurulum ile her ne kadar birinci sırada olsa da ülkesindeki toplam elektrik ihtiyacının yalnızca %4,8'ini rüzgar enerjisinden karşılıyor.

Almanya ise yüzölçümü olarak Türkiye'nin yarısı büyüklüğünde olmasına ve rüzgar enerjisi potansiyeli de Türkiye'ye oranla %25-%30 daha düşük olmasına rağmen her yıl yaklaşık 5.000 MW rüzgar enerjisi santrali işletmeye alıyor ve dünyada 3. sırada yer alıyor.

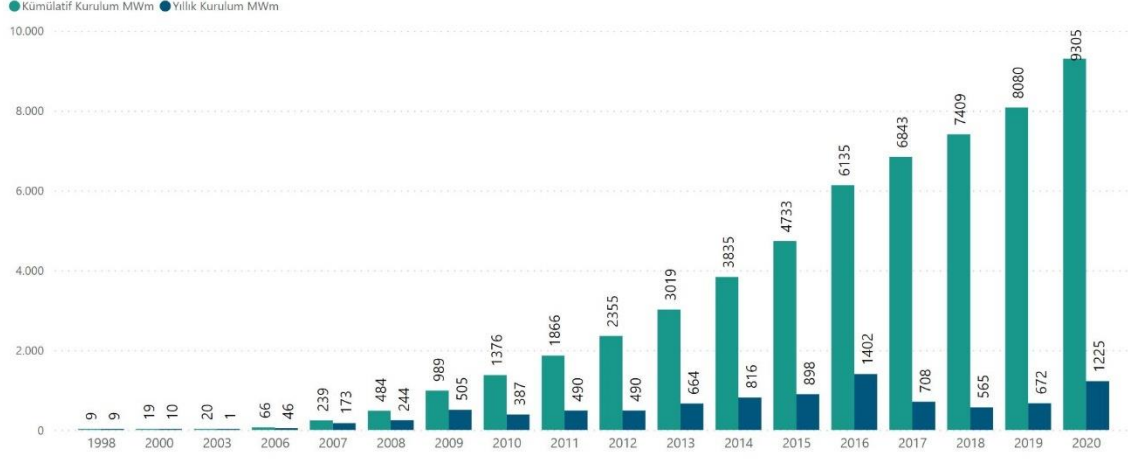
Danimarka ise offshore (Deniz üstü) rüzgar santralleri ile bilinen bir ülkedir. Danimarka, toplam elektrik enerjisi ihtiyacının %140'ını rüzgar enerjisi santrallerinden karşılarken enerji fazlasını da Almanya, Norveç ve İsveç gibi ülkelere ihraç ediyor. Türkiye, 2021 yılı itibarıyla rüzgar enerji santrali kurulumunda Avrupa'da 7'inci, Dünyada ise 12'inci sırada bulunmaktadır (TUREB, 2021).



Şekil 1.2. Dünya ülkelerinin kurulu gücüne göre payları (GWEC, 2021)

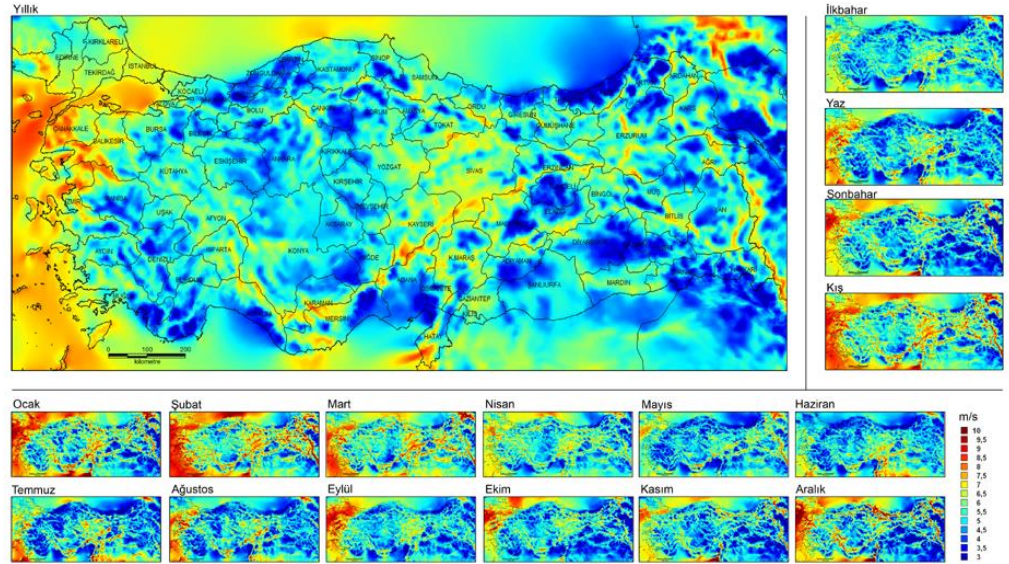
#### 1.1.6.2. Türkiye’de rüzgar enerjisinin durumu

1998’de otoprodüktör olarak İzmir Çeşme bölgesinde 1.74 MW kurulu güç ile ilk rüzgar enerjisi santralinin kurulmasıyla Türkiye’de rüzgar sektörüne giriş yapılmıştır. Bundan sonra 2006 yılıyla birlikte rüzgar sektöründe gelişmeler başlamıştır. Şekil 1.3’de de görülebileceği gibi 1998 yılından 2020 yılına kadar Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücü hızla atmış ve 9305 MW’a ulaşmıştır (TUREB, 2021).



Şekil 1.3. Türkiye’de 1998-2020 rüzgar kurulu gücü gelişimi (TUREB, 2021)

Aynı zamanda WWEA 2009 raporuna göre 2009 yılı için Türkiye Rüzgar Enerjisi sektöründe büyüme oranı olarak %132 ile ikinci en yüksek oranda büyümeyi göstermiştir. Raporda Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Anlaşması’na uyum sağlamak amacıyla yaptığı çalışmalarla Türkiye’nin yenilenebilir enerji alanında, hızla dünya çapında bir gelişme göstereceği belirtilmektedir. Türkiye’nin rüzgar enerjisi haritası Şekil 1.4 ‘de görülmektedir.



Şekil 1.4. Türkiye’nin rüzgâr potansiyeli atlası

Bununla birlikte 2009 yılında Türkiye, küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda uluslararası tek anlaşma olan Kyoto protokolüne imza atmasıyla, atmosfere salınan sera gazı miktarının %5’e çekilmesini, endüstri motorlu taşıt ve ısıtmadan kaynaklanan sera gazını azaltmayı amaçlayan mevzuatların düzenlenmesini, daha az

enerjiyle ısınma, araçların daha uzun yol kat etmesi, daha az enerji tüketen teknoloji sistemlerinin endüstride kullanılmasının sağlanması, atmosfere bırakılan metan ve karbondioksit oranının düşürülmesi için alternatif enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi, fazla yakıt tüketen ve fazla karbon üreten fazla vergi alınması gibi şartları da uygulayacağını kabul etmiştir (T.C. Resmi Gazete S.27227, 2009).

#### **Yönetmelikler:**

Türkiye’de bu kapsamda çıkarılmış kanunlardan; “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” gereğince “Bir bağlantı noktasında, sistemin kısa devre gücünün en fazla %5’i kadar kurulu güçte rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi bağlantısına izin verilir.” (T.C. Resmi Gazete S. 25639, 2004; T.C. Resmi Gazete S. 27007, 2008) denilerek tesisin gücü kısa devre gücünün %5’i ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca 18/4/2007 tarihli ve 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunun 17. Maddesiyle, 10/5/2005 tarihli ve 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun 6. maddesinde yapılan değişiklikle yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektrik enerjisinin satın alınması için uygulanacak fiyat; her yıl için, EPDK’nın belirlediği bir önceki yıla ait Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatıdır (T.C. Resmî Gazete S. 26510, 2007). Ancak uygulanacak bu fiyat 5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından az, 5.5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından fazla olamaz. Ancak 5.5 Euro Cent/kWh sınırının üzerinde serbest piyasada satış imkânı bulan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisans sahibi tüzel kişiler bu imkândan yararlanırlar.” (T.C. Resmî Gazete S. 26510, 2007) ile belirlenmiş, aynı yasanın 8. Maddesi, 5627 sayılı kanunun 18. Maddesi ile değiştirilerek (T.C. Resmî Gazete S. 26510, 2007) rüzgar enerjisi kaynaklı elektrik üreten santrallere alım garantisi getirilmiş, teşvik amaçlı olarak kurulum için arazi ve santral sahası temininde kolaylık sağlanmıştır.

#### **1.1.7. Küçük rüzgar türbinlerinin optimizasyonu projesi**

Dünya devi markaların üretim yeteneklerini ve kullandığı üstün teknolojilerini, mühendislik yetkinliklerini elde etmek Türkiye için çok zaman alabilmektedir. Halihazırda Türkiye’de, özellikle İzmir ilinde, üretim yapan birçok yerli ve yabancı ortaklı üretici firma mevcuttur. Ancak dünya üzerinde küçük ölçekli rüzgar türbinleri için tek el hala oluşturulamamıştır. Bu da bu alanda büyük yatırımların yapılabileceğini göstermektedir.

Özellikle rüzgar enerjisinde tam kapasitesine ulaşmamış Türkiye gibi ülkeler bu konuda AR-GE ve yerli üretim çalışmalarına hız vermek istemektedir. Türkiye Cumhuriyeti 2016 senesinde yerli üretimi destekleyecek ve üretimi arttıracak önlemlerini duyurmuş ve bu tüm pazarda yerli üretim konusunda ön çalışmaların başlamasına sebep olmuştur. Yerli üretimde başarılı olunabilecek bir konuda küçük rüzgar türbinleridir. 1990'lı yıllardan beri üretilen bu türbinler bahsi geçen büyüme sonrasında küçük türbin kategorisinde değerlendirilmeye başlanmış ve birçoğu 30 seneyi aşkın bir süredir üretilmektedir.

Projesinin ana amacı küçük ve orta ölçekli rüzgar türbinlerinin ana şebekeden uzak noktalar ya da düşük kapasiteli şebeke bağlantıları olan noktalarda kullanımı için tanıtımının yapılması, bu şartlara uygunluğu için geliştirilmesi ve nihayetinde belirtilen şartlar uygulanabilir hale getirilmesidir. Bunu yaparken aynı zamanda yerel rüzgar yapısı ve altyapı olanaklarına uygun bir yol izlenmesi de hedeflenmektedir. 3 senelik projenin beklenen çıktıları şöyle özetlenebilir:

- Projeye üye ülkelerde küçük türbinleri tanıtmak, uygulanabilir hale getirmek ve yerli üretimi desteklemek
- Üye ülkelerde kullanabilecek hızlı ve basit bir fizibilite yöntemi geliştirerek küçük türbin yatırımlarının artmasını sağlamak
- Üye ülkeler arasında küçük türbinler konusunda ortak çalışma ve iletişim ağı oluşturabilmek ve projeden sonrada bu iletişimi canlı tutabilmek.

İspanya, Finlandiya, Türkiye, Meksika, Arjantin, Dominik Cumhuriyeti, Romanya ve Uruguay olmak üzere 8 araştırma kurumunun katılımı ile yürütülecektir.

Bu vesileyle birçok ülkede küçük ölçekli türbinlerin daha fazla noktada kolayca kullanılabilmesi, fizibilite çalışmalarında ön hazırlık sürecinin hızlı bir şekilde aşılabilmesi ve halk tarafından kabullerini arttıracak çalışmalar yürütülmeye başlanmıştır (Bingöl, 2017).

## **1.2. Rüzgâr Türbinleri**

Rüzgâr türbinleri ürettikleri mekanik enerjiyle genellikle türbine bağlı elektrik jeneratörlerini çalıştırır. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgârdan sağlanabilecek enerji rüzgâr hızına bağlıdır. Rüzgâr hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı olarak artar. Günümüzde bazıları ticari amaçlı olmak üzere çeşitli

türlerde rüzgâr türbinleri bulunmaktadır. Rüzgâr türbinleri güç esasına, dönme eksenine ve dönme hızına göre sınıflandırılabilir (Altan, 2006).

### **1.2.1. Güç esasına göre sınıflandırma**

#### **1.2.1.1. Mikro türbinler**

Bu türbinler yaklaşık olarak 0 ile 3 kW arasında olup, batarya şarj etmek üzere kullanılmaktadır. Buna ilişkin pazar düşünüldüğünde bu kapasitede bir enerjinin ihtiyaca cevap vereceği yerler; uzak iletişim sistemleri, gezi tekneleri, karavanlar, ev içi sistemler, elektrikli çitler vb. yerler düşünülmektedir.

#### **1.2.1.2. Küçük rüzgâr türbinleri**

Genellikle 2 ile 10 kW arası rüzgâr türbinleri olup Bergey, Westwind, Proven ve LMW tarafından geliştirilmiştir. Birkaç üreticinin tasarım ve prototip aşamalarında olan 50 kW'a kadar doğrudan tahrikli türbini vardır. Bunların hepsi sabit mıknatıslı jeneratör kullanırken, bir tek Atlantic Orient Corporation (AOC) firmasının 20 kW lık bir modelinde anahtarlamalı relüktans motoru kullanılmıştır. AOC jeneratörleri halen laboratuvarlarda test edilmektedir. Anahtarlamalı relüktans motorunun rotorunda yalnız lamine saç bulunur ve jeneratörlerin en basitidir (Yerebakan, 2001).

#### **1.2.1.3. Büyük rüzgâr türbinleri**

100 kW'tan daha büyük olan sistemlerdir. Doğrudan tahrikli sistemleri kullanan büyük rüzgâr türbinlerinin gözlenen yararları şunlardır: Dişli sistemden daha düşük maliyetli, kule-baş kütlelerinde ve kabin uzunluğunda düşüş, verimlilikte belirli bir yüzde artışı. Bu faydaların mevcut tasarımlarda da elde edilip edilemeyeceği henüz belli değildir. Doğrudan sürücülü makinelerde her zaman için, arkasından AC/DC/AC dönüştürücü yer almakla değişken hızlı işleme imkân vermektedir. Çoğu doğrudan sürücü sistemlerinde, endüksiyon makinelerinin uyumluluğundan yoksun oldukları için sabit hızlı işletim yapmak zordur. Doğrudan sürücülü türbinlerde nominal güç 200 kW dan 1.5 MW'a kadar değişir. Hem sabit mıknatıslı hem de sargılı rotor tasarımları kullanılmaktadır.

Her ne kadar doğrudan sürücü sisteminin geliştirilmesi büyük rüzgâr türbinlerinde büyük kütle ve maliyet düşüşlerine imkan verecek gibi görünse de, tam entegre bir jeneratör rotoru ve rüzgâr türbini tasarımında, tasarımın basitleştirilmesi, geniş menzilli değişken hızın kullanılması ve dişli kutusunun gerektirdiği bakımın ortadan kalkması, doğrudan sürücülü sistemlerin gelişimine desten vermiştir (Yerebakan, 2001).

#### **1.2.1.4. Megawatt rüzgâr türbinleri**

Rüzgâr endüstrisinde her MW güç artışı için çok büyük fonlar harcanmaktadır. Halen birkaç MW'lık güç aşılamamıştır. Güç büyüdükçe tasarımda olumsuz etkiler artmaktadır. Büyük ölçekli üretim birimleri bazı karasal ve özellikle off-shore uygulamalarında hala tercih edilmektedir. Tek bir desten yapı üzerinde birkaç çarktan oluşan çoklu çark sistemleri, iyi ekonomik değerlere sahip 5 ile 10 MW'lık birimleri en düşük yenilik ve geliştirme maliyetleri ile gerçekleştirme konusunda çözüm olarak görülmektedir. Bu tür sistemler uzun zamandır inceleme altındadır ve bu kapsamda Lagerway'in birkaç eski ve bir yeni tasarımı inşa edilmiştir. Birkaç yıldır İngiltere'de yapılan son araştırmalar ve Hollanda'da yapılan çalışmalar konuya duyulan ilgiyi göstermektedir (Karadereli, 1995, 2001).

#### **1.2.2. Dönme eksenine göre sınıflandırma**

Bir diğer sınıflandırma, ana milin dönme eksenine göre konumudur. Yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Bunlar Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinler (YERT) ve Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT)'dir.

##### **1.2.2.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)**

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenleri, rüzgâr yönüne paralel ve kanatları rüzgâr yönüne diktir. Türbin, yatay bir eksen etrafında dönmesi nedeniyle bu isimle adlandırılır ve rüzgârı en uygun biçimde alabilecek durumda, kule eksenini etrafında dönebilecek şekilde yataklanarak yerleştirilmiştir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin büyük çoğunluğu, rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca türbini kulenin gerisinde olan rüzgâr türbinleri de mevcut olup, yaygın bir kullanım alanına sahip değildir. Bu türbinlerde yönlendirme dümenine gerek yoktur. Rüzgâr geliş

açısına göre tasarlanmış küçük üniteler için bir kuyruk dümen kanadı kullanılır. Büyük sistemlerde yönlendirme, genellikle servo motor mekanizmaları ile yapılır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması şu şekildedir:

- A. Klasik Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri
- B. Düşük Hızlı Rüzgâr Türbinleri
- C. Yüksek Hızlı Rüzgâr Türbinleri
- D. Diğer Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

#### 1.2.2.2 Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)

En eski tip olarak bilinen düşey eksenli rüzgâr çarkları, dönme eksenleri düşey ve rüzgâra dik konumda çalışır. Bu tip rüzgâr çarklarında, kanatların yüzeylerine gelen itme kuvveti farkı nedeni ile dönme hareketi oluşur. Modern düşey eksenli rüzgâr çarkları üzerindeki ilk çalışmalar Savonius ve Darrieus tarafından yapılmıştır. Daha sonra her iki rüzgâr çarkı tipinin mahsurlarını gidermek için, birleşik Savonius-Darrieus rüzgâr çarkları geliştirilmiştir. Düşey eksenli rüzgâr çarklarının önemli ve geliştirilmiş tipleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

- A. Sürüklenme kuvveti ile çalışan rüzgâr çarkları:
  - 1. Savonius tipi rüzgâr çarkları
  - 2. Lafond tipi rüzgâr çarkları
  - 3. Panemone tipi rüzgâr çarkları
- B. Kaldırma kuvveti ile çalışan rüzgâr çarkları:
  - 1. Darrieus tipi rüzgâr çarkları
  - 2. Giromill tipi rüzgar türbinleri
  - 3. Helisel Rüzgar türbinleri
- C. Sürüklenme-Kaldırma tipi rüzgâr çarkları (Birleşik Tip):
  - 1. Birleştirilmiş Savonius-Darrieus çarkları
- D. Diğer düşey eksenli rüzgâr çarkları

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde türbin mili düşey ve rüzgârın geliş yönüne diktir. Daha çok deney amaçlı üretilmişlerdir. Ticari kullanımı çok azdır. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri her istikamette çalışabilirler. Değişen tüm rüzgâr yönlerinde dönerler. Güç üretiminde tercih edilmezler (Atlıhan, 2006). Bu türbinlerin avantajları şu şekildedir:

- Türbini rüzgâr yönüne çevirmeye gerek yoktur. Yani dümen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakımı ve onarımı kolaydır.

Bu türbinlerin dezavantajları ise şunlardır:

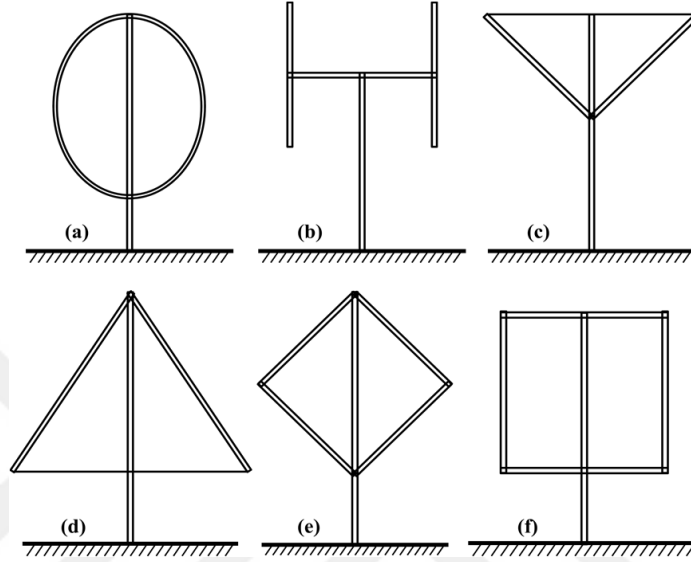
- Yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgâr hızları düşüktür.
- Verimi düşüktür.
- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir. Bu da pek pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde makinenin tamamının yere yatırılması gerekir (Karadereli, 2001).

### 1.3. Darrieus Rüzgâr Türbinleri

Darrieus rüzgar türbinleri dünyadaki rüzgâr türbinlerinin büyük çoğunluğunu teşkil eden geleneksel yatay eksenli pervane tiplerin aerodinamik olarak gelişmiş uyarlamalarıdır. Geçen son 20 yıl içerisinde, Darrieus tipi düşey eksenli rüzgâr türbinleri üzerine büyük araştırmalar ve önemli mühendislik gelişmeleri kaydedilmiştir. Bununla beraber bu türbinler pervane tipli rüzgar türbinleri kadar yaygınlaşmamıştır.

Darrieus Rüzgar Türbinlerinin 1920'li yıllarda başlayan enerji üretimindeki yolculuğu resmi olarak Aralık 1931'de Fransız Uçay Mühendisi Georges J. M. Darrieus tarafından Amerika'dan alınan patentle kayıtlara geçmiştir. Üç kanatlı ve dört kanatlı tasarım modelleriyle patenti alınan modelin üzerinde birçok iyileştirme çalışması yapılmıştır. Zamanla birçok farklı tasarım ortaya çıkmış ve bunu deneyler ve uygulamalar ışığında hızlı bir gelişim süreci takip etmiştir. İngiltere'de, Fransa'da, özellikle de Kanada ve Amerika'da yapılan çalışmalar ile geliştirilen Darrieus Rüzgâr Türbini modellerinin; bıçak gibi ince tasarlanan kanat geometrileri aerodinamik özelliklere dikkat edilerek tasarlandığı için yüksek performans göstermektedir. Kanat inceliklerinden dolayı ilk harekete geçme kabiliyetleri iyi olmayan bu türbinlerin ilk hareketlerini sağlamaları için tasarımlarda farklı uygulamalara başvurulmuştur. İlk hareketin en iyi şekilde sağlanması için İngilizce kısaltması NACA olan Ulusal Havacılık Danışma Komitesi tarafından yapılan aerodinamik analizlerle ortaya koyduğu kanatçık modelleri kullanılmaktadır. Naca modellerinin her birinin sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri analiz ve uygulamalar ışığında hesaplanmış, deneysel olarak

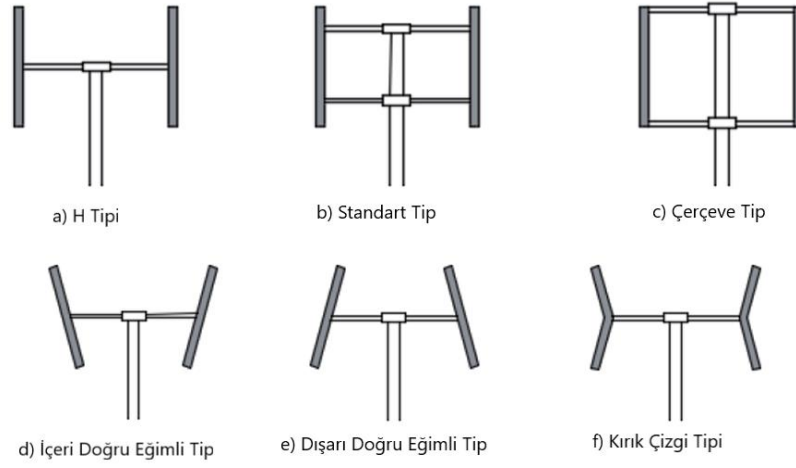
ölçümler yapılmış ve bu kanatçıklar tasarımlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte ilk hareketin sağlanması için dikey eksenli rüzgar türbinlerinden olan Savanius modelinden destek alarak veya direk motor tahriki aracılığı ile türbinin harekete geçmesi sağlanmaktadır. Şekil 1.5’de görüldüğü gibi darrieus rüzgar türbinin alt modelleri olarak konik tip, H tipi, mikser tip ve daha farklı birçok model geliştirilmiştir.



**Şekil 1.5.** Temel Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Konfigürasyonları: (a) Konik Tip, (b) H tipi, (c) V Tipi, (d) Delta Tipi, (e) Diamond Tipi ve (f) Giromill Tipi (Herbert J. Sutherland, 2012)

#### 1.4. H Tipi Darrieus Rüzgâr Türbinleri

Silindirik ve konik kanatçıklı modellerinden sonra 1970’lerin ortalarında tasarlanan düz kanatlı darrieus modelleri geliştirilmiştir. Çalışmamızda kullandığımız rüzgar türbin modeli H tipi darrieus rüzgar türbin modellerinin alt bir modeli olan ve Şekil 1.6’de “dışarı doğru eğimli tip” olarak isimlendirilen Delta tip darrieus rüzgar türbinidir. Şekil 1.6’de düz kanatlı darrieus modellerinden bazılarının görselleri görülmektedir.



**Şekil 1.6.** Çeşitli H Tipi Darrieus türbin modelleri ve bizim üzerine çalıştığımız model (e) (Tjiu, 2015)

Standart modellerle birlikte kanatları eğimli, kanat profilleri ve türbin konstrüksiyonları farklı modeller denenmiştir. Biz de bu modellerden birinin verimliliğini test etmiş olacağız.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin geliştirilmesi amacıyla son yıllarda çok sayıda önemli çalışmalar yapılmıştır. Çalışmaların yoğunlaştığı alan türbin verimliliklerini artırmak amacıyla kanat malzemesi ile birlikte kanat profillerinin ve kanat tasarımlarının analizi üzerinedir. Yeni çalışmalar ile bu konuda yeni birçok şey öğrenilmiştir. Dikey eksenli rüzgar türbinlerine dair birçok çalışma olmakla birlikte literatür taraması adına daha çok H tipi Darrieus rüzgar türbini ve türevlerine dair çalışmalar derlenmiştir.

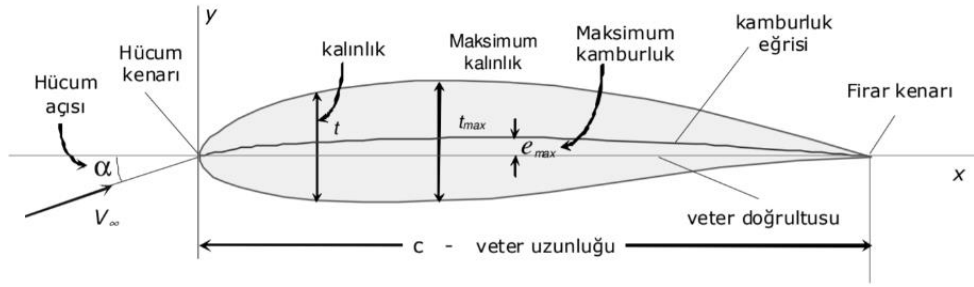
Atlıhan çalışmasında öncelikle rüzgar enerjisi tanıtılmış ve çeşitleri anlatılmıştır. Çok yaygın olmayan fakat uygulamaları çok eski olan Darrieus tipi rüzgar türbinleri ayrıntılı olarak anlatmış ve çeşitli tipteki rüzgar türbinlerinin geometrik yapılarını karşılaştırılmıştır. Yapımı ve geometrisi daha kolay olduğu için Sandia tipi rüzgar türbini incelenmiştir. Daha sonra, yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri karşılaştırılmış ve örnek bir hesaplama uygulaması yapılmıştır. Böylece rüzgar enerjisi oluşumundan türbin çeşitlerine ve hesaplamalarına kadar geniş bir araştırma alanı üzerine çalışmıştır. (Atlıhan, 2006). Amgad M. Ali ve arkadaşları çalışmalarında H-rotor Darrieus Türbin Performansının farklı profiller ile teorik etkisini mercek altına almıştır. Çalışmaları neticesinde RIS Ø -A1-21 kanat profilinin en yüksek verimliliği ürettiğini tespit etmişlerdir. Ancak S1046 kanat profilinin, denemeler yaptığı diğer dört kanat profili bölümüne kıyasla daha geniş çalışma aralığıyla mümkün olan en yüksek verimliliğe sahip olduğu sonucuna varmışlardır (Ali, Mohamed, & Hafiz, 2013). S. Brusca örnek model olarak NACA 0018 seçtiği çalışmasında, dikey eksenli düz kanatlı rüzgar türbininin en-boy oranı ile güç performansı (güç katsayısı,  $C_p$ ) arasındaki bağlantıyı analiz etmiştir. Yapmış oldukları sayısal analiz ile türbin performansının rotor kanadının Reynolds sayısından nasıl etkilendiğini üzerine durmuşlardır. Sonuç itibarıyla, en boy oranı düştükçe, rüzgar türbini performansını artıran Reynolds sayısının da yükseldiği tespitinde bulunmuştur (Brusca, Lanzafame, & Messina, 2014). Sung-Cheoul Roh ve Seung-Hee Kang çalışmalarında bir kanat profiline, Reynolds sayısının ve katılığın, düz kanatlı dikey eksenli bir rüzgar türbininin performansına etkilerini incelemiştir (Roh & Kang, 2013). Gomez ve arkadaşları, teknik kabiliyetlerin ve bilgilerin geliştirilmesi yoluyla rüzgar türbini kanatlarının güvenilirliğini artırmayı hedeflemişlerdir. Bu araştırmada, kanatları etkin bir şekilde tasarlamak için DesignFOIL ve ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Bu yatay eksenli rüzgar türbini,

rüzgardan elde edilen enerji miktarını en üst düzeye çıkarmak için kanatçıkların hücum açısını değiştirme imkanı sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu makalede Gomez ve arkadaşları, alternatif bir enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisinin arka planını ve kırsal bir ortamda nasıl uygulanabileceğini incelemişlerdir (Gómez, López, Jimenez, López, & Villalon, 2014). Mohan Kumar ve arkadaşları darrieus türbinlerinin düşük rüzgar hızlarındaki zayıf performansları nedeniyle yapılması gereken iyileştirmelere çözüm önerileri getirmeyi hedeflemişlerdir. Ortaya konan çözümlerin çoğu, düşük rüzgar hızı performansını artırmasına rağmen, yalnızca uç hızı oranında daha iyi performans göstermekle sınırlı kalmıştır. Değerlendirilen konseptlere dayanarak birkaç öneri geliştirilmiştir ve Darrieus türbini düşük hızda verim elde edilebilen bir cihaz haline getirmede uygulanabilir daha iyi bir çözüm için daha fazla kritik araştırmanın gerekli olduğu sonucuna varılmıştır (Mohan Kumar, Sivalingam, Lim, Ramakrishna, & Wei, 2019). Alqurashi ve arkadaşları darrieus rotor kanatlarını 3 farklı profil şekli olan (simetrik olmayan ve simetrik kanat profilleri) NACA 0021, LS413 ve S1046 kanat profilleri için aerodinamik kuvvet hesaplarını yapmıştır. Bu çalışmada Darrieus türbinlerinin rotor kanatlarındaki farklı aerodinamik kuvvetleri elde etmek için CFD simülasyonları kullanılmıştır. Mevcut sonuçlar, simetrik S1046 bıçağın hareket esnasında ve hareketsiz (statik) haldeyken daha yüksek kuvvetlere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, S1046 bıçaklarındaki aerodinamik burulmaya daha dayanıklı olması dolayısıyla NACA0021'in kendi kendine başlama kapasitesi S1046'dan daha iyi olduğu sonucuna varmıştır (Alqurashi & Mohamed, 2020). Su Jie ve arkadaşları çalışmalarında, orta seviye uç hız oranlarında güç çıkışlarını iyileştirmek için V şekilli bir kanat profiliyle yeni bir DERT tasarımı önermişlerdir. Elde edilen sonuçlar, optimum V şekilli bıçakta elde edilen güç katsayısındaki maksimum artışın yaklaşık %24,1 olduğunu göstermiştir. Güç verimliliğindeki bu büyük iyileşmeye ek olarak, V şeklindeki bıçağın rüzgar türbinine yanal yüklerden kaynaklanan hasarı hafiflettiği de kanıtlanmıştır. Bununla beraber, bıçak yüzeyi üzerindeki akış yapıları incelenmiş, V şeklindeki bıçağın akış ayrımını etkili bir şekilde baskılayabildiği ve bıçağın ortasındaki dinamik durmayı geciktirebildiği ve istenmeyen bıçak ucu etkisinin geleneksel düz bıçaklara kıyasla daha yüksek olmayacağı bilgisine ulaşılmıştır. Sonuç olarak V şeklindeki bıçağın DERT bıçaklarının tasarımı ve optimizasyonuna bakıldığında bu tasarımın pratik olarak uygulanabileceği sonucuna varılmıştır (Su et al., 2020). Çalışmamıza yakın bir benzerlik gösteren Jia Guo ve Liping Lei'nin çalışmasında ise eğimli düşey kanat açısıyla yenilikçi bir DERT tasarımı etrafındaki ve akış yönündeki

anlık akış alanları bir aktüatör hattı modeli ile simüle edilmiştir. Azimut açılarının varyasyonları ile rüzgar türbini etrafındaki kararsız akış özellikleri de değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma  $30^\circ$  ve  $150^\circ$  eğim açısına sahip rüzgar türbininin gölgesindeki toplam tahmini rüzgar enerjisinin,  $90^\circ$  eğim açısına kıyasla %4,6 daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu şekilde, çeşitli eğim açılara sahip rüzgar türbinlerinin uygun şekilde düzenlenmesi durumunda, bu tasarımların kullanılacağı bir rüzgar çiftliğinde daha fazla güç çıkışı elde etme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılabilir (Guo & Lei, 2020). Guo ve arkadaşları yine aynı konuyu sonlu elemanlar yöntemiyle ele almışlardır. Kanatlar pozitif yönde eğildiğinde kanatların deformasyonunun ve destek kollarındaki gerilmelerin arttığı ancak kanatların negatif yönde eğildiğinde rüzgar türbininin doğal frekanslarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca artan kol aralığı yüksekliği, artan doğal frekanslarla birlikte yapısal performansı iyileştirdiği görülmüştür. Aksine, azalan kanat bağlantı uzunluğu, shaft bağlantı uzunluğu ve sürgü yüksekliği, azalan doğal frekanslarla birlikte yapısal performansı iyileştirmiştir (Guo, Zeng, & Lei, 2020). Limin Kuang ve arkadaşları düz kanatlı dikey eksenli rüzgar türbinlerinde türbülans şiddetinin türbinin aerodinamik performans üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Daha yüksek türbülans yoğunluklarının, düşük ve orta akış hızları altında DERT'lerin güç katsayılarını önemli ölçüde iyileştirebileceği sonucuna varmıştır (Kuang et al., 2021).

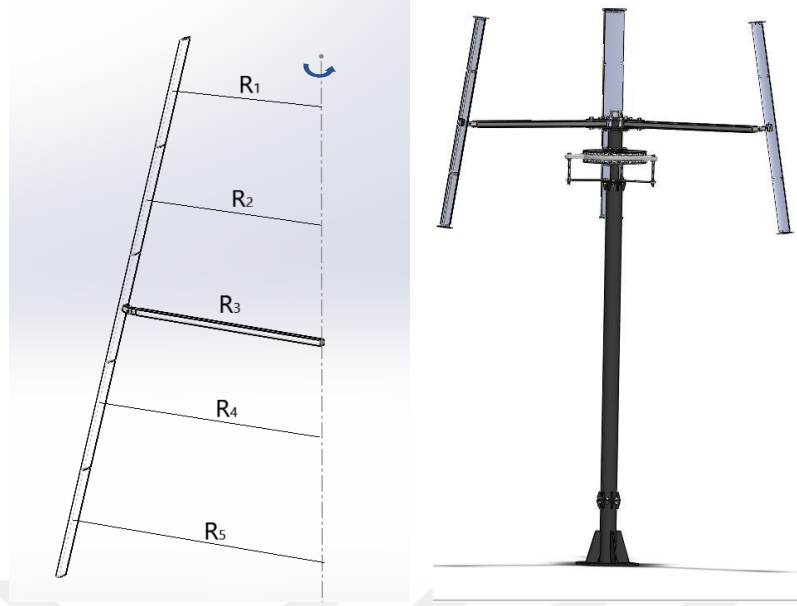
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Rüzgâr türbini birçok bileşenden medyana gelmektedir. Türbin şasesi, ana milin yataklamasında kullanılan rulmanlar, ana konstrüksiyon, cıvata-somun-rondela gibi bağlantı ekipmanları, kanatçıklar ve güç üreten alternatör. Bu bileşenler içerisinde en önemli parçalardan biri ise kanatçıklardır. Diğer bileşenlerden ayrı olarak, kanatçıklar; aerodinamik özellikleriyle elde edilecek enerjide önemli bir etkiye sahiptir. Bunu içindir ki rüzgâr türbininin verimini artırmak adına doğru kanatçık seçimi önem arz etmektedir. İhtiyacımıza en uygun kanat şeklini ve boyutlarını tespit edebilmek için kanatçığa etki eden hız ve kuvvet bileşenlerini çok iyi şekilde bilmek, incelemek ve hesaplamalarını yapmak gerekmektedir. Hız ve kuvvet değerlerine geçmeden önce bir kanatçık profilinin geometrisini inceleyelim.



Şekil 3.1. Kanat Profil Geometrisi (Yükselen, 2006)

Seçilen kanatçığın profili ateş topu şeklindedir. Bu geometrik yapı ile birlikte şehir içlerinde rüzgârın da türbülanslı ve her yönden geldiği düşünüldüğünde rüzgârın geliş açılarında, geliş yönlerinde ve şiddetlerinde büyük farklılıklar oluşmaktadır. “İki boyutlu bir cismin açıklığı boyunca bütün kesitleri etrafındaki akım özellikleri aynı kaldığı için böyle bir cismin aerodinamik performansı incelenirken sadece bir tek kesitin etrafındaki akım incelenmekle yetinilir (Yükselen, 2006).”

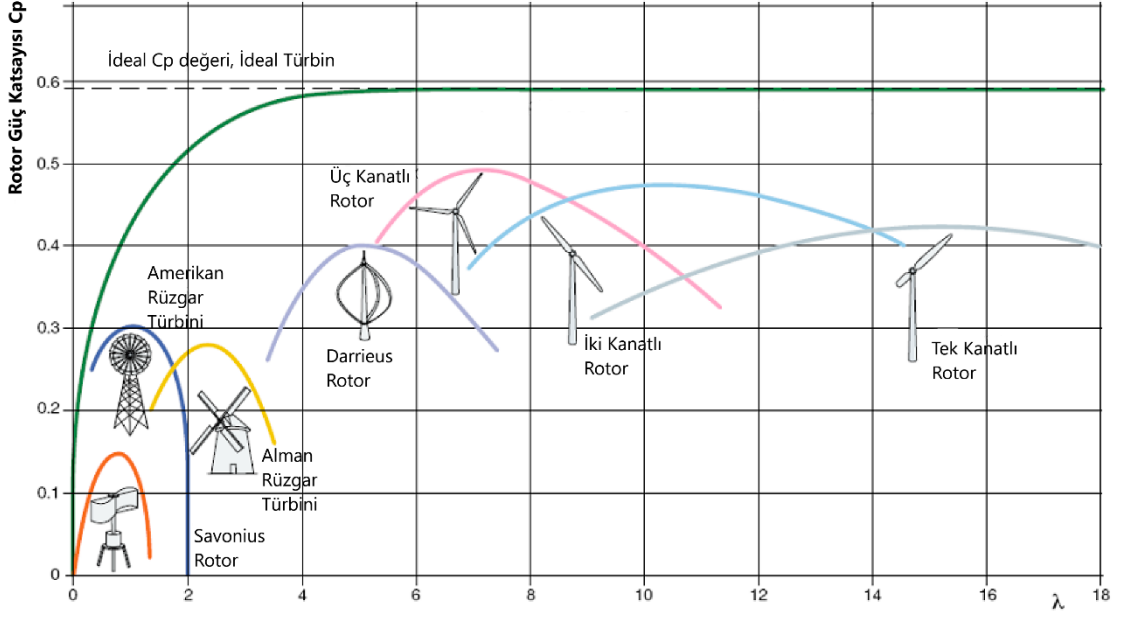


**Şekil 3.2.** Beşe bölünmüş kanat ve yarıçapları

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat tasarımı yapılırken birçok kritere dikkat etmek gerekir. Veter uzunluğu, hücum açısı ve kanat uzunluğu türbin tasarımında çok önemlidir. Veter uzunluğu kanada etkiyen teğetsel kuvvetten devir sayısı ve güç katsayısına kadar birçok değeri etkilemektedir. Veter uzunluğunu artırmak doğrudan devir sayısının ve verimin artmasını sağlamaktadır. Hücum açısının artırmak ise, belirli bir açı değerine kadar verim artışı sağlarken artış devam ettiğinde verim kaybına neden olmaktadır (Şamdan, 2016).

### 3.1. Betz Limiti

Rüzgar türbinleri ile ilgili ilk genel teori 1927 yılında Alman fizikçi Albert Betz tarafından tanımlanmıştır. Betz yasası, açık akışlı bir rüzgar türbininin, tasarımından bağımsız olarak rüzgardan çekebileceği maksimum gücü gösterir. Kanun, rüzgar akışından enerji çeken ideal bir “aktüatör diski” içinden akan hava akışının kütlelerinin ve momentumunun korunması prensiplerinden türemiştir. Betz yasasına göre hiçbir türbin rüzgarın kinetik enerjisinin 16/27’den (%59.3) daha fazlasını yakalayamaz. 16/27 oranı (0.593), Betz katsayısı olarak bilinir. Betz limitinin türetilmesi, yatay eksenli rüzgar türbinine dayandığı için doğrudan düşey eksenli türbinlere uygulanamaz. Fakat düşey eksenli rüzgar türbinleri, yatay olanlara göre daha düşük verime sahip olduklarından dolayı yine Betz limitini aşamazlar. Şekil 3.3’de Betz limiti ve bazı türbin tiplerinden elde edilebilecek güç katsayı değerleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** Farklı türbin tiplerinin güç katsayılarının uç hız oranına göre güç katsayısı (Ebrahimpour, Shafaghat, Alamian, & Safdari Shadloo, 2019)

Şekil 3.3 incelendiğinde, hiçbir rüzgar türbini ile elde edilebilecek gücün Betz limitinden fazla olamayacağı açıkça görülmektedir.

### 3.2. Kanada Etki Eden Kuvvet Bileşenleri ve Hesapları

Darrieus Rüzgâr Türbini, görünüşünden de anlaşılacağı gibi, tasarım itibarıyla çok basit olmasına rağmen, aerodinamik analizi oldukça karmaşıktır. Aerodinamik modellerin çoğunda ortak olan genel matematiksel ifadelerle bu formüller üzerinde durulacaktır.

Rüzgar türbininden elde edilecek güç süpürme alanı ve rüzgar hızının küpüyle orantılıdır. Süpürme alanı formülü şu şekildedir:

$$A = 2 \cdot R \cdot l \quad (3.1)$$

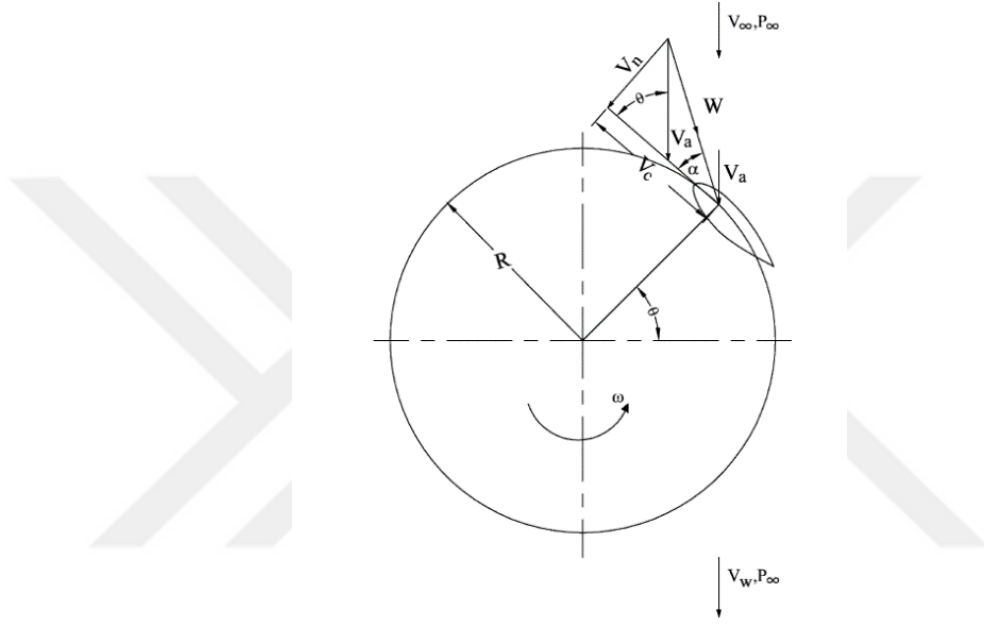
Burada A süpürme alanıdır ve birimi m<sup>2</sup>'dir. R yarıçaptır ve birim m'dir. l ise kanat uzunluğudur ve birimi m'dir.

Rüzgar türbininden elde edilebilecek enerji formülü ise:

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (3.2)$$

Burada  $\rho$ , Rüzgar havasının öz kütlesidir ve birim  $\text{kg/m}^3$ 'dür. A süpürme alanıdır ve birimi  $\text{m}^2$ 'dir.  $V_w$  ise türbine doğru esen sürekli rüzgar hızıdır ve birimi  $\text{m/s}$ 'dir.

H tipi Darrieus DERT'lerin türbinin farklı konumlardaki ve açılardaki akış hızları, Şekil 3.4'te görüldüğü gibidir. Kanat konumlarına göre hız değerleri sürekli değişebilmektedir. Hesaplamalar Islam ve arkadaşlarının tek akışlı tüp modeli üzerinden yapılacaktır .



**Şekil 3.4.** H tipi Darrieus Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinini etkileyen hız parametreleri (Islam et al., 2008)

Şekil 3.4’de, akışın eksen yönünde olduğu düşünülür. Teğetsel hız bileşeni  $V_t$  ve normal hız bileşeni  $V_n$  sırasıyla aşağıdaki ifadelerden elde edilir:

$$V_t = U + V_a \cdot \cos \theta = R \cdot \omega + V_a \cdot \cos \theta \quad (3.3)$$

$$V_n = V_a \cdot \sin \theta \quad (3.4)$$

Burada  $V_a$ , rotor boyunca kanata etki eden eksenel akış hızıdır (yani indüklenen hızdır),  $\omega$  açısal hız,  $R$ , türbin yarıçapı ve  $\theta$ , azimut (dönme) açısıdır.  $W$ , bağıl hızdır ve teğetsel hız  $U$  ve onu etkileyen rüzgâr hızı  $V_a$ ’ya bağlıdır. Buna göre bağıl hız formülü aşağıdaki vektörel işlem ile elde edilir:

$$\vec{W} = \vec{V}_a - \vec{U} \quad (3.5)$$

Bağıl hız  $W$ , teğetsel hız  $V_t$  ve normal hız  $V_n$  'nin bileşkesine eşittir:

$$W = \sqrt{V_t^2 + V_n^2} \quad (3.6)$$

Hücum açısı  $\alpha$  ise şu şekilde ifade edilir:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{V_n}{V_t} \right) \quad (3.7)$$

$V_n$  ve  $V_t$  değerlerini yerine yazdığımızda:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{V_a \cdot \sin \theta}{R \cdot \omega + V_a \cdot \cos \theta} \right) \quad (3.8)$$

Formülü elde edilir. Eşitlik  $V_a$  'ya bölüldüğünde aşağıdaki formüle ulaşılır.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{\frac{R \cdot \omega}{V_a} + \cos \theta} \right)$$

Uç hız oranı  $\lambda$  'nın elde edilmesi için formül ((3.9) kullanılmaktadır.

$$\lambda = \frac{\text{Teğetsel Hız}}{\text{Kanada etkiyen rüzgar hızı}} = \frac{V_t}{V_a} = \frac{R \cdot \omega}{V_a} \quad (3.9)$$

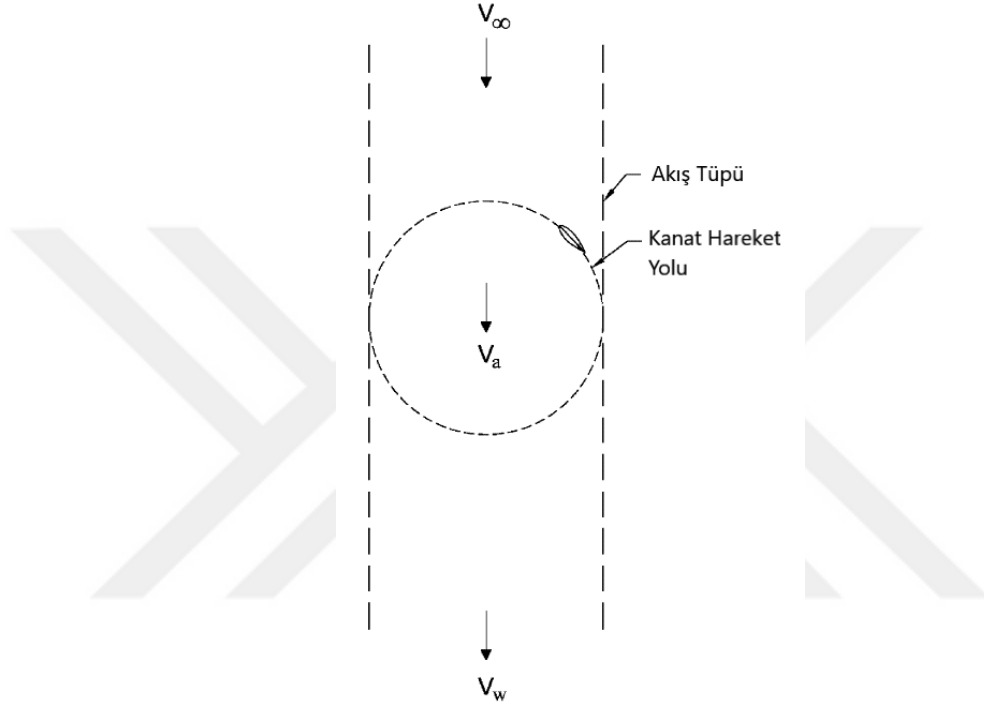
Uç hız oranı formülden de anlaşılacağı üzere kanatçığın rotor yarıçapına, kanat boyuna ve rüzgar hızına göre değişiklik göstermektedir.

### **$V_w$ ve $V_a$ ilişkisi**

1974 yılında Templin, Darrieus tipi bir VAWT'nin performans özelliklerinin hesaplanması için ilk ve en basit tahmin yöntemi olan tek akışlı tüp modelini önerdi. Bu teoride, indüklenen hız  $V_a$ 'nın akış alanı boyunca sabit olduğu varsayılır. Gluert Aktüatör Diski teorisine göre, rotor boyunca düzgün hızın ifadesi şu şekildedir;

$$V_a = \frac{V_\infty + V_w}{2} \quad (3.10)$$

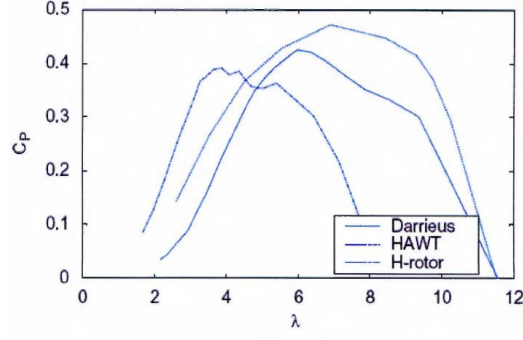
Burada  $V_w$ , akış izi hızıdır. Bu modeldeki bütün hesaplamalar, kiriş uzunluğunun gerçek rotor kanat profillerinin kiriş uzunluk toplamına eşit olduğu tek bir kanat için yapılır.



Şekil 3.5. Tek akışlı tüp modelinin şeması (Islam et al., 2008)

### $V_a$ 'nın saptanması

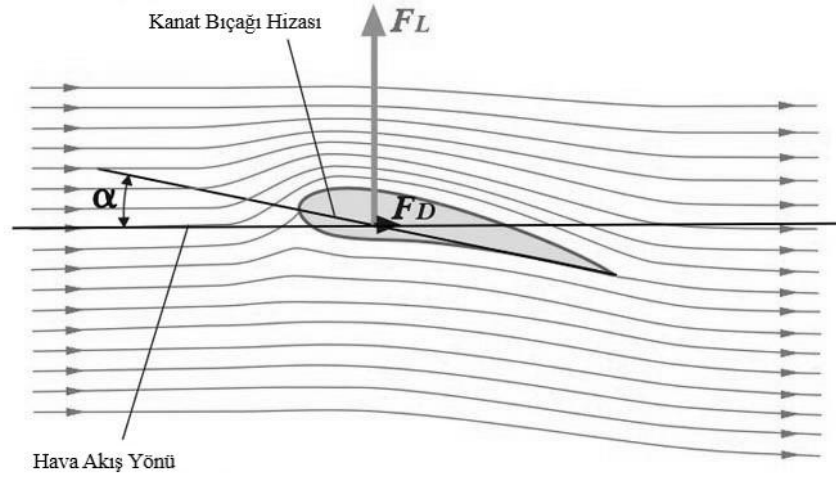
$V_a$ 'yı bulabilmemiz için birçok faktöre bağlı olan  $V_w$  değişkenini bilmemiz gerekir. Akış izi hızı  $V_w$ 'yi araştırmak için Betz kriterlerini göz önünde bulundurarak sadeleştirme yapmak gerekir. Betz yasası, ulaşılabilir maksimum gücün mevcut rüzgâr gücünün %59'u oranında olduğunu bilinmektedir. H tipi Darrieus rüzgâr türbinlerine dair uygulamalar iyi bir performans gösterecek türbin için ortalama güç katsayısı  $C_p$ 'nin %40 civarında olduğunu bildirmektedir. Şekil 3.6'da en yüksek  $C_p$  değerinin elde edildiği uç hız oranı  $\lambda = 4$  görünmektedir.



Şekil 3.6. Farklı türbinlerin farklı uç hız oranlarında güç katsayı değerleri (Stütz, 2008)

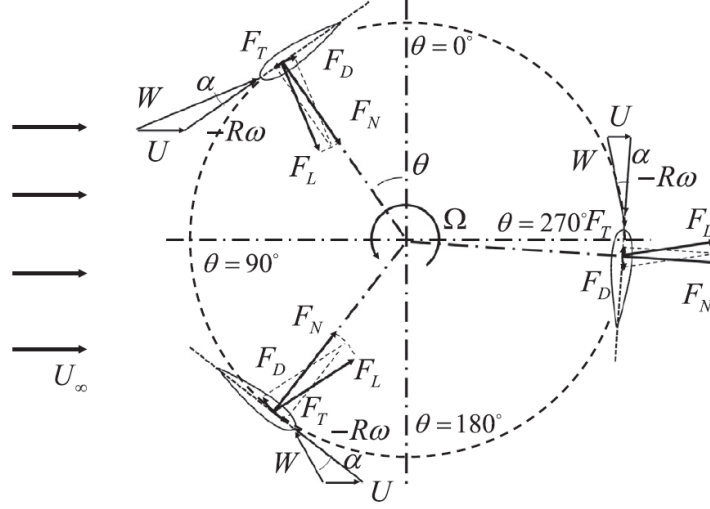
### Teğetsel ve normal kuvvetlerin değişimi:

“Kanat profilinin şekline ve hücum açısına bağlı olarak profilin çevresinde basınç dağılımı oluşur. Bu dağılım düzgün değildir. Genellikle profilin üst tarafında düşük basınç, alt tarafında ise yüksek basınç şeklinde olduğu ifade edilirse de basınç alanı her şeyden önce hücum açısı  $\alpha$  ve profilin şekli ile tayin edilir (Atlıhan, 2006).



Şekil 3.7. Kanat profili veter (kiriş) doğrultusu (Pengky, 2021)

Bu basınç farkından dolayı kanat üzerine etkiyen kuvvetler oluşmaktadır. Bunlar  $F_l$  (lift) kaldırma kuvveti ve  $F_d$  (drag) sürüklenme kuvvetidir (Şamdan, 2016). Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin yönleri ve bunların normal ve teğetsel bileşenleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.8.** Bir devir boyunca kanatçıgın mekanik karakteristiği ve kuvvet bileşenleri (Su et al., 2020)

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_r \cdot c \cdot l \cdot W^2 \quad (3.11)$$

Burada  $\rho$  hava öz kütlesi olarak,  $c$  veter uzunluğu,  $l$  kanat yüksekliği,  $W$  bağıl hız,  $C_r$  kaldırma ve sürüklenme katsayılarının bileşkesi olarak kullanılmıştır.

$$F^2 = F_d^2 + F_l^2 \quad (3.12)$$

$$C_r^2 = C_n^2 + C_t^2 \quad (3.13)$$

$F$  kuvveti iki bileşenden oluşmaktadır. Birisi sürüklenme kuvveti  $F_d$ 'dir, ki bağıl hız  $W$  ile aynı doğrultudaki kuvvettir, diğeri kaldırma kuvveti  $F_l$ 'dir, ki bu kuvvet de sürüklenme kuvvetine diktir.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot c \cdot l \cdot W^2 \quad (3.14)$$

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_l \cdot c \cdot l \cdot W^2 \quad (3.15)$$

Burada  $\rho$  hava öz kütlesi olarak,  $c$  veter uzunluğu,  $l$  kanat yüksekliği,  $W$  bağıl hız,  $C_l$  ve  $C_d$  sırayla kaldırma ve sürüklenme katsayıları olarak kullanılmıştır. Net teğetsel ve normal kuvvetler şu şekilde yazılabilir:

$$F_t = C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot l \cdot W^2 \quad (3.16)$$

$$F_n = C_n \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot l \cdot W^2 \quad (3.17)$$

Burada  $\rho$  hava öz kütlesi olarak,  $c$  veter uzunluğu,  $l$  kanat yüksekliği ve  $W$  bağıl hız olarak kullanılmıştır. Teğetsel kuvvet katsayısı  $C_t$ , temel olarak kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin teğetsel bileşenleri arasındaki farktır. Benzer şekilde, normal kuvvet katsayısı  $C_n$ , kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin normal bileşenleri arasındaki farktır.  $C_t$  ve  $C_n$  ifadeleri şu şekilde yazılabilir (Hansen, 2013);

$$C_t = C_l \cdot \sin \alpha - C_d \cdot \cos \alpha \quad (3.18)$$

$$C_n = C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha \quad (3.19)$$

Toplam teğetsel kuvvet ise şöyle ifade edilir (Paraschivoiu, 2002):

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (3.20)$$

Toplam tork ise:

$$T = N \cdot F_{ta} \cdot R \quad (3.21)$$

Burada  $N$  kanat sayısı,  $F_{ta}$  toplam teğetsel kuvvet değeri,  $R$  rotor yarıçapı olarak ifade edilmektedir.

Toplam güç:

$$P = T \cdot \omega \quad (3.22)$$

$T$ , toplam torku,  $\omega$  açısal hızı ifade etmektedir. Bu durumda Rüzgar Türbininden elde edilecek güç formülü şu şekilde açılabilir:

$$P = T \cdot \omega = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot c \cdot l \cdot R \cdot N \cdot \omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_t \cdot W^2 \cdot d\theta \quad (3.23)$$

Sistemimizin verimliliğini bulabilmek için ise  $C_p$  değerini şu formül ile elde edebiliriz:

$$C_p = \frac{P}{P_{Maks}} \quad (3.24)$$

$P_{Maks}$  değeri teorik olarak elde edilebilecek en yüksek rüzgar güç değerini vermektedir. Daha önceden verildiği gibi potansiyel rüzgar enerjisi değeri formül ((3.2) ile elde bulunur.

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3$$

Burada hava öz kütlesi  $\rho$  ile ifade edilir. A değeri kanat süpürme alanıdır.  $V_w$  ise rüzgar hızıdır. Bütün değerler yerine yazıldığında elde edilen değer, ki bu hesaplamada bütün kayıplar göz ardı edilmektedir, ulaşılması gereken potansiyel rüzgar enerjisini ifade eder ancak daha önceden de bahsedildiği gibi bütün kayıplar düşünüldüğünde Betz limiti olan %59 verimi aşmamız mümkün olmayacaktır. Yani türbin verimimiz Betz limitinin altında olacaktır.

Sistemin verimliliği Reynold sayısına da bağlıdır. Reynold sayısı büyüdükçe türbin performansının da artması beklenmektedir. Reynold sayısı arttığında kanatçıkların kaldırma katsayısı da artar, bununla beraber sürüklenme katsayısında bir azalma olur ve böylece daha fazla tork kuvveti elde edilmiş olur (Brusca et al., 2014; Şamdan, 2016).

$$Re = \frac{c \cdot W}{\vartheta} \quad (3.25)$$

Burada c veter uzunluğu, W bağıl hız,  $\vartheta$  ise kinematik hava viskozitesi olarak ifade edilmiştir. (Stütz, 2008)

Reynold formülündeki değerlerin eşdeğeri olan diğer değerler ile bazı değişiklikler yaparak hesaplamalarımızda daha rahat kullanabileceğimiz bir formül elde etmeye çalışalım;

$$W = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot R}{60} = \omega \cdot R = V_\alpha \cdot \lambda \quad (3.26)$$

Bir dönüşüm yapıp  $W$  bağıl hız yerine  $\omega \cdot R$  (açısal hız (rad/s) x Yarıçap (m)) çizgisel hız yazılır ve böylece dönüş açısından bağımsız bir formül olan;

$$Re = \frac{c \cdot V_a \cdot \lambda}{\vartheta} \quad (3.27)$$

elde edilmiş olur.

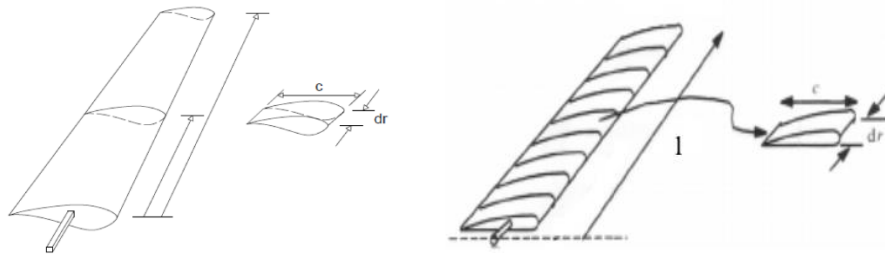
Böylece kanada etki eden bütün kuvvetler ve hesaplamalarında kullanılacak bütün formüller verilmiş oldu.

### 3.3. Kanat Elemanı Metodu

Kanat Eleman Metodu Glauert tarafından 1935 yılında ortaya atılmıştır. Bu metot ile birlikte farklı rüzgar hızlarında kanatçık üzerinde oluşacak farklı değerlerde lokal sürüklenme, kaldırma ve döndürme kuvvetlerini hesaplama imkanı elde edilmiştir. Bu aynı zamanda bu metot, farklı değerleri bir hesapta birleştirilip türbin veya kanatçığın tasarım aşamasında iyileştirmeler yapılabilmesine de olanak sağlamaktadır.

Kanat elemanı teorisi iki ana esasa dayanır. İlki, kanat elemanına etki eden kuvvet ve momentler, diğeri kanat profilindeki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri. Kanat elemanı teorisi, benzer birçok yöntem olmakla birlikte hava içindeki hareketinden dolayı kanatların davranışını analiz eden alternatif bir yöntemdir.

Bir boyutlu momentum teorisinin hesaplamasında kullanılan akış borusu, Şekil 3.9'de gösterildiği gibi kanatçıkların her biri  $dr$  kadar yüksekliği olan,  $N$  adet elemene ayrılmıştır. Bu unsurların ölçüm sınırı, akış çizgilerinden oluşur; başka bir deyişle, bu ayrıştırılan elemanlar arasında akış yoktur. (Hansen, 2013)



Şekil 3.9. Kanat Elemanı Metoduna göre kanatların tanımlanması

Genellikle Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin kanatları için kullanılan bu metodu biz dikey eksenli rüzgar türbininde kullanacağız.

Biz de eğimli şekilde montajını yaptığımız kanatçıklarımızı beş eşit parçaya bölecek ve her bir parçaya düşen kuvvetleri tek tek hesaplayıp kanatçıkların her birinden elde ettiğimiz verileri toplayıp türbin verimlerinin ortalamalarını alacak, böylece sistemin ortalama verimi hesaplamış olacağız.

Hesaplamamızda dikkat edilmesi gereken bir nokta da uç hız oranlarındaki değişimlerdir. Eğimli kanatçığımızın bölünmüş her bir parçası için Uç Hız oranı belirlenecek ve her parça için hesaplamalar bu uç hız oranına göre yapılacaktır. Formül ((3.28) ile kanatçığın uç hız oranları hesaplanacaktır.

$$\lambda_0 = \lambda_{r_1} \cdot \frac{r}{R} \quad (3.28)$$

Veter uzunluğu yarıçapa göre değişmemektedir.

### 3.4. Rüzgâr Türbininin Tasarım Kriterleri

Rüzgar türbinlerinin elektriksel güç üretme kabiliyetlerini karakterize etmek için bazı parametreler bulunmaktadır. Tasarıma ve üretime ancak bu parametrelerin bilgisi ışında bağlanabilir. Bu parametreler;

- Kanat Sayısı,
- Kanat Uzunluğu (H),
- Rüzgâr Hızı (V),
- Süpürme Alanı (A),
- Türbin Devir Sayısı,
- Veter Uzunluğu (c),
- Kanat Profili,
- Uç Hız Oranı (TSR),
- Katılık Değeri (N.c/R)
- Rotor Yarıçapı (R),

Yukarıdaki parametreler ve beraberindeki diğer katsayılar ile imalatını yaptığımız rüzgar türbininin bütün sayısal değerleri ortaya çıkacaktır. Bu parametreler için hangi değerlerin seçilmesi gerektiği konusunda karar alırken daha önce yapılmış

olan teorik ve uygulamalı bilimsel çalışmalar ışığında ortaya konan bilgilerden istifade edilecek ve değerler bu çalışmalar ile ortaya çıkan veriler ışığında kararlaştırılacaktır.

#### 3.4.1. Güç katsayısı, $C_p$

Güç katsayısı, bir rüzgar türbininin rüzgarın kinetik enerjisini mekanik güce dönüştürebilmesi kabiliyetini tanımlar. Diğer bir ifade ile türbinden elde edilen gücün türbine etki eden rüzgarın potansiyel gücüne oranıdır. Formül ((3.24)'de ifade edildiği gibi;

$$C_p = \frac{P}{P_{Maks}}$$

Burada,

$C_p$ : güç katsayısı

P: türbinden elde edilen elektriksel güç (W)

$P_{Maks.}$ : rüzgarın potansiyel gücü (W)

olarak ifade edilmektedir.

Türbinin konstrüksiyonu ve jeneratörle elektrik üretilmesi için kullanılan diğer mekanik aksamından kaynaklanan verim kayıpları da düşünüldüğünde rüzgar türbini ile elde edilen güç formül ((3.24)'den elde edilecek değerden daha düşük seviyede çıkacaktır.

Biz çalışmamızda bir güç katsayısı değeri seçilmeyecek, diğer türbin parametreleri ışığında oluşturduğumuz standartlar ile bir güç katsayısı elde edilecek ve bu veri tez sonunda tartışılacak ve değerlendirilecektir.

#### 3.4.2. Kanat uç hız oranı ( $\lambda$ )

Kanat ucu hız oranı (tip speed ratio,  $\lambda$ ) bir rüzgar hızı etkisi ile dönen bir türbinin kanatlarının uç kısmında oluşan çizgisel hızın normal rüzgar hızına oranıdır. Normalde kanat ucu hız oranını yüksek olması verimli bir elektrik üretimi sağlar, ancak türbinin çabuk hasar görmesi, gürültü problemi, titreşim, balans problemleri ve yüksek frenleme gücü gerektirmesi gibi nedenlerle yüksek kanat ucu hız oranı türbini olumsuz yönde etkiler.

$$\lambda = \frac{u}{v}$$

(3.29)

Burada,

$v$ : Rüzgar hızı (m/s)

$u = \omega \cdot r$ , kanat ucu hızı (m/s)

$r$ : türbin yarıçapı (m)

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ , kanat ucunun açısal hızı (rad/s)

$f$ : dönme frekansı

olarak tanımlanır.

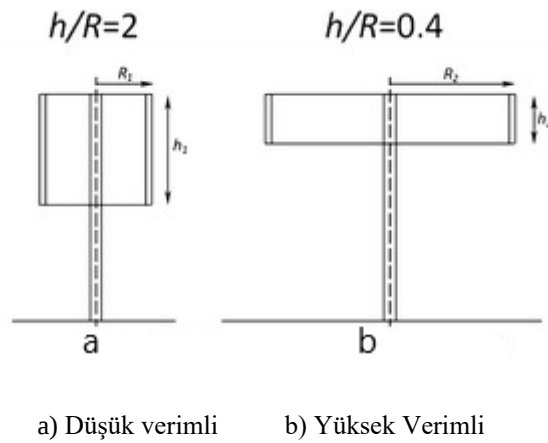
İmalatını yaptığımız türbin modeli H-rotor tipi darrieus'un bir alt türevidir. İçin güç katsayısı en iyi olan uç hız oranı Şekil 3.6'den görüleceği gibi 3-5 arasında bir değer olarak okunur. Bu bilgiler ışından ilk hesaplamamız için uç hız oranı 4 olarak kabul edilecektir.

### 3.4.3. Süpürme alanı ve R/H oranı

Rüzgarın potansiyel enerjisi hesap edildiğinde süpürme alanı değeri ile diğer parametreler çarpım halindedir. Yani elde edilecek elektrik enerjisi miktarını birebir etkileyen bir değerdir.

Formül ((3.2)'de ifade edilen güç formülünde de anlaşılacağı üzere süpürme alanı kanat yüksekliği  $H$  ve kanat rotor çapı  $R$  'nin çarpımı sonucu elde edilmektedir.

Elde edilmesi hedeflenen elektrik enerjisine göre kanat yüksekliği ve kanat rotor yarıçap değeri belirlenmektedir. Bu noktada yapılan hesaplamalar ve deneyler ışığında ideal bir  $H/R$  oranı belirlenmelidir.



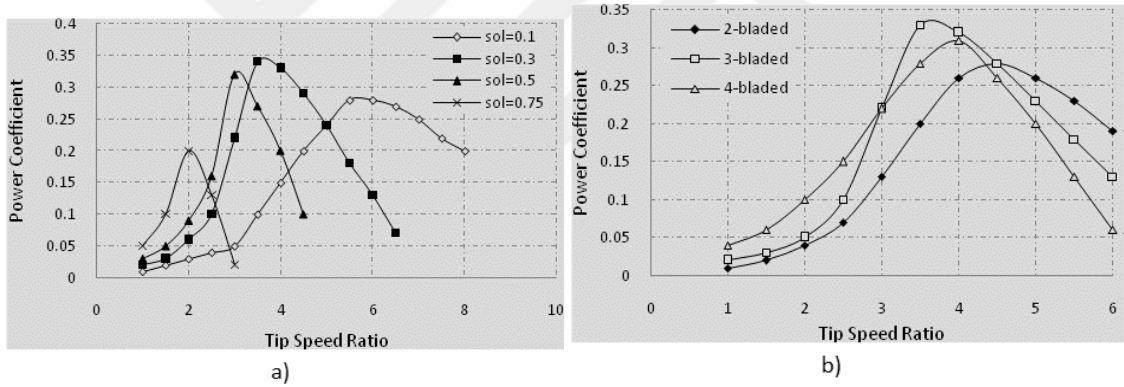
Şekil 3.10. Farklı en-boy oranlarında rüzgar türbinleri (Brusca et al., 2014)

Şekil 3.'dan da anlaşılacağı gibi en-boy oranı düştükçe kanatlarda oluşabilecek döndürme momenti de bu nispetçe artmaktadır.

İmalatı yapılmış olan rüzgar türbinimizde İdeal bir ölçüm yapılabilmesi için kanat uzunluğu 1 metre kabul edilmiş, deneyde kullanılacak alternatöre göre de kanat yarıçapı belirlenmiştir. İleride daha ayrıntılı hesaplamalar yapılacaktır.

#### 3.4.4. Kanat sayısı ve türbin katılık oranı

Türbin verimine etki eden en önemli parametrelerden birisi kanat sayısıdır. Kanat sayısı ile güç katsayısındaki verimlilik değerleri her zaman orantısal olmamaktadır. Kanat sayısı, aynı zamanda sistemin verimine direk etki eden katılık oranını da belirlemektedir. Bu da sistemin verimliliğinde büyük bir etkiye neden olmaktadır. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri üzerine yapılan çalışmalarda kanat sayısının etkisi de gözlenmiştir. Şekil 3.10-b incelendiğinde 2, 3 ve 4 kanatlı türbinlerin güç katsayıları görünmektedir. Grafik dikkatle incelendiğinde 3 kanatlı modelin daha verimli olduğu ortaya çıkmaktadır. Biz de bu bilgiler ışığında kanat sayımızı 3 olarak belirledik.



Şekil 3.11. Katılık değerinin ve kanat sayısının güç katsayısına etkisi (Brusca et al., 2014)

Kanat sayısının katılık oranını etkileyen önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Türbin verimliliğinin yüksek olabilmesi için türbin katılık değerine doğru karar verilmesi de büyük bir etkiye sahiptir. Katılık değerinin değişmesiyle elde edilen güç katsayısı ve kanat uç hız oranı da değişmektedir. Katılık değeri boyutsuz bir sayıdır. Birçok değişkene bağlı olan katılık değerinin formülü aşağıdaki gibidir;

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{R} \quad (3.30)$$

Burada,

$\sigma$ : türbin katılığı

N: kanat sayısı

R: türbin yarıçapı

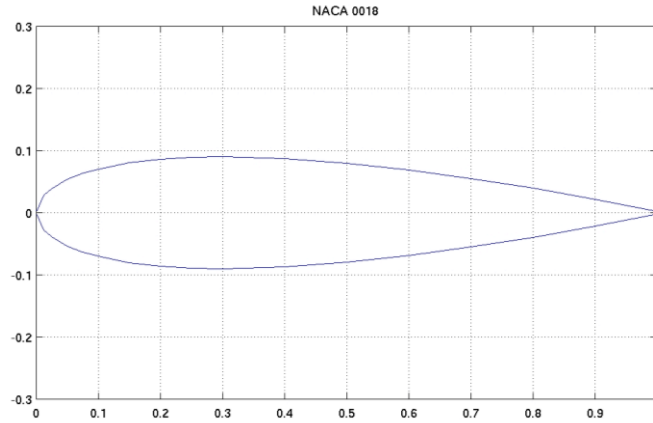
Olarak ifade edilmektedir.

Bu bağlamda Şekil 3.11-a'daki değerler göz önüne alındığında ilk hesaplama için türbin katılık değeri 0,3 olarak kabul edilecektir.

### 3.4.5. Kanat profili

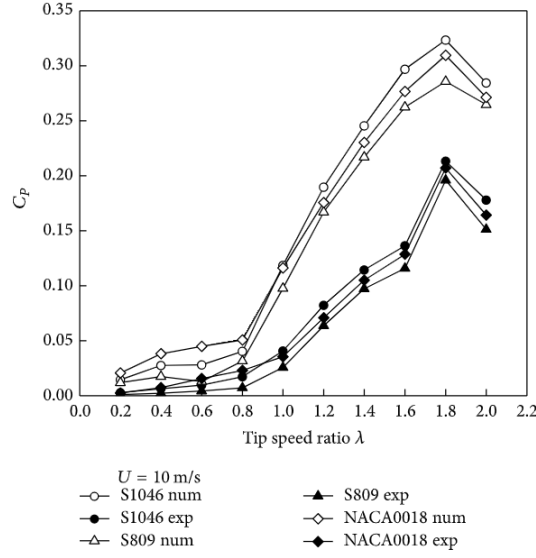
Rüzgar türbinini etkileyen en önemli parametrelerin başında kanat profili gelmektedir. İmalatını yaptığımız delta tip darrieus rüzgar türbininin zayıf yönlerinden birisi de düşük hızlardaki rüzgarlarda ilk harekete geçiş kabiliyetinin zayıf olmasıdır. Bu noktada yapılan çalışmalar NACA tip profillerin simetrik ve diğerlerine nazaran daha kalın versiyonlarının doğru bir seçim olacağını göstermektedir. Ağırlıkta Naca0012, Naca0021 ve Naca0018 gibi kanat profillerinin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Bu alandaki çalışmalar incelendiğinde düşük uç hız oranlarında kanat kalınlıklarının arttıkça verimliliklerinin de arttığı gözlemlenmiştir (Roh & Kang, 2013).

Delta tip darrieus türbini için seçilen kanat profilinin imalatında sert xps köpük kullanılmıştır. Sert köpüğün imalatında CNC Router'da sıcak rezistans ile kesim yapıldığından dolayı ince kanatçıkların imalatında ciddi zorluklarla karşılaşıldığı için kanat olarak Naca0018 kanat profili tercih edilmiştir.



Şekil 3.12. Naca0018 profilin boyutları (UIUC, 2021)

Naca0018 profilinin doğru bir tercih olduğunu teyit eden Feng ve arkadaşlarının çalışmasında Naca0018'e dair elde edilen güç değerleri incelenebilir.



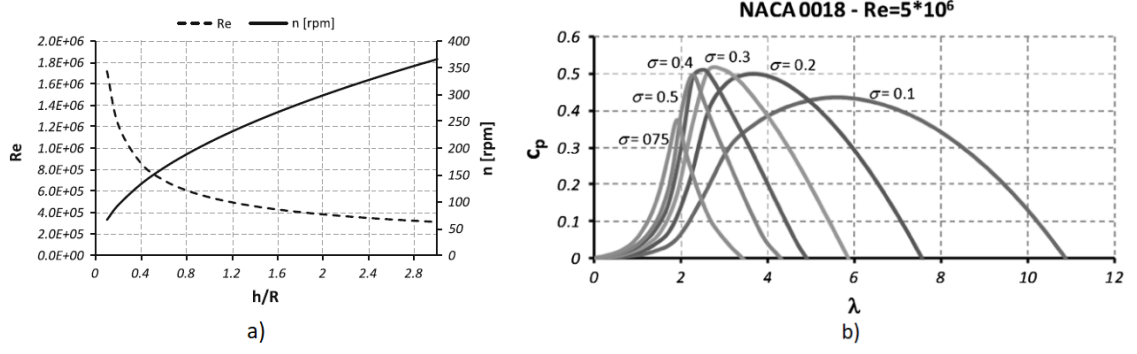
Şekil 3.13. Değişik kanat profillerinde güç katsayısı değerleri (Feng et al., 2018)

#### 3.4.6. Veter uzunluğu

Türbin tasarımında verime direk etki eden veter uzunluğu kanadın rüzgarı karşılayan oval kısmından kanadın en ince kısmı uç noktasına olan mesafesidir. Simge olarak  $c$  ile gösterilen veter uzunluğu, Şekil 3.1' de görülmektedir. Veter uzunluğu katılık oranına, kanatçık sayısına ve rotor çapına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bunun için tablodan bir değer seçilmeyecektir. Tasarımda seçilmiş olan değerler formül ((3.30)'da yerine yazılacak ve veter uzunluğu değerine ulaşılacaktır.

Veter uzunluğu darrieus modellerin en büyük handikaplarından olan ilk harekete başlama hızını da ciddi oranda etkilemektedir. Kanat kalınlığı, belli şartlar altında ve diğer parametreler sabit tutulduğunda, ne kadar artarsa ilk harekete geçme hızı o kadar düşmektedir. Türbin böylece daha düşük rüzgar hızlarında harekete geçebilmektedir.

Reynold sayısı güç katsayısına direk etki eden bir parametredir. Türbin en/boy oranlarının, uç hız oranının, rotor çapının değerlerine göre değişen boyutsuz bir sayıdır.



Şekil 3.14. Reynold sayısının h/R (a) ve Uç Hız Oranı ile değişimi (b) (Brusca et al., 2014)

Boyutsuz olan Reynold sayısı formül ((3.27)'de verilmiş olduğu gibidir.

$$Re = \frac{c \cdot V_a \cdot \lambda}{\nu}$$

Böylece türbin tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli parametreler üzerinde bir genel değerlendirme yapılmıştır.

### 3.5. Türbin Tasarımı ve İmalatı

#### 3.5.1. Türbin boyutlarının hesaplanması

İmalatı yapılacak olan rüzgar türbininin alternatör kapasitesine göre tasarım boyutları belirlenecektir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için bazı değerlerin kabul edilmesi gerekmektedir. Ortalama rüzgar hızı 8 m/s olarak, kinematik viskozite  $\nu$ ,  $1,46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kg}$  olarak, havanın öz kütlesi  $\rho$ ,  $1,18 \text{ kg}/\text{m}^3$  olarak, kanat uzunluğu 1 m olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılacaktır. Elimizde var olan motor gücü 100 Watt olup 24 Volt-DC bir alternatördür.

Rüzgar türbini verimine direk etki eden Reynold sayısı, Rüzgar Hızı, Katılık oranı gibi parametrelerin değişmesiyle bütün hesaplamaların da değiştiği unutulmamalıdır. Yapacağımız hesaplamalar anlık hesaplamalardır.

Rüzgar türbininin güç katsayısı formül ((3.24)'de verilmiştir.

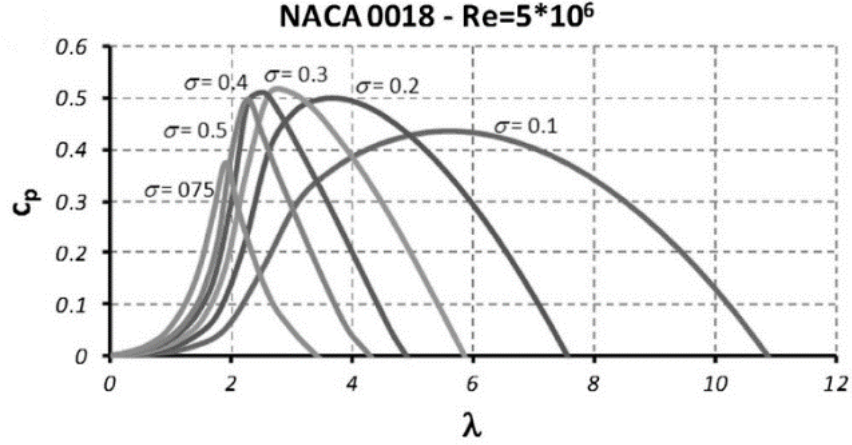
$$C_p = \frac{P}{P_{Maks}}$$

$P_{Maks}$  değeri teorik olarak elde edilebilecek en yüksek rüzgar güç değerini vermektedir. Yani rüzgarın potansiyel gücüdür. Formül ((3.2)'de verilen P değeri ise elde edilen gerçek anlık elektrik gücünü verir.

$$P_{Maks} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Formüller beraber düşünüldüğünde 100 Watt'lık Rüzgar Türbininden en ideal şekilde verim elde etmek için P gerçek gücü üzerinden boyutlandırma yapılmalıdır.

$$P = P_{Maks} \cdot C_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$



Şekil 3.15. Uç hız oranlarına göre güç katsayısının değişimi (Brusca et al., 2014)

Şekil 3.15’de Darrieus rüzgar türbin tiplerinin güç katsayılarının en iyi olduğu Reynold sayısı ve uç hız oranına göre değerler dikkate alınarak ilk hesaplamalar yapılmıştır. Bu grafikte Reynold değeri  $5 \times 10^6$  ve 0,3 katılık oranı için darrieus tip rüzgar türbinleri güç katsayısı değeri 0,51 olarak okunur. Güç katsayısı değeri formülde yerine yazıldığında;

$$100 = \frac{1}{2} \cdot (1,18) \cdot (A) \cdot 8^3 \cdot (0,51)$$

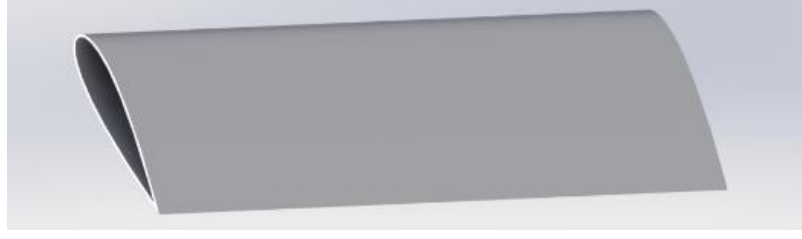
Bu hesaplama ile süpürme alanı olan A değeri  $0,65 \text{ m}^2$  çıkmaktadır. Kanat yüksekliğinin 1 metre olması planlanmıştır. Formül ((3.1)’de verildiği üzere süpürme alanı kanat yüksekliği ile kanat yarıçapın çarpımının iki katına eşittir. Böylece yarıçap yaklaşık  $R=33 \text{ cm}$  olarak bulunur.

Türbin katılık oranı bölüm 3.4.4’deki ayrıntılı olarak açıklanmış ve veriler ışığında katılık oranı 0,3 olarak kabul edilmiştir. Bu değere bağlı olarak veter uzunluğu buradan hesaplanacaktır. Katılık oranı formül ((3.30)’dan elde edilecektir.

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{R}$$

Buradan bilinen değerler yerine yazılarak c, veter uzunluğu çekilir;

$$c = \frac{0,3 \cdot 0,325}{3} = 0,0325 \text{ m}$$



**Şekil 3.16.** Viter uzunluğu hesaplanan NACA0018 kanat profilinin Solidworks ile çizimi

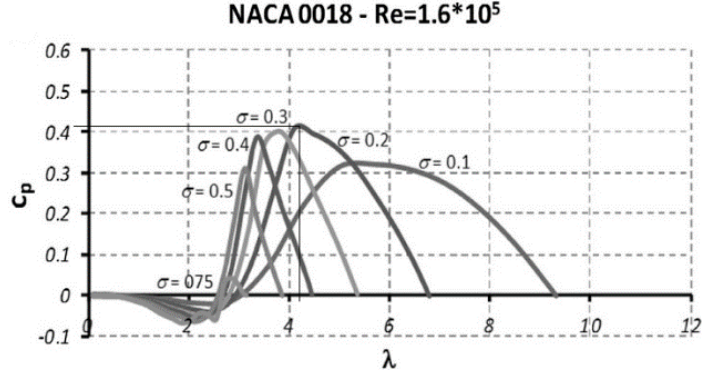
Hesaplanan değerler bütün şartların ideal olduğu, sürtünmelerin ve kayıpların yok sayıldığı bir çalışma ortamı için hesaplanmaktadır. Gerçek çalışma şartlarında bu devir sayısına ulaşmak hayli zordur. Devir sayısına formül ((3.26)’dan ulaşılacaktır.

$$W = V \cdot \lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot R}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot 0,325}{60} = 8.3 \rightarrow N = 705 \text{ dev/dk}$$

Buradaki N devir sayısı (kanat sayısı değil), R yarıçap, V rüzgar hızı,  $\lambda$  uç hız oranı, W bağıl hızı belirtmektedir. Diğer bilinenler ışığında N devir sayısına ulaşılır. Reynold sayısı formül hesaplanarak daha önce kabul edilmiş olan değerin bu şartlar ve boyutlar ışığındaki değerin doğruluğu kontrol edilir.

$$Re = \frac{0,0325 \cdot 8.3}{1,46 \times 10^{-5}} = 0,53 \times 10^5$$

Elde edilen değerler ışığında hesaplanan Reynold sayısı başlangıçta kabul edilen Reynold sayısının altında bir değer çıkmıştır. Brusca ve arkadaşlarının diyagramları kontrol edildiğinde elde edilen değere daha yakın olan Reynold sayısı  $1,6 \times 10^5$  için oluşturulan veriler esas alınarak işlemler tekrar yapılacaktır.



Şekil 3.17. Reynold sayısına göre güç katsayısının değişimi (Brusca et al., 2014)

Diyagramdan da anlaşılabacağı üzere en yüksek verimliliğe sahip olan çizgi için katılık oranı  $S = 0,2$ , Güç katsayısı değeri  $C_p = 0,413$ ,  $U_\infty$  hız oranı  $\lambda = 4,21$  olarak belirlenir. Bu şartlar altında tekrar yapılan hesaplamalar ışığında türbin yarıçapı  $R = 0,4$  m, Viter uzunluğu  $c = 0,028$  m olarak hesaplanır.

Rüzgar türbininin kanat uzunluğu, profil çeşidi, rotor yarıçapı gibi türbinin ana konstrüksiyondaki parametreler belirlendikten sonra bu seçimler ile elde edilecek kuvvetlerin hesaplaması yapılacaktır.



Şekil 3.18. İmalatı yapılan rüzgar türbininin yandan ve üstten görünümü

İlk hesaplamada ve ikinci hesaplamada elde edilen bütün değerler Çizelge 3.1’de özet olarak verilmiştir.

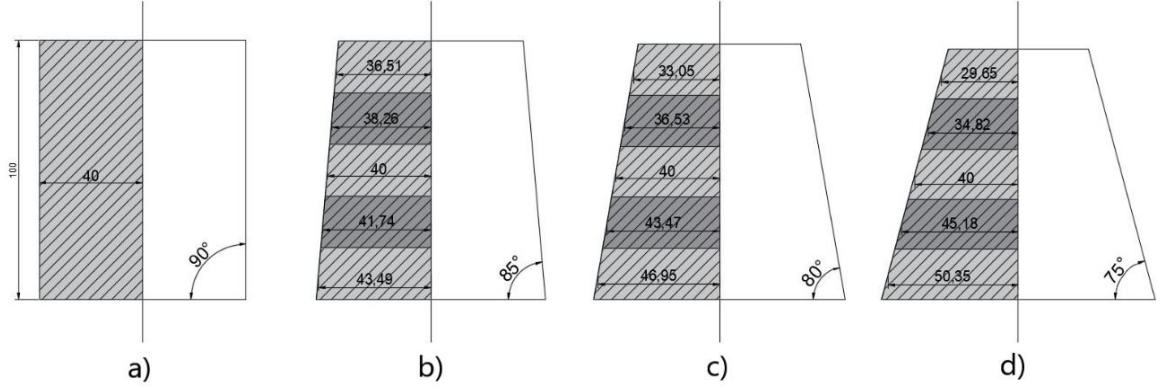
Çizelge 3.1. Tasarım hesaplamaları ve sonuçlar

| Parametreler                                   | 1.Durum               | 2.Durum               |
|------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Güç, P (Watt)                                  | 100                   | 100                   |
| Kanat Profili                                  | NACA0018              | NACA0018              |
| Rüzgâr Hızı, V (m/s)                           | 8                     | 8                     |
| Hava Yoğunluğu, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )    | 1,18                  | 1,18                  |
| Kinematik Viskozite, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s) | 1,46x10 <sup>-5</sup> | 1,46x10 <sup>-5</sup> |
| Kanat Sayısı, N                                | 3                     | 3                     |
| Katılık Oranı, $\sigma$                        | 0,3                   | 0,2                   |
| Uç Hız Oranı, $\lambda$                        | 3                     | 4,21                  |
| Güç Katsayısı, Cp                              | 0,510                 | 0,413                 |
| Seçilen Reynold Sayısı                         | 5x10 <sup>6</sup>     | 1,6x10 <sup>5</sup>   |
| Rotor Yarıçapı, R (m)                          | 0,325                 | 0,4                   |
| Veter Uzunluğu, c (m)                          | 0,033                 | 0,028                 |
| Devir Sayısı (dev/dk)                          | 705                   | 804                   |
| Reynold Sayısı, Re                             | 0,53x10 <sup>5</sup>  | 0,61x10 <sup>5</sup>  |

Prof. Stütz ve arkadaşlarının çalışmasında H tipi darrieus rüzgar türbininin hesaplama formülleri ayrıntılı olarak verilmiştir (Stütz, 2008). Ortaya konan bu hesaplamalar ile birlikte kanat eleman metodu kullanılacak, eğimli kanatçıklardan elde edilebilecek kuvvetlerin hesabı yapılacaktır.

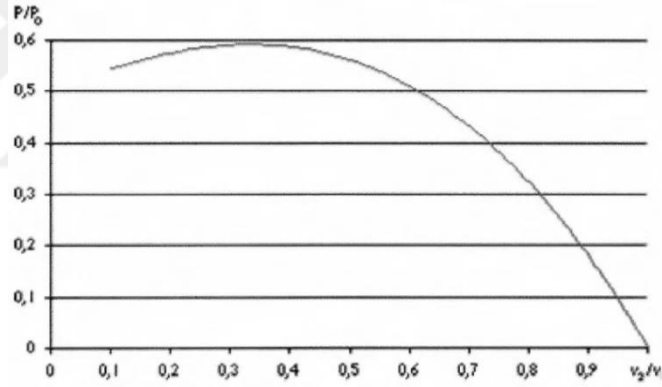
### 3.5.2. Kanada gelen kuvvetlerin hesaplanması

Kanat eleman metodu ile beş eşit parçaya bölünecek olan kanatçıklar 4 farklı düşey kanat açısında hesaplanacaktır. Bu aşamada Şekil 3.19-b'daki 85°'lik düşey kanat açısı olan türbin için bir kanatçığın en üstteki parçası için kuvvet hesaplamaları yapılacak, diğer kuvvet ve hesap bilgileri Microsoft Excel programı ile hesaplanacak, sonuçlar özet olarak tabloda verilecektir.



Şekil 3.19. Ölçümleri yapılacak profil tasarımları ve düşey kanat açısı değerleri

Genel olarak Darrieus Tipi Rüzgar Türbini için, tasarım sürecindeki bazı kayıplar nedeniyle güç katsayısı tahmini aralığı ( $P/P_0$ ) % 30 ile % 40 arasındadır. Şekil 3.20 'ye göre  $V_w/V_\infty$  oranının aralığı 0,73 ile 0,81 arasındadır. Hesaplama için bu değerlerin aritmetik ortalaması olan 0,77 kabul edilir.



Şekil 3.20.  $V_a$ 'nın Betz kriterleri ışığında ortalama değeri (Stütz, 2008)

Aşağıdaki hesaplamada,  $V_w$  akış izi hızını alıyoruz:

$$V_1 = V_\infty$$

$$V_w = 0,77 * V_\infty = 0,77 * 8 \text{ (m/s)}$$

$$V_w = 6,16 \text{ (m/s)} \quad V_1 \text{ 'i } 8 \text{ (m/s) rüzgar test düzeneğindeki en yüksek hızına göre alınır.}$$

Sonra eksenel akış hızı  $V_a$  formül ((3.10) ile bulunur.

$$V_a = \frac{V_\infty + V_w}{2} = \frac{8 + 6,16}{2} = 7,08 \text{ (m/s)}$$

$$V_a = 7,08 \text{ (m/s)}$$

Hesaplamaları daha rahat yapabilmek için indüklenen hız  $V_a$ 'nın her zaman sabit olduğunu kabul edilir.

Hesaplanan rüzgar hızlarındaki hücum açısını bulabilmek için öncelikle formül ((3.3) ve formül ((3.4) ile rüzgarın normal hızı ve teğetsel hızı değerleri hesaplanması gerekir.

Düşey kanat açıklıkları farklı ve beşe bölünen kanatçıkların yarıçap değeri değiştiği için bir kanatçığın beş bölümü için ayrı ayrı uç hız oranını hesaplamak gerekmektedir. Oransal uç hız oranı formül ((3.28) 'de verilmiştir.

$$\lambda_{\text{Oransal Uç hız Oranı}} = 4,2 \times \frac{0,3651}{0,4} = 3,83$$

$$V_t = \lambda_{\text{Oransal Uç hız Oranı}} \times V_w + V_a \times \cos \theta$$

$$V_t = 3,83 \times 8 + 7,08 \times \cos 30$$

$$V_t = 36,80 \text{ m/s elde edilir.}$$

$$V_n = 7,08 \times \sin 30$$

$$V_n = 3,54 \text{ m/s elde edilir.}$$

Hesaplama üç kanattan sadece birisinin ilk bölümü için yapılmaktadır. Bu hesaplama kuvvet değerleri hesaplanan kanadın Azimut açısı değerinin  $30^\circ$  olduğu an içindir.

Hücum açısının hesaplanması için gerekli olan normal ve teğetsel hız değerleri formül ((3.7)'de yerine yazılarak hücum açısı bulunur.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{V_n}{V_t} \right)$$

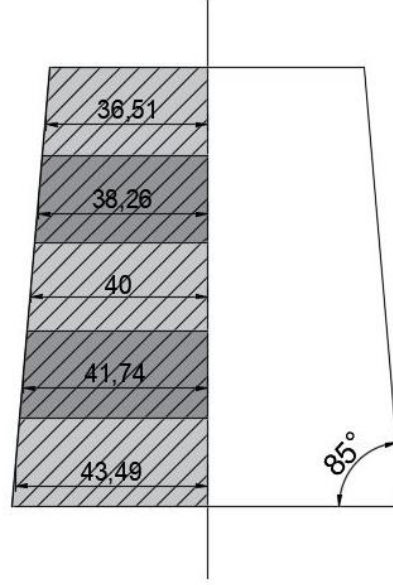
$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{3,54}{36,87} \right)$$

$$\alpha = 5,48^\circ$$

Teğetsel ve normal rüzgar hızlarına karşı kanat üzerine etki eden sürüklenme,  $F_t$  ve kaldırma kuvveti,  $F_n$  hesaplanır. Bu kuvvetlerin hesaplanması için önce  $W$  bağıl hız hesaplanması gerekir. Bağıl hız formül ((3.6) ile hesaplanır. Bağıl hız  $W$ , Teğetsel hız  $V_t$  ve normal hız  $V_n$  'nin bileşkesine eşittir:

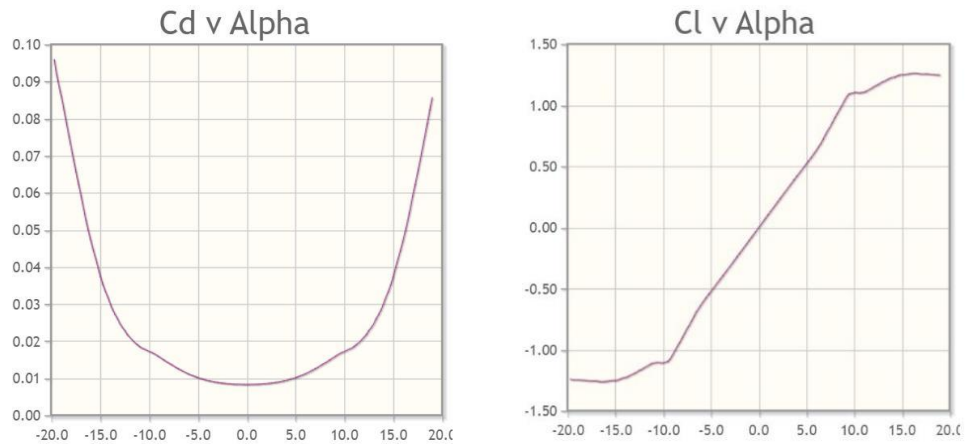
$$W = \sqrt{36,87^2 + 3,54^2} = 37,04$$

Böylece bağıl hız elde edilmiş olur.



**Şekil 3.21.** Düşey kanat açısı  $85^\circ$  olan kanat tasarımı ve her parçacığın yarıçap değerleri

Kanada etkiyen teğetsel ve normal kuvvetlerin hesaplanması için öncesinde bilinmesi gereken iki değer vardır. Bunlar  $c_t$  ve  $c_n$  katsayı değerleridir. Bu değerler ışığında sürüklenme ve kaldırma kuvveti katsayılarına hesaplanabilir. Bununla birlikte  $c_t$  ve  $c_n$  katsayı değerleri formül (3.18) ve (3.19)'da da görüleceği gibi  $c_l$  ve  $c_d$  sürüklenme ve kaldırma katsayılarına bağlıdır.  $C_l$  ve  $c_d$  katsayı değerleri daha önceden laboratuvar ortamında aerodinamik ölçümler ile elde edilmiş ve kanatçık modeline özgü değerlerdir. Hücüm açısı  $\alpha$  ışığında değerler Şekil 3.22'den okunmalıdır. Her bir hücüm açısına göre bu değerler değişmektedir. Bu bağlamda hücüm açısı  $5,48$  için  $c_l$  ve  $c_d$  değerleri okunur.



**Şekil 3.22.** Hücüm açısı  $\alpha$  değerine göre  $c_l$  sürüklenme ve  $c_d$  kaldırma katsayısı değerleri

Net teğetsel ve normal kuvvetler bulunmalıdır. Ancak bu değerlerin bulunabilmesi için ilk başta teğetsel kuvvet katsayısı  $C_t$  ve normal kuvvet katsayısı  $C_n$  bulunmalıdır. Bu katsayı değerleri formül (3.18) ve formül (3.19) 'da verilmiştir.

$$C_t = 0,549x \cos(5,48) - 0,012x \sin(5,48) = 0,041$$

$$C_n = 0,012x \cos(5,48) + 0,549x \sin(5,48) = 0,558$$

Elde edilmiş olan değerler formülde yerine yazıldığında net teğetsel ve normal kuvvetler bulunur. Bu kuvvetlerin hesabında formül ((3.16) ve ((3.17) kullanılır.

$$F_t = 0,041x \frac{1}{2} x 1,18x0,0266x0,2x37,04^2 = 0,175 \text{ N}$$

$$F_n = 0,558x \frac{1}{2} x 1,18.0,0266x0,2x37,04^2 = 2,411 \text{ N}$$

Elde edilen teğetsel ve normal kuvvet değerleri sadece bir kanatçığın bir parçası içindir. Bu hesaplamalar her bir kanatçık ve parçaları için yapılacak ve elde edilmiş olan teğetsel ve normal kuvvetler toplanacaktır. Dönme hareketini sağlayan kuvvet teğetsel kuvvet olduğundan toplam teğetsel kuvvet bizim döndürme gücümüzü verir. Toplam teğetsel kuvvet ise formül ((3.20) ile hesaplanır. Böylece ilk kanatçığın bir parçasının hesabı yapılmış olur.

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta = 0,1750 \text{ NM}$$

Bizim üç kanatçığımız mevcuttur ve kanatçıklar arasında  $120^\circ$  açı farkı vardır. Azimut açısı da bu bağlamda her kanatçığın hesaplamasında değişmektedir.

Bu noktadan sonra bütün değerler tabloda özet olarak verilecek ve teorik olarak elde edilmesi gereken tork, güç ve güç katsayısı değerleri hesaplanmış olacaktır.

Çizelge 3.2. Düşey kanat açısı 85° olan kanatçık için açı ve kuvvet değerleri tablosu

|         | Bölüm | $\lambda$ ,<br>Oransal<br>Uç Hız<br>Oranı | $A$ ,<br>Alan | $R_a$<br>Parçanın<br>yarıçapı | $\theta$<br>Azimut<br>Açısı | $\alpha$<br>Hücum<br>Açısı | $V_t$<br>Teğetsel<br>Hız<br>Bileşeni | $V_n$<br>Normal<br>Hız<br>Bileşeni | $W$ ,<br>Bağıl<br>Hız | $C_t$ | $C_n$ | $F_t$<br>Teğetsel<br>Kuvvet | $F_n$<br>Normal<br>Kuvvet | $F_t$<br>Teğetsel<br>Kuvvet |
|---------|-------|-------------------------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1.KANAT | 1     | 3,8                                       | 0,1455        | 0,37                          | 30                          | 5,48                       | 36,87                                | 3,54                               | 37,04                 | 0,04  | 0,56  | 0,17                        | 2,41                      | 0,87                        |
|         | 2     | 4,0                                       | 0,1525        | 0,38                          | 30                          | 5,27                       | 38,35                                | 3,54                               | 38,51                 | 0,04  | 0,54  | 0,18                        | 2,50                      |                             |
|         | 3     | 4,2                                       | 0,1594        | 0,40                          | 30                          | 5,08                       | 39,81                                | 3,54                               | 39,97                 | 0,04  | 0,52  | 0,18                        | 2,60                      |                             |
|         | 4     | 4,4                                       | 0,1663        | 0,42                          | 30                          | 4,90                       | 41,28                                | 3,54                               | 41,43                 | 0,03  | 0,50  | 0,17                        | 2,69                      |                             |
|         | 5     | 4,6                                       | 0,1733        | 0,43                          | 30                          | 4,73                       | 42,75                                | 3,54                               | 42,90                 | 0,03  | 0,48  | 0,17                        | 2,77                      |                             |
| 2.KANAT | 1     | 3,8                                       | 0,1455        | 0,37                          | 150                         | 8,19                       | 24,61                                | 3,54                               | 24,86                 | 0,12  | 1,01  | 0,24                        | 1,96                      | 0,95                        |
|         | 2     | 4,0                                       | 0,1525        | 0,38                          | 150                         | 7,73                       | 26,08                                | 3,54                               | 26,32                 | 0,10  | 0,91  | 0,23                        | 1,98                      |                             |
|         | 3     | 4,2                                       | 0,1594        | 0,40                          | 150                         | 7,32                       | 27,55                                | 3,54                               | 27,78                 | 0,07  | 0,72  | 0,18                        | 1,75                      |                             |
|         | 4     | 4,4                                       | 0,1663        | 0,42                          | 150                         | 6,96                       | 29,01                                | 3,54                               | 29,23                 | 0,05  | 0,50  | 0,13                        | 1,33                      |                             |
|         | 5     | 4,6                                       | 0,1733        | 0,43                          | 150                         | 6,62                       | 30,49                                | 3,54                               | 30,69                 | 0,06  | 0,61  | 0,17                        | 1,80                      |                             |
| 3.KANAT | 1     | 3,8                                       | 0,1455        | 0,37                          | 270                         | -12,97                     | 30,74                                | -7,08                              | 31,55                 | 0,28  | -1,33 | 0,87                        | 0,00                      | 4,35                        |
|         | 2     | 4,0                                       | 0,1525        | 0,38                          | 270                         | -12,40                     | 32,21                                | -7,08                              | 32,98                 | 0,24  | -1,24 | 0,82                        | 0,00                      |                             |
|         | 3     | 4,2                                       | 0,1594        | 0,40                          | 270                         | -11,87                     | 33,68                                | -7,08                              | 34,42                 | 0,24  | -1,20 | 0,89                        | 0,00                      |                             |
|         | 4     | 4,4                                       | 0,1663        | 0,42                          | 270                         | -11,39                     | 35,15                                | -7,08                              | 35,85                 | 0,23  | -1,16 | 0,94                        | 0,00                      |                             |
|         | 5     | 4,6                                       | 0,1733        | 0,43                          | 270                         | -10,94                     | 36,62                                | -7,08                              | 37,30                 | 0,19  | -1,06 | 0,84                        | 0,00                      |                             |

Elde edilen değerler ışığında teğetsel kuvvet ile birlikte tork kuvveti ve güç değerleri hesaplanır. Üç kanatçığın her bir bölümü 90°, 85°, 80° ve 75° için hesaplanmış ve elde edilen değerler çizelge 3.3’de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 3.3. Farklı düşey kanat açılarına göre hesaplanan kuvvet değerleri

| Parametreler                 | 90°    | 85°    | 80°    | 75°    |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Sürükleme Kuvveti, $F_d$ (N) | 0,89   | 0,87   | 0,80   | 0,80   |
| Kaldırma Kuvvet, $F_l$ (N)   | -1,12  | -1,23  | 0,48   | -0,13  |
| Teğetsel Kuvvet, $F_t$ (N)   | 6,18   | 6,15   | 5,88   | 5,85   |
| Normal Kuvvet, $F_n$ (N)     | 12,73  | 12,69  | 13,00  | 13,04  |
| Tork, N.m                    | 7,41   | 7,38   | 7,05   | 7,02   |
| Güç, Watt                    | 131,21 | 130,65 | 124,83 | 124,32 |
| Güç Katsayısı, $C_p$         | 0,545  | 0,543  | 0,525  | 0,524  |

### 3.6. Rüzgar Türbininin İmalatı

#### 3.6.1. Rüzgar türbinlerinde kanat yapısı ve malzemeler

Rüzgar Türbininde kanatların rüzgar türbininin verimine etkisinin ne kadar fazla olduğuna değinilmişti. Türbin verimine etkisinden dolayı kanatçığın aerodinamik yapısından imalatında kullanılan malzemelerine kadar birçok noktada yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Zaman içerisinde yapılan çalışmalar ve deneyler ile birlikte kaydedilen birçok gelişme sonucunda kanat imalatında kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Hafif, dayanıklı ve maliyetinin de az olduğu kompozit malzemeler ile üretilen kanatçıklardan uzun süre dayanıklılığını koruması, aerodinamik olarak türbinin verimine katkıda bulunabilmesi, korozyona karşı dayanıklılığı, kanat yüzey kalitesini ve pürüzlülüğünü koruyabilmesi gibi özelliklere sahip olması hedeflenmektedir.

Kompozit malzeme imalatında birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip birden çok malzeme bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Böylece birleştirilen malzemelerden daha iyi özelliklere sahip olan yeni bir malzeme elde edilebilmektedir. Bu işlem ile elde edilen malzemeye kompozit malzeme denir.

##### 3.6.1.1. Kanat üretiminde kullanılan temel malzemeler

###### a-Polyester reçine

Bir kompozit yapı olarak kanatçıkların üretiminde, kompozit teknolojilerinden biri olan "Polimer Yapılı Termoset Reçine" kullanılır. Bunların içinde de polyester reçineler özellikle hacimsel çekme dayanımlarının ve boyutsal stabilite değerlerinin ve diğer termoset reçinelere oranla daha iyi özelliklere sahip olması nedeniyle kullanılması tercih edilmiştir. Polyester reçineler; üstün mekanik özellikleri, korozyona uğrayabilecek sıvı ve gazlara dayanımı, üstün elektriksel özellikleri, yüksek sıcaklıklara dayanımı veya bu değerlerin bir kombinasyonu olarak yüksek performanslı kompozit malzemelerin üretiminde tercih edilmektedir.

Polyester reçineler, herhangi bir kompozit elemanı oluşturmak için takviye malzemeleri ile birleşmeden önce, üreticiler tarafından belirtilen oranlarda ve uygun yapıdaki sertleştirici malzeme ile karıştırılmalıdır. Biz de kullandığımız polyester reçinenin birleşme oranlarına dikkat ederek üretimimiz yatık. İleride ayrıntılar verilecektir.

###### b- Cam elyaf

Fiberglas olarak da bilinen Cam elyafı, eritilmiş haldeki camın çok ince kalıplardan geçirilmesiyle elde edilen ve cam tellerden meydana gelen bir maddedir. Aynı zamanda

fiber cam olarak da nitelendirilir. Hafif ve mukavemeti yüksek olmasından dolayı daha çok havacılıkta kullanılır. Kullanım alanlarının ileride artacağı tahmin edilmektedir. Dokuma, levha, keçe cam elyaf gibi birçok çeşidi mevcuttur. Biz çalışmamızda 450 gr/m<sup>2</sup> olan ve nispeten ince keçe cam elyaf kullanmayı tercih ettik.

### c- EPS köpük

Zor hava şartları altında çalışan rüzgar türbinlerinde kullanılacak malzemelerin birbiri içerisindeki uyumu önemlidir. Çürüme, kokma, küflenme ve paslanma gibi problemleri olmayan EPS kanat profilimizin oluşturulmasında mekanik özelliklerinin iyi olması dolayısıyla tercih edilmiştir.

Aslında EPS polistren ham maddesinin genişletilmesiyle elde edilen bir ısı yalıtım malzemesidir. EPS'nin yaklaşık % 98'i havadır. Hava yüzdesinin yüksek olmasından dolayı hafif bir malzemedir. Yoğunlukları 10-30 kg/m<sup>3</sup> arasında değişir. Bizim kullandığımız köpük ise 15 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip modelidir.

### 3.6.2. Kanatçıkların hazırlanışı

Bu projede üretilecek delta tip darrieus rüzgar türbini kanatlarının, yüksek rüzgar hızlarına dayanabilecek kadar mukavemetli ve nispeten daha hafif olabilmesi için cam elyaf malzemeler ile güçlendirilmiş polyester kompozit malzeme kullanılmıştır. Kanadı imal edebilmek için öncelikle sert EPS köpük malzeme kullanılmış ve kanat profili CNC Router tezgahında Solidworks'de çizilmiş haliyle uzun kanatçıklar şeklinde elde edilmiştir. Şekil 6.9'da kanadın kesim aşaması gösterilmektedir.



Şekil 3.23. EPS Sert köpük malzemenin CNC Router tezgahında kesimi

Kesim ile elde edilen parçalar kanatçıkların bir nevi kanatçıkların kalıbı olarak kullanılacaktır. İleride ayrıntılı anlatılacak olan el ile yatırma yöntemiyle kalıbı elde edilmiş olan kanatçık profillerinin imalat aşamaları takip edilecektir.

### 3.6.2.1. Cam elyaf takviyeli reçinenin hazırlanışı

Polyester Reçinenin hazırlanması için, ilk önce 1000 gr polyester reçine içerisine, 60 gr kobalt konur ve iyice karıştırılır. Böylece polyester reçine ve kobalt karışımı sertleşmeye hazırlanmış olur. Bu şekilde, yani sadece kobalt ile karıştırılmış Polyester reçine günlerce sertleşmeden depolanabilir. Bu karışımı sertleştirmek için ise Mekperoksit kullanılmaktadır. Karışımın yaklaşık %2'si kadar miktarda Mekperoksit iyi şekilde karışıma eklenip karıştırıldığında yaklaşık 20 dk içerisinde bütün karışımın sertleşmesi beklenmektedir. Bu donma süresi esas alınarak cam elyafın kanat yüzeyine uygulanması sağlanır. Sertleştirici oranı artırıldığında donma hızı da bu miktarda artmaktadır.



**Şekil 3.24.** Polyester Reçineyi hazırlarken kullanılan malzeme ve ekipmanlar

Bu karışımı yaparken polyester reçine ile kobaltı karıştırmadan önce sertleştirici mekperoksit ile kobaltın karıştırılmaması gerekmektedir. Eğer karıştırılırsa iki madde arasında ortaya çıkan reaksiyon sonucu sağlığa zararlı gazlar oluşabilmektedir. Bu noktaya dikkat etmekte büyük fayda vardır.

Polyester Reçine kobalt ve mekperoksit ile karıştıktan sonra karışımın sıcaklığı hayli artmaktadır. EPS köpük her ne kadar sert ve dayanıklı bir köpük olsa da reaksiyon sonucu ortaya çıkan yüksek sıcaklıkta eriyebilmektedir. Bu probleminden dolayı köpük kanadın direk kimyasal karışım ile temas etmemesi için kanatçıgın dış yüzeyi Şekil 3.25'de görüldüğü gibi kâğıt bant ile kaplanmıştır.



**Şekil 3.25.** Kanatçıkları kağıt bant ile kaplanması

Bu noktadan sonra asıl dayanımı sağlayacak olan cam elyaf malzemenin yüzeye tutunabilmesi için polyester reçine kanat yüzeyine fırça ile sürülür. Daha sonra cam elyaf malzeme kanat yüzeylerine ve 1 metrelik kanat uzunluğuna göre kesilir.



**Şekil 3.26.** Kanat yüzey boyutlarına göre cam elyaf malzemenin kesilmesi

Üç boyutta malzeme kesilir. Kanadın sağ, sol yüzü ve kanadın eğimli olan kısmına göre kesilen malzemeler sırayla elle yapıştırma yöntemiyle yapıştırılır. Katmanlar reçine sürülmüş yüzeye bırakıldıktan sonra fırça yardımıyla kanatçık yüzeyine yapışması sağlanmıştır. Bu işlem bütün kanadın yüzeyi kaplanana kadar devam etmektedir. Sürülmüş polyester reçinenin bir süre kurumması bekledikten sonra diğer kısımlar için aynı işlemler devam etmiştir. Her bir yüzeyin üç katman cam elyaf malzeme ile kaplanmış olmasına özen gösterilmiştir. Böylece kanatçıklarda yüksek bir dayanım elde edilmiştir. Kanatçıklardan birisinin son hali Şekil 3.27’de görülmektedir.



Şekil 3.27. Cam elyaf takviyeli polyester reçine kaplı kanatçıklardan birisi

Yüzey pürüzlülüğünün sağlanması için de kanatçıkların yüzeyi zımparalanmış, ihtiyaç duyulan noktalara macun çekilmiş ve akabinde plastik boya ile kanat yüzeyleri boyanmıştır. Böylece kanatçık imalatı tamamlanmıştır.



Şekil 3.28. Rüzgar türbinin bazı imalat aşamaları

### 3.6.3. Kanat imalatı ve konstrüksiyonu

Rüzgar türbininin kanat boyutları ve rüzgar tünelinin halihazırdaki boyutları dikkate alınarak tasarımı yapılan ana konstrüksiyonda çelik profiller, farklı ebatlarda sac malzemeleri, metal malzemeleri birleştirmek için elektrot kaynağı, kanat yüzeyi için zımpara, boya, macun ve montaj için cıvata somun gibi bağlantı ekipmanları kullanılmıştır.

Solidworks'de çizimi yapılan rüzgar türbininin sac kısımlarının kesme işlemleri CNC lazer'de yaptırılmış, kanadın kanat koluna bağlantısını sağlayan ekipmanlar torna

tezgahında işlenmiş, matkap tezgahında delikleri açılmış, kaynak işlemleri yapılmış, bu işlemler sırasında üniversitemizin atölyesi aktif olarak kullanılmıştır. Şekil 3.29’da iki kanatlı, üç kanatlı ve dört kanatlı türbin modelleri görünmektedir.



Şekil 3.29. İkili, üçlü ve dördü rüzgar türbinleri

Konstrüksiyon montaj aşamasından bazı görseller Şekil 3.30’da gösterilmektedir.

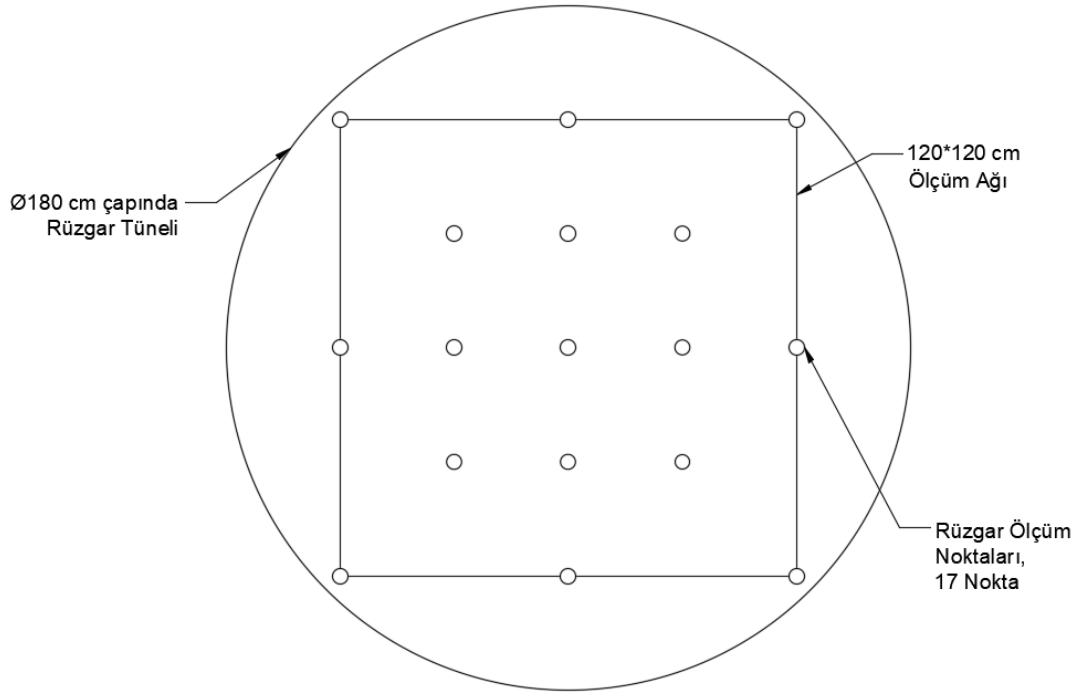


Şekil 3.30. Türbin montaj aşamaları

### 3.7. Rüzgar Hızı Ölçümleri

Rüzgar türbininin ön ve arka taraflarında rüzgar akış yapısı bozulur. Bundan dolayı rüzgar ölçüm noktalarında vorteks’in (girdap) oluşmadığından emin olunmalıdır ki ölçümler bozulmamış rüzgar hızlarında (uniform) yapılmış olsun. Ölçüm yapılan noktalarda vorteks’in oluşup oluşmadığı yapılacak ölçümlerden elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olup olmadığıyla anlaşılabilir. Eğer ölçülen değerler birbirine çok yakın ise vorteks alanının dışında ölçüm yapıldığı düşünülür ki hedeflenen ölçüm alanı da bu vorteks in oluşmadığı bölgelerdir.

Ölçümler eksenel fan aracılığıyla rüzgârın üretildiği bir rüzgar tüneline yapılmaktadır. Hava hızını ölçmek için fan çıkışının 2 metre önüne 120x120 cm boyutunda bir ölçüm ağı oluşturulmuştur. Bu ölçüm ağının 50 cm önüne rüzgâr türbinini rüzgâr tüneline önüne monte etmek için montaj sehpası yapılmıştır. Şekil 3.31’de görüldüğü gibi ölçüm ağının 17 farklı noktasından hız ölçümleri yapılmış ve elde edilen değerler ışığında aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Çıkan değerler ortalama rüzgar hızı değerleri olarak ileriki bölümlerde sunulacaktır (Gül, 2018).



**Şekil 3.31.** Rüzgar hızı ölçüm ağı ve hız ölçümünün yapıldığı noktalar

## 4- ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Sonuçlar

Dünya üzerinde her geçen yıl artan enerji tüketimi, fosil kaynakların azalmasına yol açarken dolaylı olarak enerji maliyetlerini de artırmaktadır. Son dönemde fosil yakıtların tüketiminden kaynaklı olarak ekolojinin büyük oranda etkilendiği, küresel ısınmadan çevre kirliliğine kadar birçok yönden doğaya zarar verdiği görülmektedir. Doğanın korunabilmesi ve daha huzurlu bir toplum oluşturabilmek için en iyi çıkış kapısı yenilenebilir enerji teknolojilerine yatırım yapmaktır.

Son dönemde Dünya’da ve Türkiye’de yapılan yatırımlar rüzgar enerjisine verilen önemi göstermektedir. Türkiye yaklaşık 9.3 GW kurulu rüzgar enerjisi gücüyle dünyada 7. sıradadır. Yapılan yatırımların çoğu yatay eksenli rüzgar türbinlerinden olan pervane tip rüzgar türbinleridir. Şehirlerde nüfusun her geçen gün arttığı toplumumuzda bu trend içerisinde dikey eksenli rüzgar türbinlerinin de sektörel fırsatlar barındırdığı, yakın zamanda hatırı sayılır bir pay alacağı düşünülmektedir.

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin şehir içerisinde kullanımını avantajlı kılacak bir çok özelliği mevcuttur. Şehir içlerinde ortaya çıkan düzensiz ve öngörülemeyen yönlerden esen türbülanslı rüzgarlar mevcuttur. Bu tür değişkenliklere karşı duyarlı ve daha iyi enerji üretebilecek olan dikey eksenli rüzgar türbinlerinin şehir içlerinde kullanımının artması için bu alandaki tasarımlar üzerine araştırmalar da yoğunlaşmıştır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin başında ise darrieus rüzgar türbini gelmektedir. Bizim çalışmamızda da bu tasarımın iyileştirilmesi üzerine denemelerde bulunulmuştur.

Tasarımı yapılan, türbin parametreleri belirli standartlara uygun şekilde seçilen, kuvvet hesaplamaları tek akışlı tüp model üzerinden yapılan ve nihayetinde aşamalarıyla kanatçık ve konstrüksiyon üretimi yapılan delta tipi darrieus rüzgar türbininin iki, üç ve dört kanatlı türbin versiyonlarının Konya Teknik Üniversitesinin rüzgar tüneline yaklaşık 4 m/s ile 8 m/s arasındaki farklı rüzgar hızlarında 90°, 85°, 80° ve 75° gibi farklı düşey kanat açılarında anemometre ile rüzgar hızı, takometre aracılığı ile devir sayısı, multimetre ile akım ve gerilim değerlerinin ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler yapılarak akım ve gerilim ile hesaplanan güç formülünde kullanılır.

$$P = I.V$$

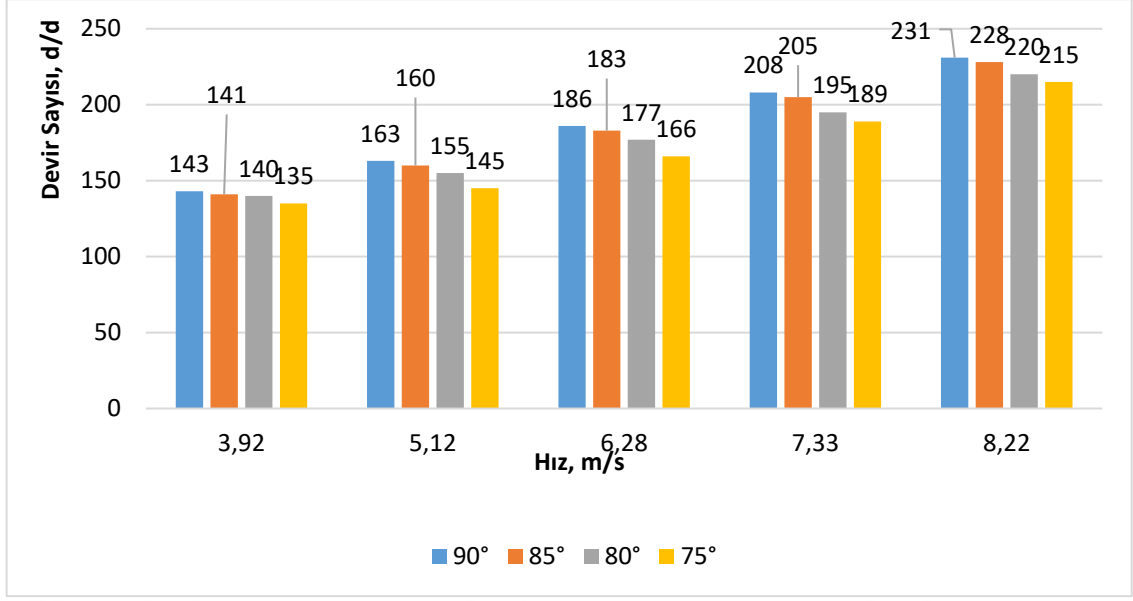


**Şekil 4.1.** Rüzgar tüneli ölçüm düzeneği

Yapılan değerlendirmelerde rüzgar tünelinin 50 cm önüne yerleştirilen türbinlerin yaklaşık 4 m/s ve 8 m/s gibi iki kademe ile çalıştırılan sisteminde, 120\*120 cm'lik hız ölçüm ağı içerisinde, anemometre aracılığı ile belirlenen rüzgar hız ölçümleri yapılmış, ihtiyaç halinde rüzgar kaynağından uzaklaştırıp yakınlaştırarak kademeli şekilde rüzgar hızları ayarlanmıştır. Takometre ile ölçülen devir sayısı, multimetre ile ölçülen akım ve gerilim değerleri ışığında sistem güç katsayısı ve güç değerleri tablolar halinde verilmiştir.

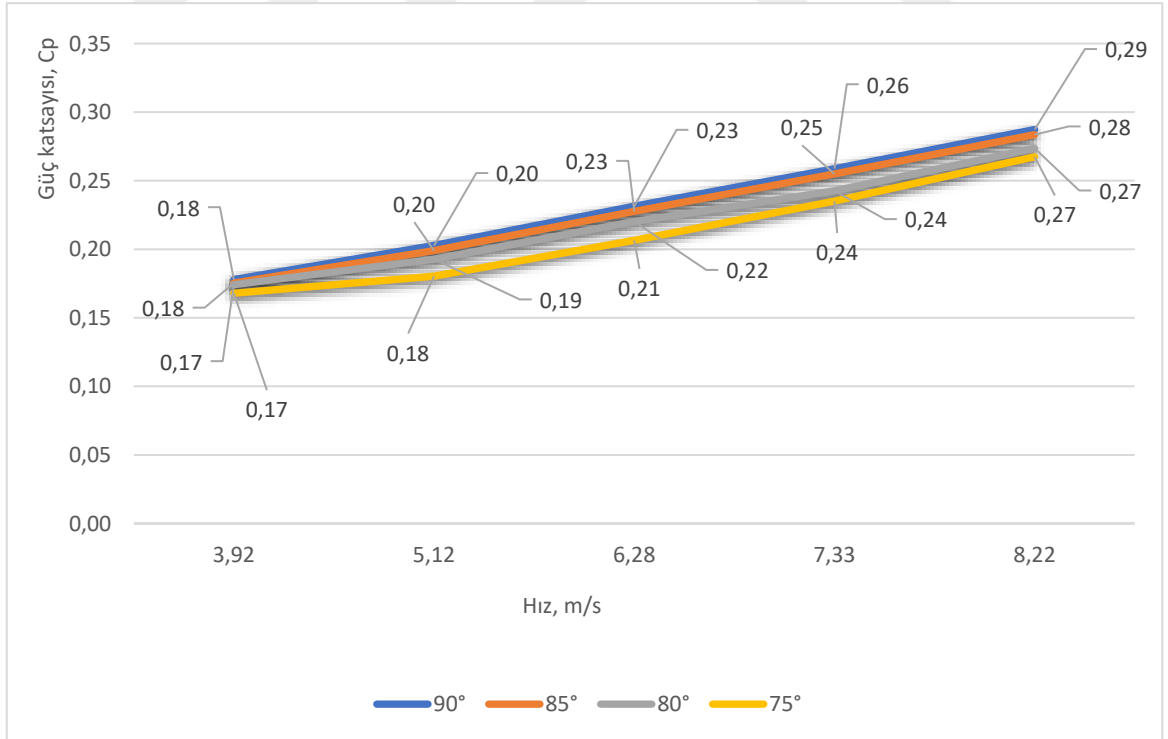
#### **4.1.1. İki kanatlı rüzgar türbini deney sonuçları**

Deneyde iki kanatlı rüzgar türbini için üç farklı düşey kanat açısında yaklaşık 4 m/s'den 8 m/s'ye kadar olan farklı hızlarda ölçümler yapılmıştır. Kanatlar eğimli olduğu için her bir kanadın uç hız oranı farklıdır. Bu deney ışığında iki kanatlı rüzgar türbini için devir sayısı, güç katsayısı ve güç değerleri grafikler aracılığıyla verilmiştir.



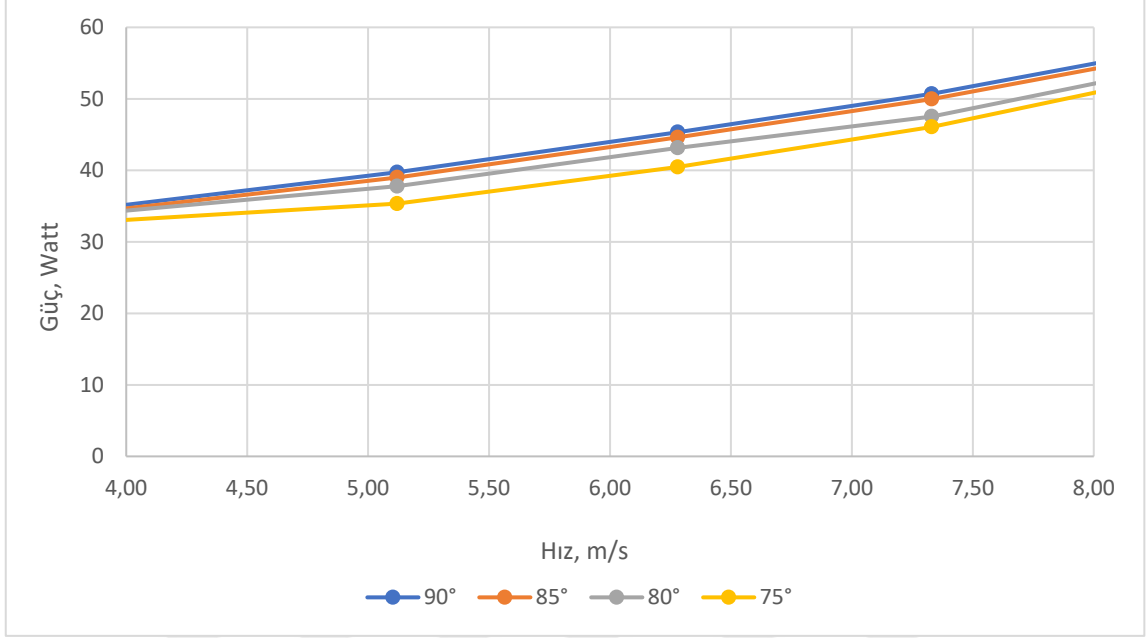
Şekil 4.1.2-a İki kanatlı rüzgar türbininin devir sayısı dağılımı

Darrieus tipi rüzgar türbinlerinin en büyük handikabı ilk harekete başlama zorluğu olduğu için iki kanatlı tasarımın düşük hızdaki performansı oldukça düşük ölçülmüştür.



Şekil 4.1.3-b İki kanatlı rüzgar türbininin güç katsayısı değerleri

Değerler karşılaştırıldığında düşük rüzgar hızlarında iki kanatlı rüzgar türbinlerinin güç katsayısı değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Yine en yüksek hız limitinde de genel kabul gören darrieus rüzgar türbini performansının gerisinde olduğu söylenebilir.

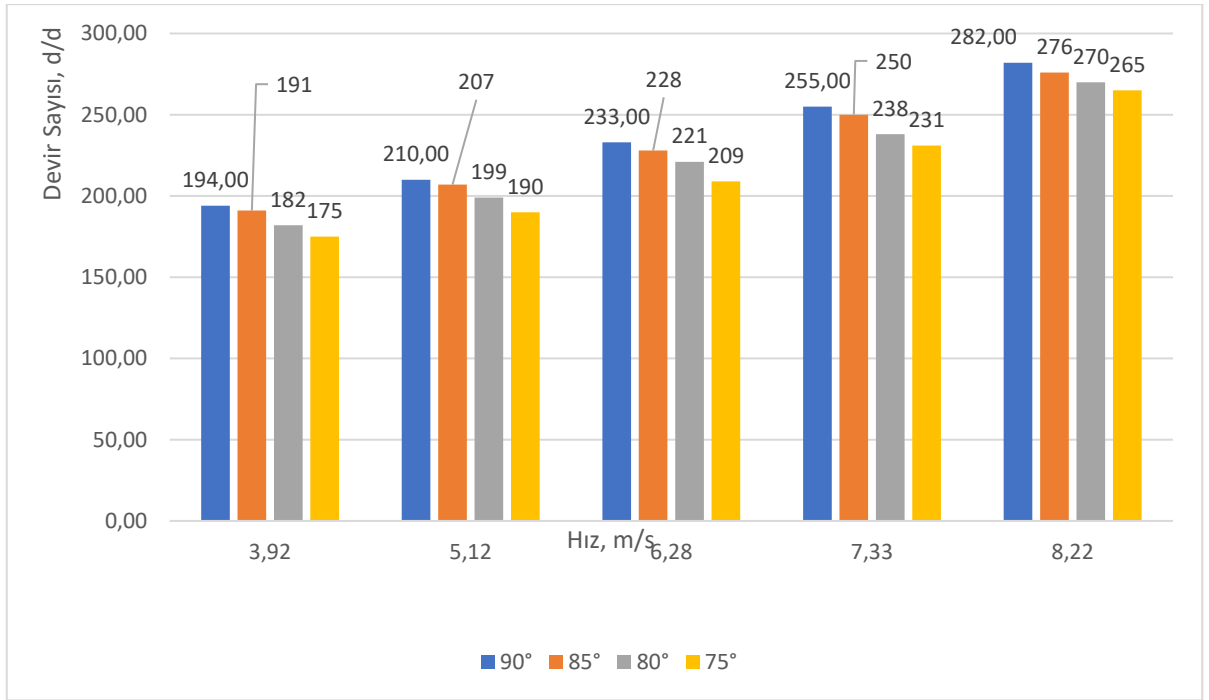


Şekil 4.1.4-c Kayıplarla birlikte farklı hızlarda elde edilen güç değerleri

Her ne kadar 100 W güç için hesaplamalar yapılmış olsa da hesaplamalara katılmayan kayıplar ışığında ortalama 8,22 m/s rüzgar hızı ile yaklaşık 56 W güç elde edilmiştir. Yine farklı düşey kanat açılarında ölçülen güç değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir.

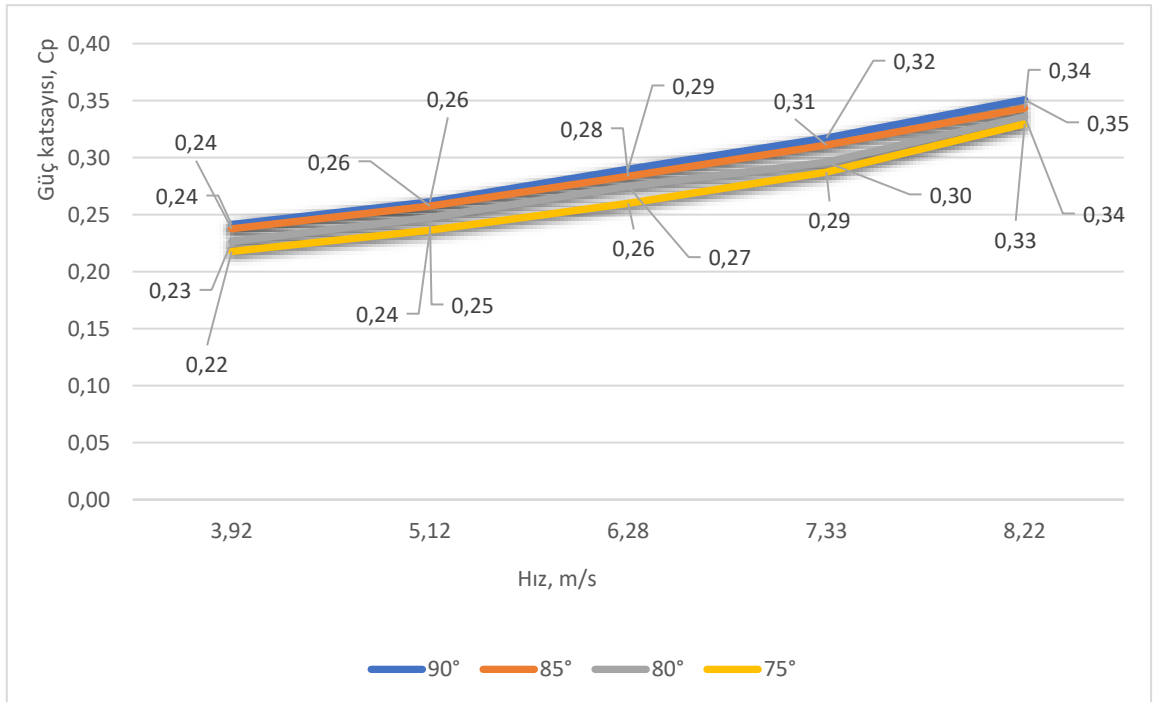
#### 4.1.2. Üçlü kanatlı rüzgar türbini deney sonuçları

Tasarımı yapılan türbinin kanatçıkların bağlantı noktaları iki kanattan dört kanada kadar kanat bağlamaya uygun şekilde tasarlanmıştır. Üç kanatlı türbinin verileri incelendiğinde iki kanatlı rüzgar türbininden daha iyi performans sergilediği anlaşılmaktadır.

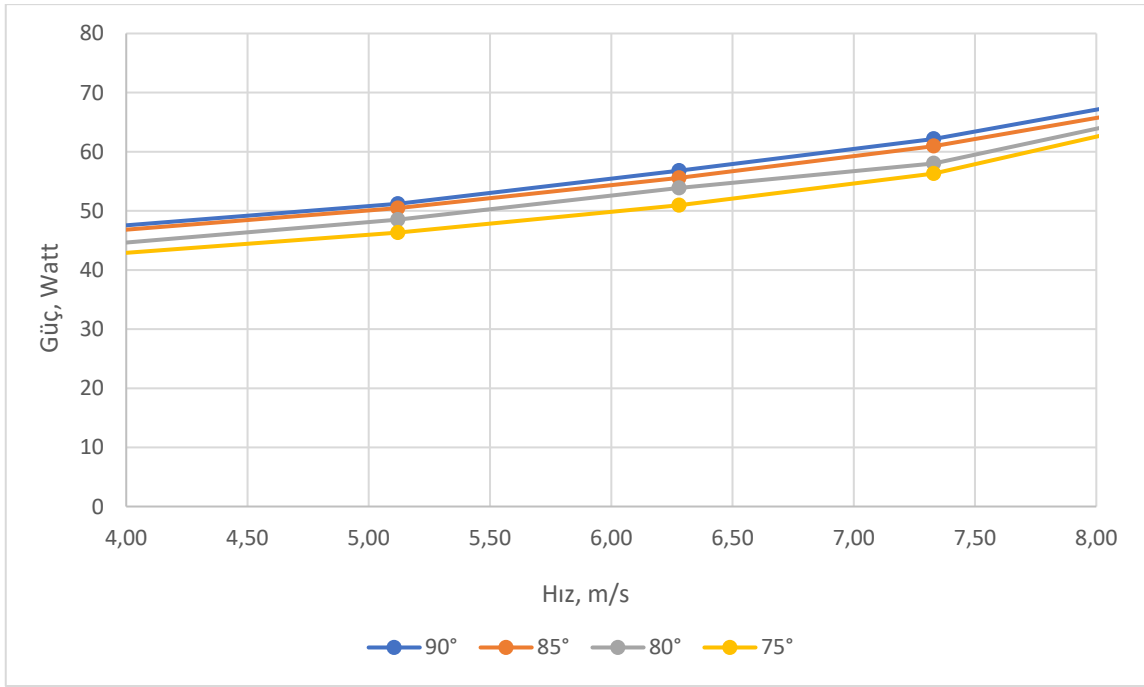


Şekil 4.1.2-a Üç kanatlı rüzgar türbininin devir sayısı dağılımı

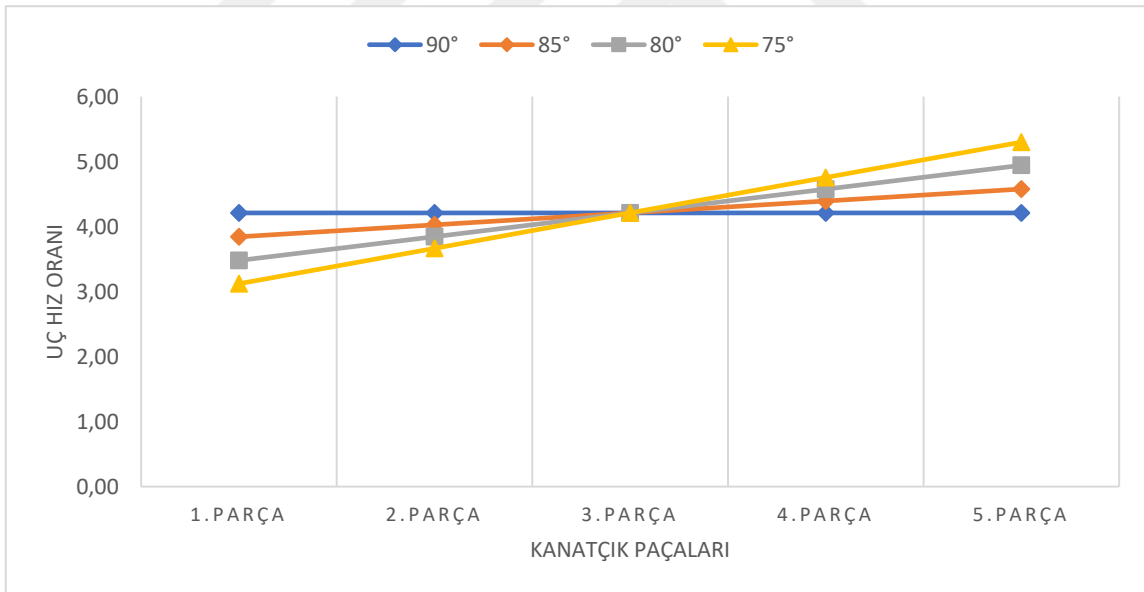
Değerler incelendiğinde düşey kanat açıları azaldığında devir sayılarının da az da olsa azaldığı görülmektedir. Düşük rüzgar hızında bu değişimin daha fazla hissedildiği elde edilen değerler ışığında düşünülebilir.



Şekil 4.1.2-b Üç kanatlı rüzgar türbininin güç katsayısı değerleri



Şekil 4.1.2-c Üç kanatlı rüzgar türbininde kayıplarla birlikte farklı hızlarda elde edilen güç değerleri

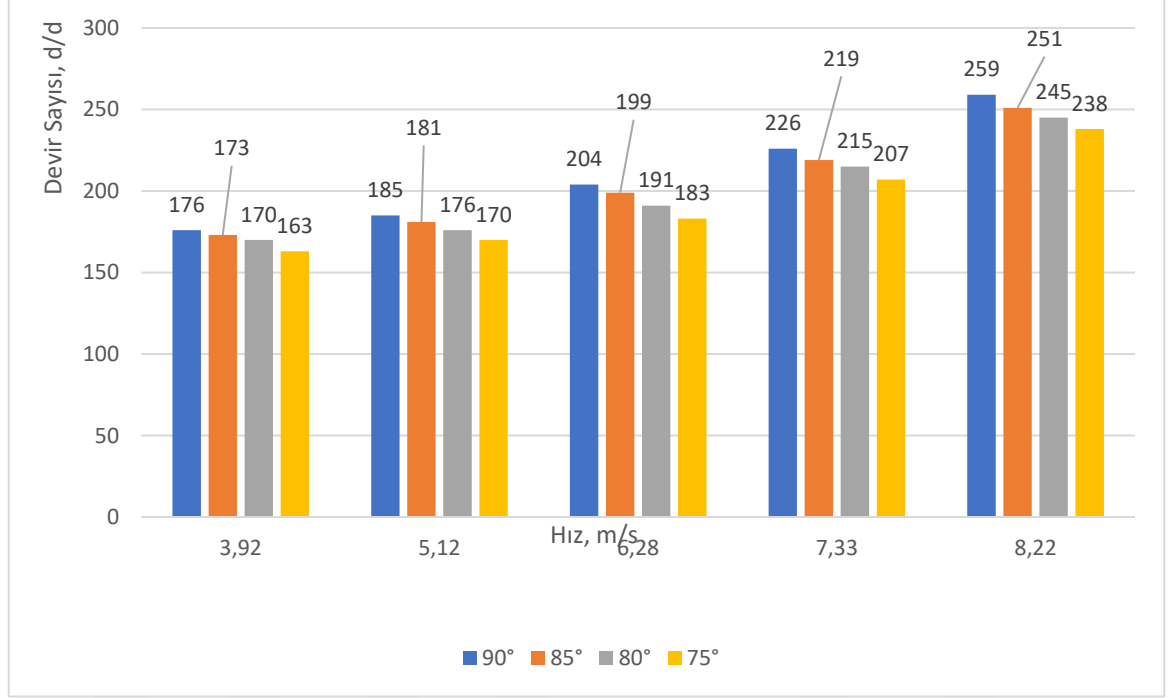


Şekil 4.1.2-d Üç kanatlı türbin için beş parçanın düşey açılara göre uç hız oranları

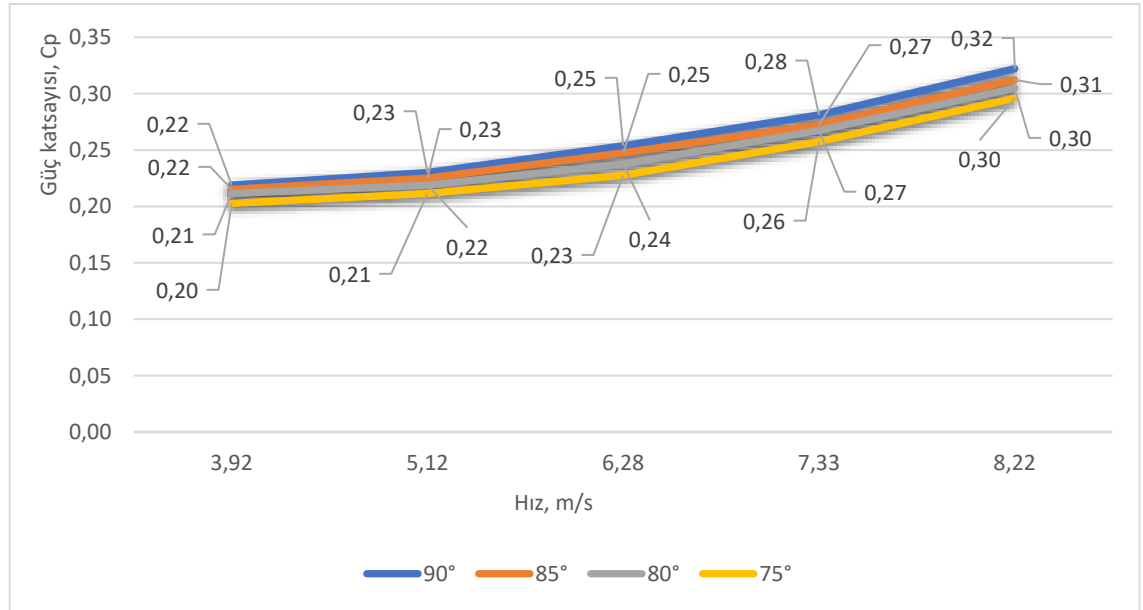
Elde edilen veriler ışığında ortalama 8,22 m/s rüzgar hızı ile yaklaşık 68 W güç elde edilmiştir. Kanatların birbirine dik olduğu 90° versiyon ve diğer farklı düşey kanat açılarında ölçülen güç değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir.

#### 4.1.3. Dört kanatlı rüzgar türbini ölçüm sonuçları

Deneylerin son aşaması olarak imalatı yapılmış olan rüzgar türbinine dört kanat bağlanarak ölçüm ağı içerisindeki ölçümler tekrar edilmiştir. Dört kanatlı rüzgar türbini için ölçülen devir sayısı, güç katsayısı ve güç değerleri aşağıda verilmiştir.

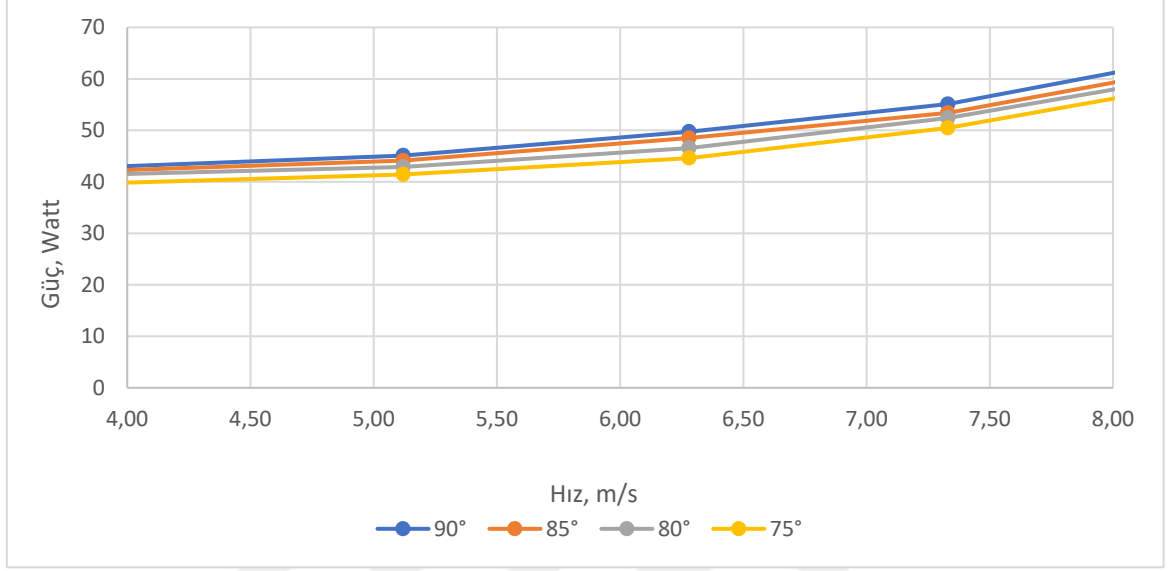


Şekil 4.1.3-a Dört kanatlı rüzgar türbininin devir sayısı dağılımı



Şekil 4.1.3-b Dört kanatlı rüzgar türbininin güç katsayısı değerleri

Dört kanatlı rüzgar türbini düşük hızlarda iki kanatlı rüzgar türbinine kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir. Ancak dört kanatlı rüzgar türbini, yüksek hızlarda iki kanatlı rüzgar türbininden daha iyi, üç kanatlı rüzgar türbininden biraz daha düşük performans gösterdiği görülebilir.



Şekil 4.1.3-c Dört kanatlı rüzgar türbini için farklı rüzgar hızlarında ve düşey kanat açılarında güç katsayısı değerleri

Elde edilen veriler ışığında ortalama 8,22 m/s rüzgar hızı ile yaklaşık 63 W güç elde edilmiştir.

#### 4.2. Belirsizlik Analizi

Deney sonucunda elde edilen verilerin okunmasında kullanılan cihazların bilimsel güvenilirliğini tespit etmek için hata analizi yapılmaktadır. Bunun için Kline ve McClintock'ın ortaya attığı yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntem ile bir hata aralığı elde edilmektedir. Bu yöntemle göre sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkeni olan bir ölçümde;

- R: Ölçülecek boyut
- $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  : Ölçümü etkileyen değişkenler
- $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  : Hata oranı

Bağımsız değişkenlerle ilgili toplam hata oranı formül 4.2'ye göre hesaplanır.

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

Deneyisel çalışmamızda kullanılan ölçü aletlerinin hata oranlarını verecek olursak; rüzgar hız ölçümü için kullanılan PROVA AVM-07 Anemometre için hata oranı  $\pm(3\%)$ , türbinin devir sayısının ölçümünde kullanılan BENETECH BGM8905 Takometre için hata oranı  $\pm(0,1\%)$ , DC motorda akım ve gerilim ölçümü yapılan M890G Multimetre için hata oranı  $\pm (2\%)$  olarak tanımlanmıştır. Formül 4.1 ile akım ve gerilimi ölçtüğümüz  $W_P$  hata oranı, formül 4.3 ile devir sayısını ve rüzgar hızını ölçtüğümüz kanat uç hız oranı için  $W_\lambda$  hata oranı hesaplanacaktır.

$$P = I . V$$

$$\frac{W_P}{67} = \left[ \left( \frac{0,02}{6,5} \right)^2 + \left( \frac{0,02}{10,3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\lambda = \frac{\omega . R}{V} \quad 4.3)$$

$$\frac{W_\lambda}{4,2} = \left[ \left( \frac{0,01}{33,6} \right)^2 + \left( \frac{0,01}{0,03} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Verilen formüller ışığında hesaplanan belirsizlik oranları sırayla  $\pm 2,43\%$  ve  $\pm 1,40\%$  olarak elde edilir.

Bu bağlamda ölçümler ışığında elde edilen en yüksek güç değerleri aşağıdaki aralıklarda olabilir. Kıyaslama en yüksek hız ortalaması olan 8,22 m/s rüzgar hızında ölçülen en yüksek değerlerde her bir açı için yapılmıştır.

| Rüzgar<br>Hızı, m/s | 90°   |       |        | 85°   |       |        | 80°   |       |        | 75°   |       |        |
|---------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
|                     | İkili | Üçlü  | Dörtlü | İkili | Üçlü  | Dörtlü | İkili | Üçlü  | Dörtlü | İkili | Üçlü  | Dörtlü |
| 8,22                | 56,31 | 68,75 | 63,14  | 55,58 | 67,28 | 61,19  | 53,63 | 65,82 | 59,73  | 52,41 | 64,60 | 58,02  |
| Üst limit           | 57,68 | 70,42 | 64,67  | 56,93 | 68,92 | 62,68  | 54,94 | 67,42 | 61,18  | 53,69 | 66,17 | 59,43  |
| Alt Limit           | 56,28 | 68,71 | 63,10  | 55,55 | 67,24 | 61,15  | 53,60 | 65,78 | 59,69  | 52,38 | 64,56 | 57,99  |

Şekil 4.2. Belirsizlik oranları ışığında güç değerlerinin alt ve üst limitleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Sonuç olarak ideal şartlar altında 100 Watt elektrik üretme kapasitesine sahip bir delta tipi darrieus rüzgar türbini tasarlanıp imal edilmiştir. Rüzgar tüneline 4 m/s'den 8 m/s'ye kadar olan çeşitli rüzgar hızlarında düşey kanat açıları 5'er derece düşürülerek 3 kademede ölçümler yapılmış ve teorik olarak hesaplanan değerlere ne kadar yaklaşıldığı ve düşey kanat açısı düşürüldüğünde türbin veriminin ne kadar değiştiği gözlemlenmiştir. Kanatçıkları düşey kanat açıklıkları 5'er derece indirilerek üç kademede ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerin üç kademede yapılmasının nedeni düşey kanat açısının belli bir derecede azalması durumunda türbin veriminin nasıl değiştiğini genel anlamda gösterebilmesi adına yeterli görüldüğündendir. En yüksek elde edilen elektrik gücü düşey kanat açısı 85°'de iken yaklaşık 68 W değerindedir. Düşey kanat açıları azaldıkça elde edilen güç değerlerinde de düşüşler kaydedilmiştir. Böylece düşey kanat açısı azaldıkça verimliliğin de her 5 derecelik düşüşte yaklaşık %2 düştüğü görülmüştür. Verim düşüklüğünün birçok nedeni vardır. Düşey kanat açılarının azalmasıyla kanat açıklıklarının da kanat üzerine oluşturduğu türbülanslı akışların verime negatif etki ettiği düşünülebilir. Bazı iyileştirmeler ile sistemi daha verimli hale getirilebilir. Böylece bir sokak aydınlatması için veya elektriğin ulaşmadığı bir ev için bu türbin daha verimli şekilde kullanılabilir.

| Rüzgar Hızı, m/s | 90°   |      |        | 85°   |      |        | 80°   |      |        | 75°   |      |        |
|------------------|-------|------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|
|                  | İkili | Üçlü | Dörtlü | İkili | Üçlü | Dörtlü | İkili | Üçlü | Dörtlü | İkili | Üçlü | Dörtlü |
| 3,92             | 0,18  | 0,24 | 0,22   | 0,18  | 0,24 | 0,22   | 0,17  | 0,23 | 0,21   | 0,17  | 0,22 | 0,20   |
| 5,12             | 0,20  | 0,26 | 0,23   | 0,20  | 0,26 | 0,23   | 0,19  | 0,25 | 0,22   | 0,18  | 0,24 | 0,21   |
| 6,28             | 0,23  | 0,29 | 0,25   | 0,23  | 0,28 | 0,25   | 0,22  | 0,27 | 0,24   | 0,21  | 0,26 | 0,23   |
| 7,33             | 0,26  | 0,32 | 0,28   | 0,25  | 0,31 | 0,27   | 0,24  | 0,30 | 0,27   | 0,24  | 0,29 | 0,26   |
| 8,22             | 0,29  | 0,35 | 0,32   | 0,28  | 0,34 | 0,31   | 0,27  | 0,34 | 0,30   | 0,27  | 0,33 | 0,30   |

Şekil 5.1. Düşey kanat açıları ve türbin verimleri

Yapılan ölçümler ile elde edilen değerler düşünüldüğünde düşey kanat açılarının değerlerinin azaltılmasının rüzgarın verimine negatif yönde etki ettiği, türbin verimini düşürdüğü görülmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında en ideal kanat sayısının üç kanatlı rüzgar türbini olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda rüzgar tünelineki türbülanslı hava, kanat yüzeyindeki bazı pürüzler, kanat yataklamalarından kaynaklı kayıplar iyileştirilmesi durumunda hedeflenen değerlere ulaşılacağı düşünülmektedir.

## 5.2. Öneriler

Türbin tasarımında hesaba katılmayan parametreler türbin verimine etki etmektedir. Türbin rotorunun yataklanması için daha hassas yapılabilir. Kanatçıkların yüzey kalitesi artırılabilir ve kanat yüzeyleri daha pürüzsüz hale getirilebilir. Daha hafif bir konstrüksiyonla türbin rotoru üretilebilir. Motor verimliliği yüksek bir jeneratör seçimi yapılabilir. Ölçümler daha stabil şartlarda ve daha hassas cihazlar ile yapılabilir. Kanatlarda dayanımı yüksek ve daha hafif kompozit malzemeler tercih edilebilir.



## KAYNAKÇA

- Ali, A. M., Mohamed, M. H., & Hafiz, A. A. (2013). *Theoretical Investigation of H-rotor Darrieus Turbine Performance with Different Airfoil Shapes*. Paper presented at the the Eleventh International Conference of Fluid Dynamics.
- Alqurashi, F., & Mohamed, M. (2020). Aerodynamic forces affecting the H-rotor darrieus wind turbine. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2020.
- Altan, B. D. (2006). *Perdeleme Yöntemi İle Savonius Rüzgar Çarkının Performansının İncelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi.
- Anonim. (2010). Wind Power Potential Analysis Electrical Power Resources and Development Administration (EIEI).
- Anonymous. (2005). 2005, from <http://www.windenergy.org>
- Anonymous. (2010). World Wind Energy Report World Wind Energy Association.
- Anonymous. (2011). Global Status Report *Renewables 2011 (REN21)*. Paris, Fransa.
- Atlıhan, A. B. (2006). *Rüzgar enerjisi ve Darrieus rüzgar çarklarının incelenmesi*. (Doktora), PAmukkale Üniversitesi, Denizli.
- Bingöl, F. (2017). *Küçük Rüzgar Türbinleri Optimizasyon ve Market Promosyonu Projesi*. Paper presented at the 4. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir.
- Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2014). Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(4), 333-340. doi: 10.1007/s40095-014-0129-x
- Dursun, B. (2006). *Dikey Eksenli Bir Darrieus Rüzgar Türbin Dizayn Edilmesi ve Kanat Üretimi*. Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- Ebrahimpour, M., Shafaghat, R., Alamian, R., & Safdari Shadloo, M. (2019). Numerical Investigation of the Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of the Overlap Parameter in Both Horizontal and Vertical Directions on Its Performance. *Symmetry*, 11(6), 821.
- Eldridge, F. R. (1980). *Wind Machines*. New York,: Van Nostrand. Co.
- Feng, F., Zhao, S., Qu, C., Bai, Y., Zhang, Y., & Li, Y. (2018). Research on Aerodynamic Characteristics of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine with S Series Airfoils. *International Journal of Rotating Machinery*, 2018, 8350243. doi: 10.1155/2018/8350243
- Gómez, U. E. Y., López, Z. J. A., Jimenez, R. A., López, G. V., & Villalon, L. J. (2014). Design and manufacturing of wind turbine blades of low capacity using CAD/CAM techniques and composite materials. *Energy Procedia*, 57, 682-690.
- Guo, J., & Lei, L. (2020). Flow Characteristics of a Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine with Inclined Pitch Axes. *Energies*, 13(23), 6281.
- Guo, J., Zeng, P., & Lei, L. (2020). Structure Analysis of an Innovative Vertical Axis Wind Turbine with Inclined Pitch Axes using Finite Element Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 825, 012004. doi: 10.1088/1757-899x/825/1/012004
- Gül, İ. K., A. (2018). Parça Kanatlı Savonius Rüzgâr Türbin Performansının İncelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*.
- GWEC. (2021). Global Wind Report.
- Hansen, M. O. L. (2013). *Aerodynamics of wind turbines*.
- Herbert J. Sutherland, D. E. B., and Thomas D. Ashwill. (2012). *A Retrospective of VAWT Technology*.

- Islam, M., Ting, D. S. K., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087-1109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.023>
- Karadereli, S. (1995). *Türkiye ve AB’de Rüzgar Enerjisi*. Paper presented at the TODAİE.
- Karadereli, S. (2001). Rüzgar Enerjisi. *EİE Genel Müdürlüğü*.
- Kaymak, M. K. (2009). Rüzgar Enerjisi. Retrieved 30 Mayıs 2021, from <https://web.itu.edu.tr/>
- Köse, F., Kaya, M. N.,. (2012). *The Importance of Renewable Energy Sources for Sustainable Development in Turkey*. Paper presented at the 1th International Conference Sustainable Business and Transitions for Sustainable Development, Konya.
- Krinstensen, L. (1999). The perennial cup anemometer. *Wind Energy*, 2, 59-75.
- Kuang, L., Lei, H., Zhou, D., Han, Z., Bao, Y., & Zhao, Y. (2021). Numerical Investigation of Effects of Turbulence Intensity on Aerodynamic Performance for Straight-Bladed Vertical-Axis Wind Turbines. *Journal of Energy Engineering*, 147(1), 04020087.
- Mohan Kumar, P., Sivalingam, K., Lim, T.-C., Ramakrishna, S., & Wei, H. (2019). Strategies for Enhancing the Low Wind Speed Performance of H-Darrieus Wind Turbine—Part 1. *Clean Technologies*, 1(1), 185-204.
- Özdamar, A. (2000). Dünya ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6, 133-145.
- Paraschivoiu, I. (2002). *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept*. Presses inter Polytechnique.
- Pengky, W. S. (2021). Aerodynamic Characteristics and Structure of the Blade. from <https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/04-aerodynamic-of-blade/aerodynamic-of-blade.html>
- Roh, S. C., & Kang, S.-H. (2013). Effects of a blade profile, the Reynolds number, and the solidity on the performance of a straight bladed vertical axis wind turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27. doi: 10.1007/s12206-013-0852-x
- Stütz, P. D. (2008). Construction and calculation of a darrieus vertical axis wind turbine with H-Rotor: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Su, J., Chen, Y., Han, Z., Zhou, D., Bao, Y., & Zhao, Y. (2020). Investigation of V-shaped blade for the performance improvement of vertical axis wind turbines. *Applied Energy*, 260, 114326. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114326>
- Şamdan, O. (2016). *Darrieus Tipi Rüzgar Türbini Tasarımı*. (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi.
- T.C. Resmi Gazete S.27227. (2009). *Kyoto Protokolü*.
- T.C. Resmi Gazete S. 25639. (2004). *Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği*
- T.C. Resmi Gazete S. 27007. (2008). *Elektrik İletimi Sistemi: Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*
- T.C. Resmî Gazete S. 26510. (2007). *Enerji Verimliliği Kanunu*
- Tjiu, W. M., Tjukup & Sohif, Mat & Ruslan, M.H. & Sopian, Kamaruzzaman. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. *Renewable Energy*, 75, 50–67.
- TSKB. (2020). Enerji Görünümü.

- TUREB. (2021). Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*. Ankara.
- UIUC. (2021). UIUC Airfoil Data Site from [https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html](https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html)
- Yerebakan, M. (2001). *Rüzgar Enerjisi*. Paper presented at the İstanbul Ticaret Odası.
- Yükselen, A. (2006). UCK351 Aerodinamik ders notları. Retrieved 12 Aralık 2019  
[http://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/5-%20Kanat%20profillerinin%20aerodinami%F0i\\_PPT.pdf](http://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/5-%20Kanat%20profillerinin%20aerodinami%F0i_PPT.pdf)

