

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKEY EKSENLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİN KANAT  
TASARIMININ DENEYSEL VE SAYISAL  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Erdem AKMAN**

**Enstitü Anabilim Dalı** : **MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı** : **ENERJİ**  
**Tez Danışmanı** : **Dr. Öğr. Üyesi Cemil YİĞİT**

**Nisan 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKEY EKSENLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİN KANAT  
TASARIMININ DENEYSEL VE SAYISAL  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Erdem AKMAN**

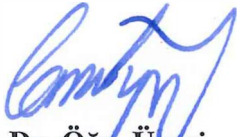
**Enstitü Anabilim Dalı**

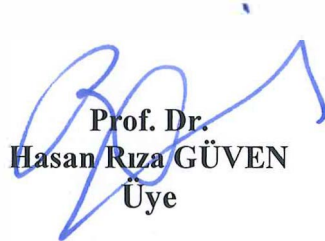
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**


**Enstitü Bilim Dalı**

**ENERJİ**

**Bu tez 26/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

  
**Dr. Öğr. Üyesi  
Cemil YİĞİT  
Jüri Başkanı**

  
**Prof. Dr.  
Hasan Rıza GÜVEN  
Üye**

  
**Dr. Öğr. Üyesi  
Ünal UYSAL  
Üye**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Erdem AKMAN

26/04/2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca değerli zamanını, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, bu tez konusunu seçmeme vesile olan ve çalışmamda bana rehberlik eden hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cemil YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-055) teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her döneminde, maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan, sonsuz sevgi ve ilgisini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY .....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Rüzgar Enerji Santralleri Tarihçesi .....	3
1.2. Rüzgar Enerjisi .....	4
1.3. Teknik Potansiyel .....	5
1.4. Rüzgar Türbinleri .....	7
1.5. Darrieus Tipi Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamik Hesapları .....	9
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	13
BÖLÜM 3.	
MODELLEME VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME.....	16
3.1. Problemin Tanımı.....	16
3.1.1. Ağ yapısı .....	16
3.1.2. Ağdan bağımsızlık.....	18
3.2. Çözüm Yöntemi .....	19
3.3. Sayısal Çözümler.....	20

## BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	29
4.1. Tasarım Çalışmaları .....	29
4.2. Sonuçlar .....	32
4.3. Belirsizlik Analizi .....	37
4.4. CO <sub>2</sub> Emisyonu ve Çevreye Etkileri .....	39
4.4.1. Maliyet hesabı .....	41
4.4.2. Emisyon hesabı .....	42

## BÖLÜM 5.

TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....	46
KAYNAKLAR .....	48
ÖZGEÇMİŞ .....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Ön Bakış Alanı [ $m^2$ ]
c	: Kanat Veter Uzunluğu [m]
$C_D$	: Direnç Katsayısı
$C_L$	: Kaldırma Katsayısı
$C_N$	: Normal Kuvvet Katsayısı
$C_P$	: Güç Katsayısı
$C_T$	: Teğet Kuvvet Katsayısı
$F_D$	: Direnç Kuvveti [N]
$F_L$	: Kaldırma Kuvveti [N]
$F_N$	: Normal Kuvvet [N]
$F_T$	: Moment(Tork) Kuvveti [N]
g	: Yerçekimi ivmesi [N/kg]
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
k	: Türbülans Kinetik Enerji
$K_e$	: Enerji Düzeltme Katsayısı
M	: Moment [Nm]
P	: Güç [W]
PLA	: Polylactic Acid
R	: Rotor Yarıçapı [m]
t	: Zaman [Saniye]
U	: Teğetsel Hız [m/s]
V	: Mutlak Rüzgar Hızı [m/s]
W	: Bağlı Rüzgar Hızı [m/s]
$\nabla$	: Kartezyen Koordinatlarda Laplace Fonksyonu

- $\alpha$  : Hücüm Açısı [ °]  
 $\varepsilon$  : Türbülans Dağılma Oranı  
 $\lambda$  : Kanat Uç Hız Oranı  
 $\rho$  : Havanın Yoğunluğu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\tau$  : Viskos Gerilim Tensörü  
 $\omega$  : Açısai Hız [rad/s]



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Türkiye’deki Rüzgar Enerjisinin Yıllar İçindeki Değişimi [4] .....	6
Şekil 1.2. Dikey eksenli rüzgar türbin örnekleri .....	7
Şekil 1.3. Dikey eksenli rüzgar türbin uygulamaları .....	9
Şekil 1.4. Darrieus Rüzgar Çarkına Aerodinamik Kuvvetlerin Etkisi .....	10
Şekil 3.1. NACA0012 Kanat Profili .....	16
Şekil 3.2. Modelin hesaplama bölgesi ve sınır şartları.....	17
Şekil 3.3. 2D model ve ağ yapısı .....	18
Şekil 3.4. Farklı eleman sayılarına göre sonuçların karşılaştırılması.....	19
Şekil 3.5. Profil üzerindeki sınır tabaka katmanına göre sonuçların değişimi.....	19
Şekil 3.6. Oluşturulan profillerin kaldırma katsayısı oranları.....	22
Şekil 3.7. Oluşturulan profillerin direnç katsayısı oranları .....	22
Şekil 3.8. Oluşturulan Profillerin Kaldırma Direnç Katsayıları Oranları .....	23
Şekil 3.9. Parametrik çalışma sonucundaki seçilen kanat profil geometrisi .....	24
Şekil 3.10. Adjoint Solver metodu ile geliştirilen profil geometrisi .....	25
Şekil 3.11. 3 Kanat profilin arasındaki geometrik farklar.....	25
Şekil 3.12. 3 Kanat Profilin Basınç Gradyenleri Şeması .....	26
Şekil 3.13. 3 Kanat Profilin Hız Gradyenleri Şeması .....	26
Şekil 3.14. 3 Kanat Profilin Hız Vektörleri .....	27
Şekil 3.15. 3 Kanat Profilin Hız Vektörleri .....	28
Şekil 3.16. NACA0012-β Profili Akım Çizgisi .....	28
Şekil 4.1. Tasarlanan Darrieus türbinin montaj görüntüsü.....	30
Şekil 4.2. Deney düzeneği çalışmamız .....	30
Şekil 4.3. Türbin içerisindeki kanatların konumlandırılması.....	31
Şekil 4.4. NACA0012 profilinden elde edilen gücün kanat uç hız oranına göre değişimi .....	33

Şekil 4.5. NACA0012- $\alpha$ profilinden elde edilen gücün kanat uç hız oranına göre değişimi .....	34
Şekil 4.6. NACA0012- $\beta$ profilinden elde edilen gücün kanat uç hız oranına göre değişimi .....	34
Şekil 4.7. Üç kanatlı türbinde kanat uç hız oranına bağlı olarak güç değerinin değişimi .....	35
Şekil 4.8. Dört kanatlı türbinde kanat uç hız oranına bağlı olarak güç değerinin değişimi .....	35
Şekil 4.9. Beş kanatlı türbinde kanat uç hız oranına bağlı olarak güç değerinin değişimi .....	36
Şekil 4.10. Kanat sayısına bağlı olarak güç katsayısındaki değişim.....	37

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1Türbülans modelinde kullanılan sabit katsayılar .....	20
Tablo 3.2. Parametrik çalışma sonucundaki kaldırma direnç katsayı değerleri .....	21
Tablo 4.1. Türbin tasarım geometrileri.....	29
Tablo 4.2. Eklemeli Üretim için Türbin Parçaları Sarf Malzemeleri .....	32
Tablo 4.3. Kanat Uç Hız Oranına Bağlı Deneysel Verilerin Denklemleri.....	36
Tablo 4.4. Türbinde Kanat Profillerine Göre Anlık Güç(W) Değerleri .....	40
Tablo 4.5. Yıl boyunca Kanat Profillerine Göre Elde Edilebilecek Güç(W) Miktarları .....	40
Tablo 4.6. 250 Adet Türbin Kullanılması Durumunda Yıl Boyunca Elde Edilecek Enerji Miktarı .....	40
Tablo 4.7. Güç Sistemi Bileşenleri ve Maliyetleri (Şubat 2019 1\$=5,30TL) .....	41
Tablo 4.8. Kanat Profiline Göre Yılda Tasarruf Edilebilecek Fuel-Oil Yakıtı Miktarları .....	43
Tablo 4.9. Yılda Kanat Profiline Göre Azaltılması Öngörülen Karbondioksit Emisyon Değerleri .....	44

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Dikey Eksenli Rüzgar Türbini, Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği, Numerik Analiz

Dikey eksenli rüzgar türbininin kanat performansının deneysel ve nümerik olarak incelendiği çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri ile literatürde yaygın olarak kullanılan NACA0012 kanat profili referans alınarak parametrik ve nümerik optimizasyon metotlarıyla yeni profiller geliştirilmiştir. Parametrik optimizasyonda kanat geometrisinin kamburluk ve çukurluğu sistematik olarak değiştirilerek, nümerik optimizasyonda ise kaldırma ve direnç katsayıları parametre alınarak  $C_L/C_D$  oranını maksimum yapacak sırasıyla NACA 0012- $\alpha$  ve NACA 0012- $\beta$  kanat profili elde edilmiştir. Geliştirilen profiller eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş ve deneysel olarak 3, 4 ve 5 kanatlı türbinler için güç verileri tespit edilmiştir. NACA 0012 ve NACA 0012- $\beta$  profilleri için 4 kanatlı türbinde en yüksek güç elde edilirken, NACA 0012- $\alpha$  profili için 5 kanatlı türbinde en yüksek güç değerine ulaşılmıştır. 4 kanatlı türbin için referans profilden %19'luk güç katsayısı elde edilirken, NACA0012- $\alpha$  ve NACA0012- $\beta$  profillerinden sırasıyla %23 ve %29'luk güç katsayısı elde edilmiştir. Nümerik optimizasyonla türetilen kanat profili, parametrik optimizasyonla türetilen kanat profiline göre %27 daha yüksek güç katsayısı değerine ulaşmıştır.

# EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE BLADE PERFORMANCE

## SUMMARY

Keywords: Vertical Axis Wind Turbine, Computational Fluids Dynamics, Numerical Optimization

In this study, the performance of the vertical axis wind turbine's blade was examined experimentally and numerically. New profiles have been developed by using Computational Fluid Dynamics analysis with parametric and numerical optimization methods by taking NACA0012 blade profile which is widely used in the literature as a reference. In parametric optimization, the upper and lower camber of the blade geometry was changed systematically, while in numerical optimization, the lift and drag coefficients were taken as parameter and the NACA 0012- $\alpha$  ve NACA 0012- $\beta$  blade profiles maximizing the  $C_L/C_D$  ratio were obtained, respectively. Developed profiles were produced by fused deposition modelling and power data were obtained experimentally for 3, 4, and 5 blades turbines. The maximum power for NACA 0012 and NACA 0012- $\beta$  profiles was obtained from 4 blade turbine while for NACA 0012- $\alpha$  profile the maximum power was obtained from 5 blade turbine. A 19% power coefficient was obtained from the reference profile while 23% and 29% power coefficients were obtained from NACA0012- $\alpha$  and NACA0012- $\beta$  profiles respectively for 4 blade turbine. The blade profile obtained from numeric optimization has 27% more power coefficient from the one obtained from parametric optimization.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Günümüzde ülkemizde ve dünyamızda artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Dünyada enerji ihtiyacının büyük bir kısmı petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıt kaynaklarından elde edilmektedir. Fosil yakıt kaynaklarının belli bölgelerde sınırlı olması ve ülkeden ülkeye kullanım fiyatları değişiklik göstermekte ve kullanımı yıllar geçtikçe daha da artarak devam etmektedir. Fosil yakıtların kullanımından doğan zararlı maddelerin çevreye verdikleri zararlar zaman içerisinde artmakta ve dünya üzerindeki canlı yaşamını tehdit etmektedir. Fosil yakıt kaynaklı zararlı bileşenlerin atmosfere salınması ve küresel ısınmaya neden olması dünyadaki dengeyi nihayetinde geri dönülemeyecek bir safhaya taşıyacaktır.

Ayrıca teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi ve ülkelerin enerji ihtiyaçları gün geçtikçe artması, ortaya çıkan gerginliklerden doğan savaş, açlık, ambargo gibi etkenleri tetiklemektedir. Dünya üzerinde var olan fosil yakıt kaynaklı enerjinin yakın bir gelecekte hızlı bir şekilde tükenmesi insanları doğal, yenilenebilir, ve sonsuz enerji kaynaklarını araştırma ve geliştirmeye itmektedir. Gelişmişlik düzeyi artan ülkelerin enerji ihtiyaçlarını yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamak için projeler hazırlamakta ve yakın gelecekte enerji ihtiyaçlarının büyük bölümünü yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmek istemektedirler. Ülkemizde de hükümetin yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmak ve dışa bağımlılığı azaltmak için teşvikler verilmekte, çeşitli yatırımlar için imkan sağlanmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri ile enerji elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu türbinlerde çeşitli parametreler ele alınarak optimum verilere bağlı olarak yatırımlar yapılmaktadır. Bu yatırımlarda maksimum güç elde etmek ve türbinlerin verimlerini arttırabilmek için çeşitli araştırmalara konu

olmaktadır. Hal, hazırda ulaşılan güç değerleri dikkate alındığında, rüzgar türbinleri için daha fazla araştırma yapılmasına gerek duyulduğu görölmektedir.

Önümüzdeki yıllarda çeşitli alanlarda kullanımının yaygınlaşacağı düşünölen dikey eksenli rüzgar türbinlerinin, daha düşük hızlarda devreye girebilmeleri ve geleneksel yatay eksenli türbinlere nazaran daha az gürültölü çalışmaları önemli avantajlarındandır.

Yaygın olarak kullanılan geleneksel yatay eksenli rüzgar türbinlerinin yerleşim yerlerine yakın yerlerde kullanılmıyor olması göz önünde bulunduracak olursak düşük rüzgar hızlarında devreye girebilmeleri açısından dikey eksenli türbinlerin kentsel alanlarda kullanımında ön plana çıkardığını söyleyebiliriz. Bu sayede yakın gelecekte dikey eksenli türbinlerin kullanımının yaygınlaşma potansiyeli oldukça yüksektir.

Sonuç olarak az rüzgar alan bölgelerde, şehir içinde kalan park, bahçe ve binaların konumlarından dolayı rüzgar cephe yüklerinden oluşan hava akım alanlarında kullanımı artabilecektir Dolayısıyla fosil yakıtların yerine daha ekonomik, dışa bağımlılığı azaltan yenilebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması gerekmektedir Enerji ihtiyacımızın artacak olması nedeniyle rüzgar enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarının kullanımı, ölkemizin gelecek hedeflerine ulaşılabilmesi ve aynı zamanda iklim değişikliklerine bağlı uluslararası antlaşmalar çerçevesinde karbon salınım değerlerini azaltıcı önlemler için önem arz etmektedir.

Bu çalışma kapsamında dünya genelinde yaygın olarak kullanılan NACA0012 olarak adlandırılan simetrik bir profil kullanılarak H-Tipi Darrieus Rüzgar Türbini için bir araştırma yapılmıştır. Profilin kamburluk ve çukurluğu parametre alınarak kanadın performansı sistematik olarak araştırılmış, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı ile analiz çalışmaları yapılmış ve en yüksek Kaldırma/Direnç oranını veren parametre değerleri tespit edilmiştir. Bu optimizasyon çalışması Ansys/Fluent yazılımı içersinde bulunan Adjoint Solver modölü kullanılarak da yapılmıştır. Eklemeli üretim yöntemi kullanılarak tespit edilen profillere sahip kanatlar

üretilmiştir. Daha sonra laboratuvar ortamında bu kanatları kullanan dikey eksenli türbin ile testler gerçekleştirilmiş ve çeşitli kanat uç hız oranları için güç katsayıları elde edilmiştir.

### **1.1. Rüzgar Enerji Santralleri Tarihçesi**

Rüzgar enerjisi tarihi çok eski zamanlara kadar dayanmaktadır. Başlangıçta tarım ve sulama için kullanılan yel değirmenleri tipleri olduğu görülmektedir. Çin'den, Orta Asya Türk coğrafyasına, İran'dan Mısır İskenderiye kadar geniş coğrafyada kullanılmış ve Haçlı seferleri ile batı dünyasına ve Akdeniz coğrafyasına taşınmıştır. Sanayi devrimi ile Avrupa ve Amerika da elektrik üretimi için santral tipi türbinler kurulmuştur [1].

Rüzgar türbininden ilk elektrik Danimarka'da Paul La Cour tarafından 1891 yılında üretilmiştir. Amerika da 1941 yılında ilk büyük rüzgar türbin çalışmaları Palmer C. Putman tarafından yapılmıştır. Almanya da 1950-1960 yılları arasında Prof. Dr. Hutter tarafından ticari rüzgar türbin çalışmaları yapılmıştır. 1958-1960 yılları arasında Fransızlar da bir çok rüzgar türbinleri kurmuşlardır. Danimarka da ise 1950'lerden sonra çeşitli güçlerde deney maksatlı türbinler kurulmuştur.

İlk defa yatay eksenli rüzgar türbini Betz tarafından 1930'lu yıllarda yapılmıştır. Dikey eksenli rüzgar türbinleri ise 1920 yılında George Jean Marie Darrieus tarafından icat edilmiştir. Bir diğer dikey eksenli tipi olan türbin ise 1925 yılında Sigurd Johannes tarafından tasarlanmıştır. Aynı zamanda bu dikey eksenli rüzgar türbinlerinin isimleri tasarımcılarının adları ile anılmaktadır [2].

Sanayi devrimi ve sonrasında yaşanan gelişmelerde enerji ihtiyacı ciddi oranda artmıştır. Bu nedenle petrol türevli yakıtların enerjide kullanılmaya başlamasından dolayı rüzgar enerjisi çalışmaları sekteye uğramıştır. Özellikle son 30 senedir de çevresel sorunlar ve küresel ısınmanın verdiği endişeler ile yenilenebilir enerji çalışmaları hız kazanmıştır. 1980'den sonra Modern Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin ticari boyutta kullanılmaya başlamasından sonra elektrik enerjisi elde



etmek için devreye alınmaya başlamıştır. Aynı zamanda dikey eksenli türbinlerinde kent içi kullanım olasılığının olması yatay eksenlere oranla daha az gürültülü olması son yıllarda hem araştırma çalışmalarına konu olmuştur hem de ticari olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Ayrıca dikey eksenli türbinlerin rüzgar yönünden bağımsız olması diğer avantajlarından biridir.

## 1.2. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi; doğal, yenilenebilir, temiz ve sonsuz bir güç olup kaynağı güneştir. Güneşin dünyaya gönderdiği enerjinin %1-2 gibi küçük bir miktarı rüzgar enerjisine dönüşmektedir Güneşin, yer yüzeyini ve atmosferi homojen ısıtmamasının bir sonucu olarak ortaya çıkan sıcaklık ve basınç farkından dolayı hava akımı oluşur. Bir hava kütlesi mevcut durumundan daha fazla ısınrsa atmosferin yukarısına doğru yükselir ve bu hava kütesinin yükselmesiyle boşalan yere, aynı hacimdeki soğuk hava kütlesi yerleşir. Bu hava kütlelerinin yer değiştirmelerine rüzgar adı verilmektedir. Diğer bir ifadeyle rüzgar; birbirine komşu bulunan iki basınç bölgesi arasındaki basınç farklarından dolayı meydana gelen ve yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımıdır. Rüzgarlar yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına akarken; dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi, yüzey sürtünmeleri, yerel ısı yayılımı, rüzgar önündeki farklı atmosferik olaylar ve arazinin topografik yapısı gibi nedenlerden etkilenir. Rüzgarın özellikleri, yerel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün homojen olmayan ısınmasına bağlı olarak, zamansal ve yöresel değişiklik gösterir. Rüzgar hız ve yön olmak üzere iki parametre ile ifade edilir. Rüzgar hızı yükseklikle artar ve teorik gücü de hızının küpü ile orantılı olarak değişir [3].

Yenilebilir ve temiz bir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisini kullanan santraller son yıllarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Ticari olarak kullanılan bu santraller genellikle yüksek verimleriyle ön plana çıkan yatay eksenli rüzgarı önden alan ve 3 kanatlı yüksek enerji elde edilen modern rüzgar türbinleridir. Bu türbinler yüksek rüzgar hızlarında devreye girmeleri, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, ses ve gürültü kirliliği yapmasında dolayı yerleşim yerlerine uzak yerlerde kullanılmaktadır. Diğer

tarafından görsel açıdan daha estetik, daha düşük ses seviyesi ve daha düşük rüzgar hızlarında devreye girebilmesi nedeniyle kentsel bölgelerde yaygın olarak kullanılabilir olması dikey eksenli rüzgar türbinlerinin ilerleyen zamanlarda kullanımının artması söz konusudur.

Türkiye genelindeki rüzgar hızı ortalamalarına bakıldığında rüzgar enerjisi santrali kurmaya elverişli bölgelerin yaklaşık %60'ında 7 m/s'nin altında ortalama rüzgar hızı değerlerine ulaşılmaktadır. Bu bilgiden hareketle verimleri yatay eksenli rüzgar türbinleri kadar verimli olmasa da daha düşük rüzgar hızlarında devreye girebildikleri için dikey eksenli rüzgar türbinlerinin gelecekte kullanımının yaygınlaşabileceği düşünülmektedir.

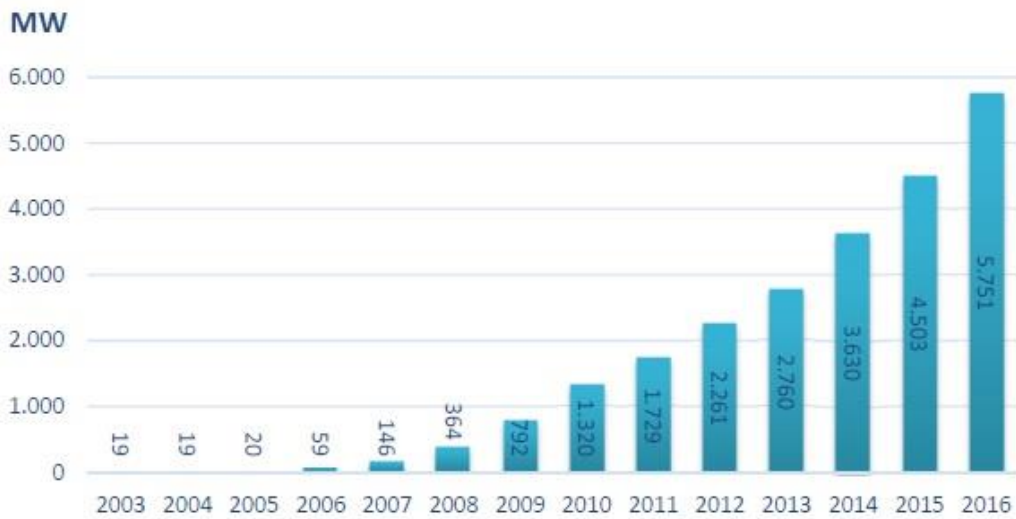
### **1.3. Teknik Potansiyel**

Rüzgar enerjisi temiz, yenilenebilir, sonsuz ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisinin bu özelliklerinden dolayı her yıl kullanımı giderek artmaktadır. Uluslararası enerji ajansı tarafından yapılan araştırmalarda dünya üzerindeki yaşam bölgeleri dikkate alınarak 5,1 m/s üzerinde rüzgar kapasitesine sahip alanların ve bu alanların %4'ünün kullanılabilirliği öngörülerek yapılan araştırmalarda dünya rüzgar enerjisi teknik potansiyelinin 53000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. British Petrol(BP)'in dünya enerji verilerine göre dünyada 2017 sonu itibarı ile 25551 TWh/yıl elektrik enerjisi tüketimi olduğu tespit edilmiştir [4]. Buradan da görüleceği gibi sadece rüzgar enerjisi teknik potansiyelinin yarısı bile dünya üzerinde tüketilen enerjinin tamamını karşılayabilmektedir.

Dünyada rüzgar enerjisinden üretilen güç kapasitesi 2017 yılı sonu itibarı ile 514718 MWh/yıl [4] olarak gerçekleşmiştir. Ülkemizde ise rüzgar enerjisinden elde edilen enerjinin 6516 MW olarak gerçekleştiği yine British Petrolün raporunda görülmektedir. Türkiyenin karasal bölgelerde kurulabilecek rüzgar potansiyeli dikkate alındığında (Onshore) 48000 MW rüzgar potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deniz rüzgarı (Offshore) potansiyelinin de 17393 MW olduğu tespit edilmiştir.

Kurulum maliyetleri dikkate alındığında öncelik olarak kara potansiyelinin değerlendirilmeye alındığı görülmektedir [5].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 2009 yılında kabul edilen Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi çerçevesinde, 2023 yılına kadar rüzgâr enerjisi kurulu gücümüzün 20.000 MW seviyesine ulaştırılması ve güneş enerjisi potansiyelinin elektrik üretimi amaçlı azami ölçüde değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef ile Bakanlık 2015-2019 Stratejik Planında yer alan 2019 yılı sonuna kadar 10.000 MW rüzgâr kurulu gücüne ulaşma hedefi doğrultusunda, 2016 yılsonu itibarıyla rüzgâr enerjisi santrali için 9.893,6 MWe kurulu gücünde lisans ve 209,9 MWe kurulu gücünde önlisans verilmiştir. 2016 yılı sonu itibarıyla işletme halinde bulunan rüzgâr santrali toplam kurulu gücü 5.751 MW'tır [6].



Şekil 1.1. Türkiye'deki Rüzgar Enerjisinin Yıllar İçindeki Değişimi [4]

Şekil 1.1.'den de görüleceği gibi ülkemizde rüzgar enerjisinin son yıllarda ciddi bir ivmelenme yaşanmaktadır. Bu nedenle yakın gelecekte ülkemizdeki rüzgar türbin santrallerinin kapasitesi ciddi oranda artacağı bu grafikten öngörülebilmektedir. Bu nedenle rüzgar türbin potansiyelinin farklı tiplerde kullanımları olarak Şehir içi ve bireysel alanlarda da aynı oranda artacağını öngörmek çok zor olmamaktadır. Artık

günümüz şartlarında enerjiye katkı yapabilmek ve insanların kullandıkları enerjiyi kendi imkanları ile karşılayabilme fırsatları gittikçe artmaktadır. Bu nedenle yapılacak çalışmalar eşliğinde kent içi kullanımlarında dikey eksenli türbinlerin yatay eksenli türbinlere nazaran önemli bir yer edinme potansiyeli oldukça yüksektir. Özellikle dikey eksenli türbinlerin verimleri düşük olsa da son yıllarda yapılan akademik çalışmalar ile türbinlerin optimize edilmiş olması bu tarz türbinlerin kullanımına ilgiyi arttırmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında yapılacak çalışmaların dikey eksenli rüzgar türbinlerinin şehir içi bölgelerde (yerleşim alanları) kullanımları konusunda önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 1.2. Dikey eksenli rüzgar türbin örnekleri

Ayrıca bölgesel olarak rüzgar atlası incelendiğinde ülkemizin orta şiddette rüzgar alan bölgelerin çokluğu dikkat çekmektedir. Bu bölgelere maliyet etkin projeler açısından geleneksel yatay eksenli rüzgar türbinlerinin kurulumunun zor olduğu bölgelerde dikey eksenli rüzgar türbinlerinin kurulabileceği dikkate alınmalıdır. Bu nedenle dikey eksenli rüzgar türbin çalışmalarının önem arz ettiği ve ülkemizin enerji potansiyelini verimli kullanmak açısından dikkate değer bir potansiyeli olduğu değerlendirilmektedir.

#### 1.4. Rüzgar Türbinleri

Araştırmacılar, rüzgar türbinlerini günümüzde güç esasına, dönme eksenine ve dönme hızına göre farklı sınıflara ayırmışlardır. Bu şekilde çeşitli özellikleri

üzerinden sınıflandırmalar yapılmıştır. Bu sayede türbinlerin avantajları ve dezavantajları üzerinde durabilmişler ve aynı zamanda kurulmak istenen bölge için kriterleri belirleyebilme imkanlarını elde edebilmişlerdir [2].

Rüzgar türbinleri genelde yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinleri olarak dönme eksenine göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu sayede araştırmacılar rüzgarın yönüne, kanat ile yapılan açığa ve türbin kanat profilleri üzerine çalışmalar yaparak optimum verimi elde etmeye çalışmaktadırlar.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri kule üzerine yerleştirilmiş ve maksimum enerjiyi sağlayabilmek için kanatlar rüzgara dik yönde tasarlanmaktadırlar. En yaygın olarak kullanılan rüzgar türbin çeşididir. Geleneksel tip ve 3 kanatlı olanları yaygın olarak kullanılmaktadır ve elektrik üretim amaçlı devreye alınmaktadırlar. Kara üzerinde (On-Shore) ve deniz üzerinde (Off-shore) olarak isimlendirilmişlerdir ve çeşitli bölgelerde kullanılmaktadırlar.

Dikey eksenli türbinlerin ise en bilinen tipleri Savonius tipi ve Darrieus tipi rüzgar türbinleridir. Bu tarz türbinlerde ise rotor ekseni rüzgara dik yönde tasarlanmıştır. Bu sayede kanat profili rüzgarı her yönden alabilmekte ve kanatlar üzerindeki basınç farkından oluşan kuvvetlerin bileşkesi toplamınca dönme momentine maruz kalırlar ve kanatların dönmesini sağlamaktadırlar. Kanatların kendi içinde düz olan tipleri de, helisel biçimde konumlandırılmış tipleri de vardır. Bu sayede maksimum verimi elde edebilmek için rüzgar konumunun çeşitli etkilerinden de yararlanılmaya çalışılmaktadır.



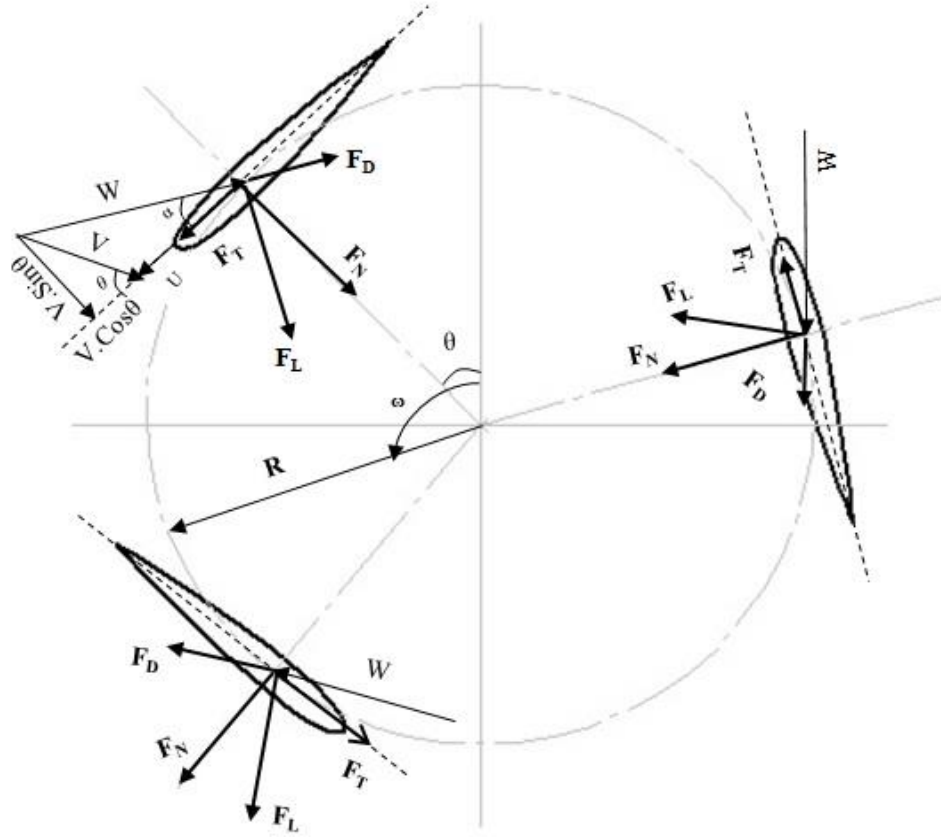
Şekil 1.3. Dikey eksenli rüzgar türbin uygulamaları

Dikey ve eksenli rüzgar türbinlerinin yatay eksenli olanlara göre verimleri düşüktür. Ancak daha düşük rüzgar hızlarında devreye girebilmeleri ve şehir içi kullanım alanları bulabilmesi dikey eksenli türbinlerin önemini arttırmıştır. Aynı zamanda dikey eksenli türbinlerin birbirlerine göre negatif yönlerini minimize edebilmek için hibrit sistem olarak tasarlanan çalışmalar da vardır. Bu sayede tek tip rotor düzeneğine göre daha verimli çalışma şartlarına ulaşılabilmektedir.

### 1.5. Darrieus Tipi Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamik Hesapları

Darrieus rüzgar türbinine gelen hava, geliş yönünden bağımsız olarak her yönden çarka giriş yapabilmektedir. Bu nedenle çarka gelen akım türbin için dönme ekseninde bir kuvvet oluşturmaktadır. Rüzgar türbinin de bulunan kanat profilleri ile etkileşime girerek kanatta kaldırma ve direnç kuvvetlerine neden olmakta ve bu

sayede türbin çarkına moment kazandırmaktadır. Hava akımının kanada olan etkileri ve oluşan kuvvetler Şekil 1.4.'te 3 kanatlı bir çark için detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Darrieus Rüzgar Çarkına Aerodinamik Kuvvetlerin Etkisi

Şekil 1.4.'te görüldüğü kanada etki eden akış doğrultusunda rüzgar hızı  $V$ , iki bileşenden meydana gelmektedir. Bu hız üçgeninde  $W$  bağıl hızı,  $U$  ise teğetsel hızı ifade etmektedir. Bağıl hız  $W$ , teğetsel hız  $U$  ve mutlak rüzgar hızı  $V$ 'ye bağlıdır. Buna göre bağıl hız (Denklem 1.1)'deki gibi yazılır.

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (1.1)$$

(Denklem 1.1)'deki teğetsel hız ( $U$ ) vektörünün, açısal hız ( $\omega$ , rad/s) ve çarkın yarıçapı ( $R$ , m) ile bağıntısını (Denklem 1.2)'deki gibi yazılırsa,

$$\vec{U} = \omega R \quad (1.2)$$

Kanada gelen (W) bağıl hızın dikey bileşeni (Denklem 1.3)'te ve teğet bileşeni denklem (Denklem 1.4)'teki gibi gösterilebilmektedir.

$$W_r = V \sin \theta \quad (1.3)$$

$$W_t = V \cos \theta + \omega R \quad (1.4)$$

Bu denklemleri trigonometrik ifadeler ile yazıldığında (Denklem 1.5) ve (Denklem 1.6)'da ki gibi yazılabilir.

$$W^2 = W_r^2 + W_t^2 \quad (1.5)$$

$$W^2 = (V \sin \theta)^2 + (V \cos \theta + \omega R)^2 \quad (1.6)$$

(Denklem 1.7) ve (Denklem 1.8)'deki gibi kanada gelen hava akımının kanat ile yaptığı açı yine bu ifadeden türetilenmektedir.

$$\tan \alpha = \frac{W_r}{W_t} = \frac{V \sin \theta}{V \cos \theta + \omega R} \quad (1.7)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V \sin \theta}{V \cos \theta + \omega R}\right) \quad (1.8)$$

(Denklem 1.1) deki bağıl hızın (W, m/s), havanın yoğunluğunun ( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>), türbinin ön bakış alanının (A, m<sup>2</sup>) ve direnç katsayısının ( $C_D$ ) veya kaldırma katsayısının ( $C_L$ ) fonksiyonu olarak direnç ( $F_D$ ) ve kaldırma kuvvetleri ( $F_L$ ) sırasıyla (Denklem 1.9) ve (Denklem 1.10)'da ki gibi ifade edilebilir.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A W^2 \quad (1.9)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A W^2 \quad (1.10)$$



Yukarıdaki denklemleri kanat profiline göre normal kuvvet ve moment(tork) kuvveti şeklinde (Denklem 1.11) ve (Denklem 1.12)'deki gibi yazılırsa,

$$F_N = \frac{1}{2} \rho C_N A W^2 \quad (1.11)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho C_T A W^2 \quad (1.12)$$

Kanada etki eden bağıl hızın sonucunda oluşan kuvvetlerden yalnızca  $F_T$  kuvveti çarkta dönme momenti kazandırmaktadır, bu nedenle oluşacak moment(tork) (Denklem 1.13)'teki gibi yazılabilir.

$$M = \frac{1}{2} \rho F_T R A W^2 \quad (1.13)$$

Çarkta oluşan dönme momentinin açısal hız ile olan bağıntısı rotorda oluşacak güç (Denklem 1.14)'teki gibi ifade edilebilir.

$$P = \omega M \quad (1.14)$$

## BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Literatür incelendiğinde performansın artırılmasına yönelik olarak gerçekleştirilen deneysel ve nümerik optimizasyon çalışmalarında kanat geometrisi, sayısı, hücum açısı parametre alındığı görülmüştür. Erişen ve Bakırcı; NACA 0012 ve NACA 4412 standart kanat geometrileri üzerinden kamburluk ve çukurluğu parametre olarak üç yeni geometri oluşturmuş, k-epsilon türbülans modeli kullanarak 4, 8 ve 12 hücum açılarında kaldırma katsayısı ( $C_L$ ) değerleri elde etmiş ve türetilen kanat profillerinin referans alınan kanat profillerinden daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir [7]. Önen ve Çınar; NACA 4412 kanat geometrisinin aerodinamik performansını HAD programı yardımı ile düşük hücum açılarında inceledikleri nümerik çalışmalarında flaplı kanat profillerinin flapsız kanat profillerine göre daha yüksek kaldırma kuvveti elde edildiğini rapor etmiştir [8]. Bekka ve arkadaşları, düşük hücum açılarında NACA 0012 kanat profilini deneysel ve nümerik olarak inceledikleri ve hangi türbülans modelinin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğunu tespit ettikleri çalışmalarında, Spalart-Allmaras, Baldwin-Lomax, k- $\omega$ , k- $\omega$  SST türbülans modellerini kullanmışlar ve k- $\omega$  dışındaki modellerin deneysel veriler ile yakın sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir [9]. Güleren ve Demir; yüksek Reynold sayısı ve düşük hücum açılarında birbirinden farklı altı kanat profili için analizler yapmış ve kanat profillerinin hücum açısına göre  $C_L$  katsayısı ile Kaldırma/Direnç ( $C_L/C_D$ ) oranının değişimini incelemiştir. Yapılan analizler sonucunda CLARK-Y kanat profilinin en iyi performans verilerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [10].

Bazı çalışmalarda, düşük hızlarda türbinin devreye girmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Yılmaz ve arkadaşları literatürde yaygın olarak kullanılan 3 farklı kanat profili üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarında, 6, 7 ve 8 m/s hızlarda ve  $-4^\circ$  ile  $26^\circ$  hücum açılarında profillerin aerodinamik performansını incelemiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, Diğer profiller ile kıyaslandığında NACA 63-415 kanat

profilinde  $4^\circ$  ile  $12^\circ$  hücum açılarında  $C_L/C_D$  oranı yaklaşık 2 kat daha yüksek çıkmıştır [11]. Yao ve arkadaşları [12] NACA 0018 profili, Şahin ve Acır [13] NACA 0015 kanat profili için düşük Reynolds sayılarında ve farklı hücum açılarında  $C_L$  ve  $C_D$  katsayısı performans değerlerini nümerik ve deneysel olarak incelemişler ve Spalart-Allmaras türbülans modelinin deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Şamdan [14], Türkiye şartlarında optimum performansta çalışan Darrieus tipi rüzgar türbini tasarım kriterlerini üzerinde çalışmış ve NACA 0018 profiline sahip cam elyaf epoksi ile dikey eksenli rüzgar türbini üretmiştir. Sabaeifard ve arkadaşları ise kentsel alanlara uygun dizayna sahip bir H-tipi Darrieus tipi rüzgar türbini için farklı kanat sayıları, profil tipleri, ve türbin katılık (solidity) oranları için k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi gerçekleştirmiş, üç kanatlı türbin performans değerlerinin diğerlerine göre daha iyi olduğunu tespit edilmiştir [15].

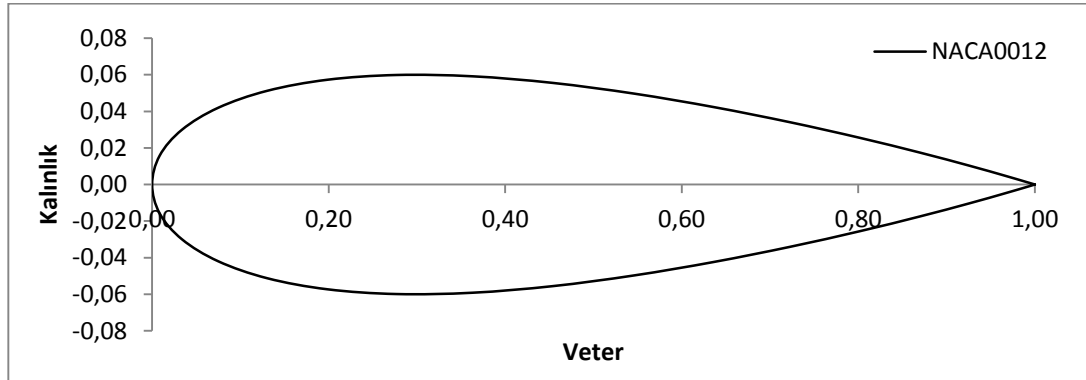
Gömeç [16], yaptığı tez çalışmasında 2 ve 3 kanatlı Darrieus tipi türbinler için HAD yazılımı kullanarak sabit rüzgar hızında NACA0021 kanat profili için zamana bağlı iki boyutlu sayısal analiz çalışmaları gerçekleştirmiş ve 3 kanatlı türbinlerin devreye girme hızlarının daha düşük ve daha stabil çalışmasına karşı 2 kanatlı türbinlerin nispeten düşük kanat uç hızlarında optimum çalışma koşullarına eriştiklerini tespit etmiştir. Castelli ve arkadaşları [17] yaptıkları çalışmada iki boyutlu HAD analizleri ile düz kanatlı Darrieus tipi rüzgar türbin rotor performansı üzerinde türbinde kullanılan kanat sayısının etkisini incelemişlerdir. NACA0025 kanat profili kullanarak 3,4 ve 5 kanat için farklı kanat uç hız oranları için tork ve güç katsayılarını incelemiş, kanat sayısının artışına bağlı olarak düşük açılarda yüksek güçler elde edilebildiğini ancak verimliliğin düştüğünü belirlemişlerdir. Lee ve Lim, Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde rotor çapı, hücum açısı, kanat helisel açısı ve veter uzunluğu gibi performansı etkileyen parametre değerleri üzerindeki etkileşimleri kriter olarak kanat üzerindeki aerodinamik davranışı inceledikleri çalışmalarında; katılık arttıkça güç katsayısının düşük kanat uç hızlarında arttığını, ancak yüksek kanat uç hızlarında artan direnç kuvvetlerinden etkilenerek azaldığını tespit etmiştir [18].

Bu tez kapsamında dünya genelinde yaygın olarak kullanılan NACA 0012 olarak adlandırılan simetrik kanat profili ve bu profilden türetilen yeni profiller kullanılarak dikey eksenli H-Tipi Darrieus rüzgar türbininin performansı kanat sayısı ve profil şekli parametre alınarak arttırılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla kanat geometrisinin kamburluk ve çukurluğu sistematik olarak değiştirilmiş ve Kaldırma/Direnç ( $C_L/C_D$ ) oranının maksimum yapılmaya çalışılmıştır. Diğer taraftan elde edilen profili Ansys/Fluent Adjoint Solver modülü ile sayısal optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaldırma katsayısını ( $C_L$ ) maksimize etmesini, direnç katsayısını ( $C_D$ ) minimize etmesini isteyerek  $C_L/C_D$  oranının maksimum yapacak profil şekli elde edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra elde edilen profiller eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ve performans testleri için deney çalışmaları yapılarak güç verileri elde edilmiştir.

## BÖLÜM 3. MODELLEME VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME

### 3.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada NACA0012 kanat profili baz alınarak dikey eksenli bir rüzgar türbini (Darrieus H-tipi) tasarlanmıştır. Rüzgar türbininde kullanılacak profilin kamburluk ve çukurluğu parametre alınarak kanat performansı sistematik olarak incelenmiştir. Deney matrisine bağlı olarak kullanılacak olan parametre ve sınır şartlarında, kanat profili için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan performans verileri ışığında en uygun parametre büyüklükleri tespit edilmiştir. Referans alınan simetrik NACA0012 kanat profil geometrisi Şekil 3.1.'de görülmektedir.



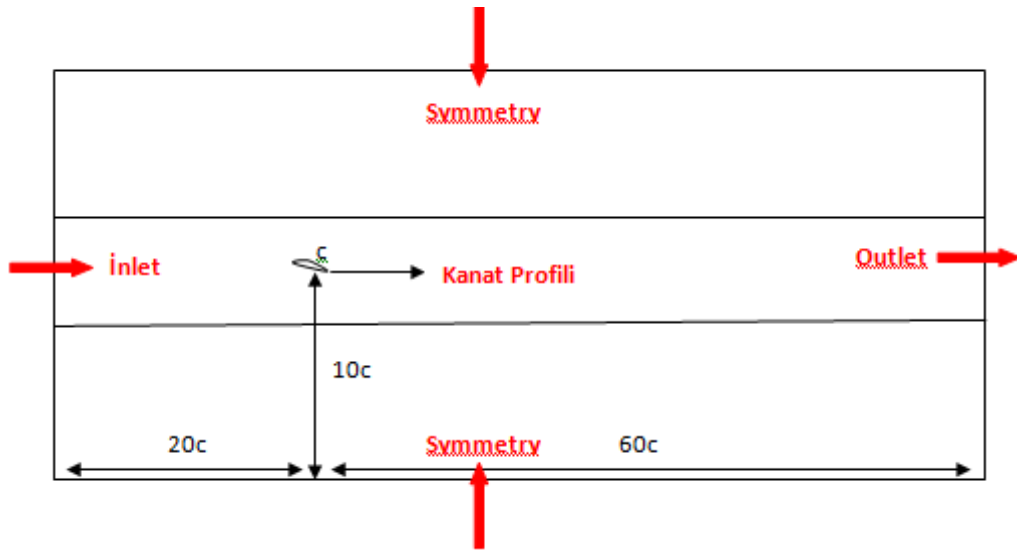
Şekil 3.1. NACA0012 Kanat Profili

#### 3.1.1. Ağ yapısı

Gerçekleştirilecek olan HAD analizleri kapsamında, ANSYS/Design Modeler modülü ile kanat profili ve onu çevreleyen hesaplama bölgesi 2-boyutlu olarak hazırlanmıştır. HAD analizleri için üçgen elemanlar ihtiva eden ağ yapısı tercih edilmiştir. Sonuçların doğruluğu açısından ağ yapısının kaliteli olması son derece önemlidir. Bu nedenle bir ağırlık fonksiyonu kullanılarak yüzey üzerinde nispeten

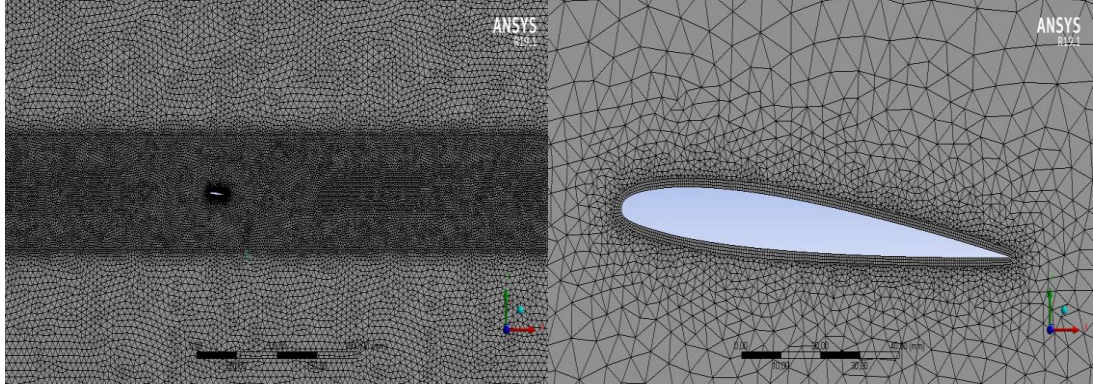
daha küçük ağ elemanları kullanılmıştır. Diğer taraftan, akış ile yüzey etkileşiminin daha iyi yakalamak amacıyla yüzey üzerine sınır tabaka tanımlanmıştır. Ayrıca oluşturulacak olan ağ yapısındaki elemanların çarpıklık ( $skewness < 0,98$ ;  $0,83-0,95$ ) ve (ortogonal quality  $> 0,1$ ;  $0,12-0,5$ ) değerlerinin literatürde kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulmasına özen gösterilmiştir.

Modelin ağ yapısı oluşturulduktan sonra, hesaplama bölgesinin sınır koşulları tanımlanmıştır. Kanat profilinin, hesaplama bölgesi sınır şartlarından etkilenmemesi için model yeterli genişlikte tutulmuştur. Hesaplama bölgesinin giriş kısmına “velocity inlet”, çıkış kısmına “pressure outlet”, eksenel genişliklere “symmetry” ve profil sınırlarına “wall” sınır koşulları atanmıştır. Çözücü metodu olarak kapalı (implicit) Navier-Stoke algoritması, hava akışının türbülansını modellemek için iki denklemlilik model olan Standart k-epsilon türbülans modeli tercih edilmiştir.



Şekil 3.2. Modelin hesaplama bölgesi ve sınır şartları

Sayısal analizimize NACA 0012 kanat profili baz alınarak incelemelere başlanmıştır. Şekil 3.2.’de modelin hesaplama bölgesini ve modele tanımlanan sınır şartlarını, Şekil 3.3.’te ise iki boyutlu düzlemimizin mesh bölgesini, sınır tabaka kalınlığını ve üçgen elemanlı ağ yapısı görülmektedir.



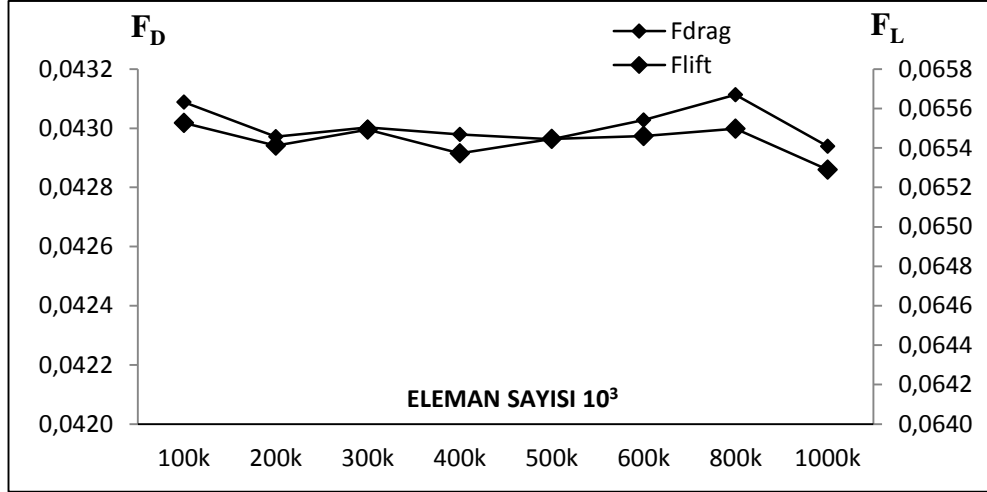
Şekil 3.3. 2D model ve ağ yapısı

### 3.1.2. Ağdan bağımsızlık

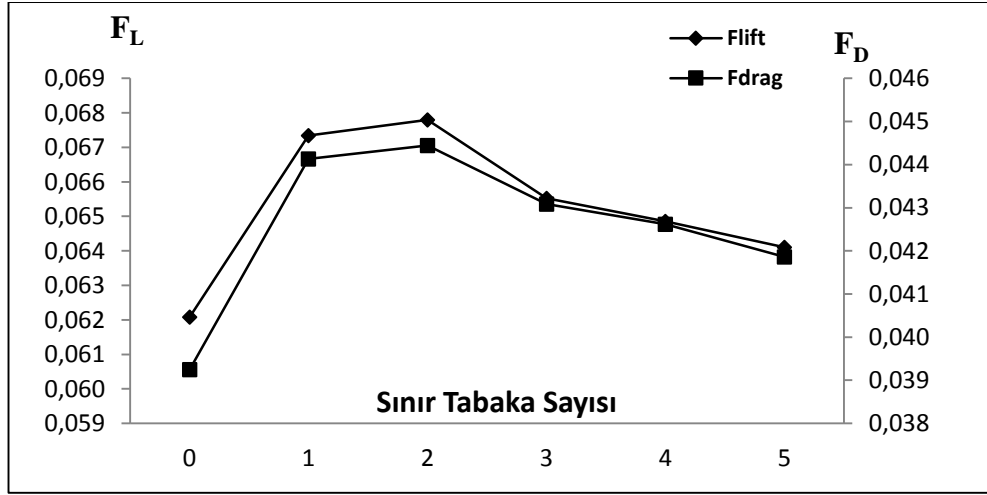
Öncelikle sonuçların ağ yapısındaki eleman sayısından bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Havanın profil üzerindeki aerodinamik davranışının hesaplama bölgesinin sınırlarını etkilememesi için, hesaplama bölgesi için boyuttan bağımsızlık çalışması yürütülmüştür.

Hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde sonuçların güvenilirliği için çözümlerin ağdan bağımsızlığının kontrol edilmesi önemlidir. Ağ bağımsızlığını test etmek için standart bir yöntem, çözünürlüğü arttırmak ve simülasyonu tekrarlamaktır.

Analiz sonuçlarımızın değişip değişmediğini belirlemek amacıyla farklı ağ yapılarında analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi ağ yapıları 100k ve 1000k eleman sayıları olarak gerçekleştirmiş olup sonuçlarda 1000'de 1-2 civarında değiştiği tespit edilmiştir. Çözüm aralığımızda önemli bir değişimin olmaması nedeniyle geri kalan analizlerimizi 100k eleman referans alınarak devam edilmiştir. Şekil 3.5.'te incelendiğinde sınır tabaka kalınlığı hiç olmayan ve olanlar arasında sonuca etki edecek bir değişim gözlemlenmediğinden dolayı 3 katmanlı sınır tabaka kalınlığı göz önüne alınarak analizlere devam edilmiştir.



Şekil 3.4. Farklı eleman sayılarına göre sonuçların karşılaştırılması



Şekil 3.5. Profil üzerindeki sınır tabaka katmanına göre sonuçların değişimi

### 3.2. Çözüm Yöntemi

Bu çalışmada sayısal modelin oluşturulması için Ansys/FLUENT yazılımı kullanılmıştır. Akışın matematiksel modeli olarak kütle korunumu denklemi ve momentum denklemlerinden türetilen sıkıştırılmaz Reynold Yaklaşımı Navier-Stokes (RANS) denklemlerinden oluşan sayısal çözüm yöntemi kullanılmıştır.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \vec{\nabla} (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$



$$\frac{\delta(\rho\vec{V})}{\delta t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V} \cdot \vec{V}) = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot \tau_{ij} + \rho\vec{g} \quad (3.2)$$

(Denklem 3.1) ve (Denklem 3.2) kütle korunumu ve momentum denklemlerini ifade etmektedir. Denklemlerde  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) yoğunluğu,  $V$  (m/s) akış parçacığının hızını,  $P$  (Pascal) statik basıncı,  $\tau$  ise viskoz gerilim tensörünü ifade etmektedir.

Bu çalışmada türbülans modeli 2 denklemlilik Standart k- $\epsilon$  modeli kullanılmıştır.

Denklemlerde görüldüğü üzere türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ), türbülans ayrıklaşma oranı ( $\epsilon$ ) ile ifade edilmektedir. Diğer taraftan türbülans modelinde kullanılan katsayılar Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Türbülans modelinde kullanılan sabit katsayılar

$C_{1\epsilon} = 1,44$	$C_2 = 1,92$	$\sigma_k = 1,0$	$\sigma_\epsilon = 1,2$	$C_\mu = 0,09$
------------------------	--------------	------------------	-------------------------	----------------

$$\frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho k \vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + P_k - \rho \epsilon \quad (3.3)$$

$$\frac{\delta(\rho \epsilon)}{\delta t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \epsilon \vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.4)$$

$$P_k = 2\mu_t (E_{ij} E_{ij}) \quad (3.5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.6)$$

### 3.3. Sayısal Çözümler

Optimizasyon çalışması kapsamında HAD analizlerinden elde edilen kaldırma katsayısı ( $C_L$ ) ve direnç katsayıları ( $C_D$ ) incelenmiştir. (Denklem 3.7)'de verilen kaldırma katsayısı ( $C_L$ ) ve (Denklem 3.8)'de verilen direnç katsayısı ( $C_D$ ) sırasıyla (Denklem 1.8) ve (Denklem 1.9)'dan türetilmiştir. Ayrıca bu katsayıların normal ( $C_N$ ) ve teğet ( $C_T$ ) kuvvet katsayıları değerleri (Denklem 3.9) (Denklem 3.10) ile kanada etki eden bileşke kuvvetleri incelenmiştir [19].

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (3.7)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (3.8)$$

$$C_N = C_L \sin(\varphi) - C_D \cos(\varphi) \quad (3.9)$$

$$C_T = C_L \cos(\varphi) + C_D \sin(\varphi) \quad (3.10)$$

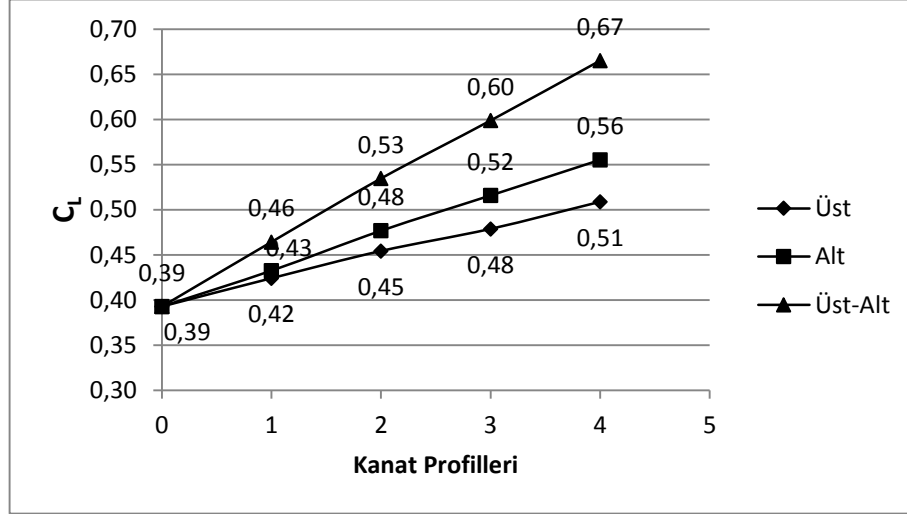
Kanat kesitine doğru gelen hava akımının kanat ucundan ve itibaren ikiye ayrılarak profilin alt ve üst yüzeyleri arasında oluşturdukları basınç farkı nedeniyle kanat geometrisi üzerinde Kaldırma kuvveti ve direnç kuvveti oluşturmaktadır. Bu kuvvetler rüzgar türbininde toplam hız bileşenlerinin bileşke büyüklüğünce dönme etkisi sağlamaktadır.

Tablo 3.2. Parametrik çalışma sonucundaki kaldırma direnç katsayı değerleri

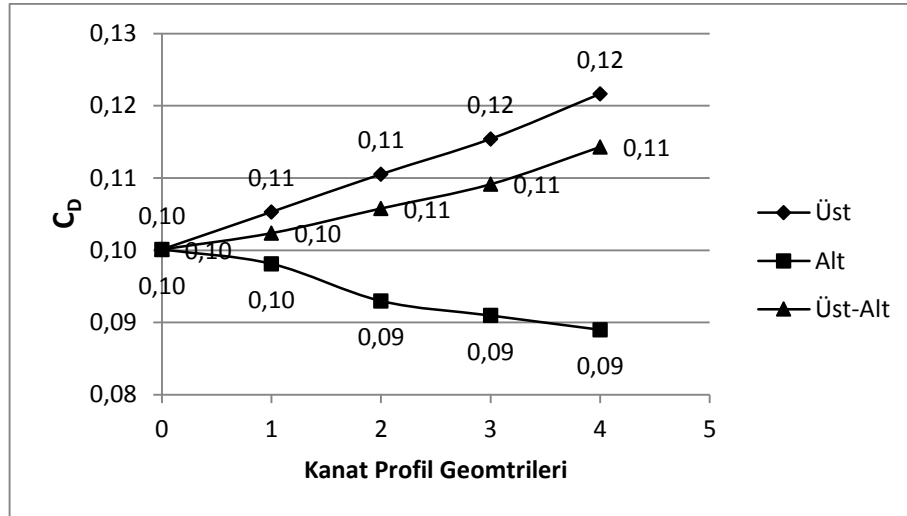
NO	PROFİL	$C_L$	$C_D$	$C_L / C_D$
0	NACA0012	0,3927	0,1001	3,9229
1	UST0.7	0,4241	0,1053	4,0273
2	UST0.8	0,4543	0,1105	4,1103
3	UST0.9	0,4788	0,1154	4,1489
4	UST1.0	0,5089	0,1216	4,1832
1	ALT0.5	0,4325	0,0981	4,4077
2	ALT0.4	0,4768	0,0930	5,1272
3	ALT0.3	0,5159	0,0910	5,6708
4	ALT0.2	0,5554	0,0890	6,2399
1	UST0.7-ALT0.5	0,4642	0,1024	4,5352
2	UST0.8-ALT0.4	0,5346	0,1058	5,0538
3	UST0.9-ALT0.3	0,5988	0,1091	5,4870
4	UST1.0-ALT0.2	0,6652	0,1143	5,8199

NACA0012 kanat profili  $5^\circ$  hücum açısında modellenmiş ve HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Profilin kamburluk ve çukurluğu ortogonal bir deney matrisine

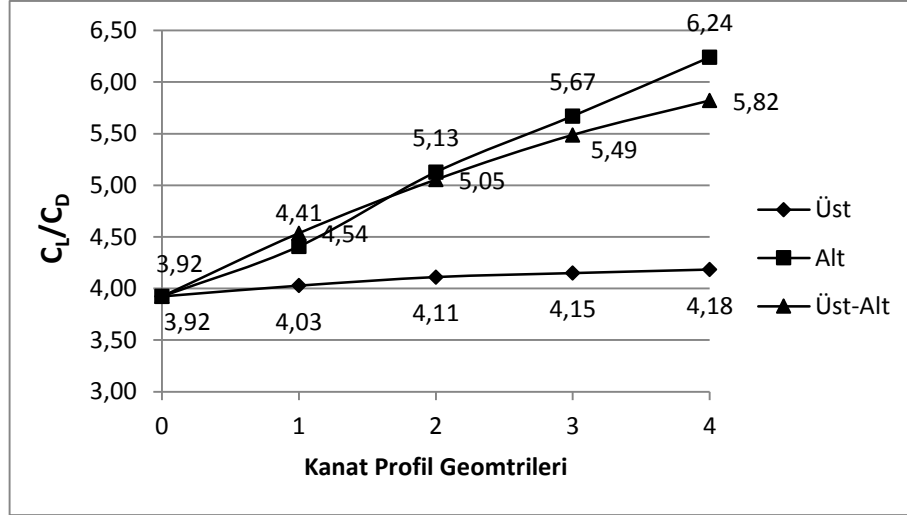
göre değiştirilmiş, her bir profilin kaldırma ve direnç katsayısı tespit edilmiştir. Tablo 3.2.'de  $C_L$ ,  $C_D$  ve  $C_L/C_D$  için HAD analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 3.6. Oluşturulan profillerin kaldırma katsayısı oranları

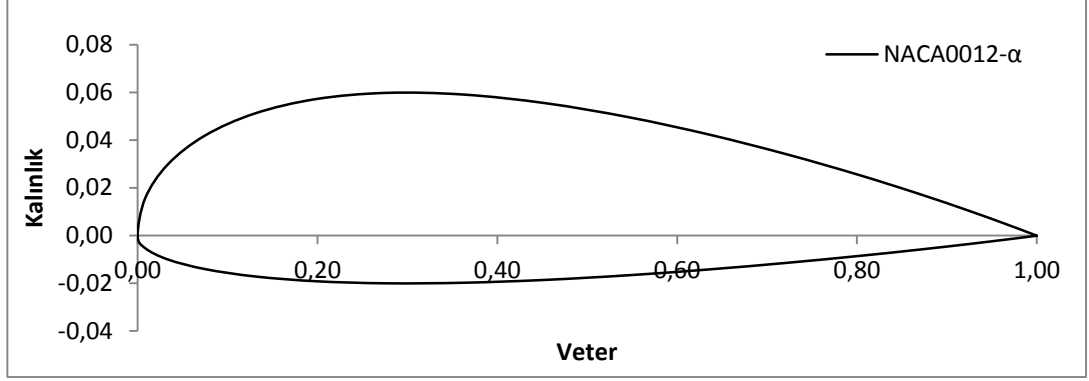


Şekil 3.7. Oluşturulan profillerin direnç katsayısı oranları



Şekil 3.8. Oluşturulan Profillerin Kaldırma Direnç Katsayıları Oranları

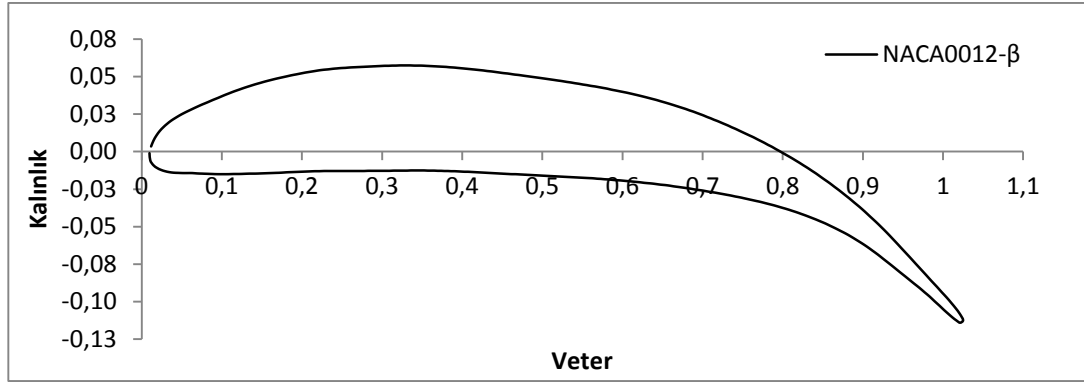
Şekil 3.6., Şekil 3.7., Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi NACA0012 kanat profili yatay ekseninde 0 olarak konumlandırılmış ve sadece kamburluk (üst), sadece çukurluk (alt) ve hem kamburluk hem de çukurluk (üst-alt) değişimine bağlı olarak numaralandırılmıştır. Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi kaldırma katsayısı ( $C_L$ ) kanat profili simetrik olmaktan çıkarıldığı her profil için kaldırma katsayısı yükselmektedir. Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi ise direnç katsayısının ( $C_D$ ) sadece alt yüzeyi yukarı öteleyip kalınlığı küçültüldüğünde azalma eğilimi gösterdiği, diğer profiller için küçükte olsa bir artış eğilimine girdiği tespit edilmiştir.  $C_L/C_D$  oranının maksimum olduğu değerler Şekil 3.8.'de görülebilmektedir. Hem kamburluğu hem de çukurluğu ötelendiği (üst-alt) profile en yüksek kaldırma katsayısı değerleri elde edilmiş olsa da, direnç katsayısında azalma sadece çukurluğun ötelendiği (alt) profile sağlandığından dolayı, en yüksek  $C_L/C_D$  oranına 6,24 ile bu profile ulaşılmıştır. Optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen kanat profili geometrisi NACA0012- $\alpha$  olarak tanımlanmış ve Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. Nümerik optimizasyon çalışmalarında NACA0012- $\alpha$  profili baz alınmıştır.



Şekil 3.9. Parametrik çalışma sonucundaki seçilen kanat profil geometrisi

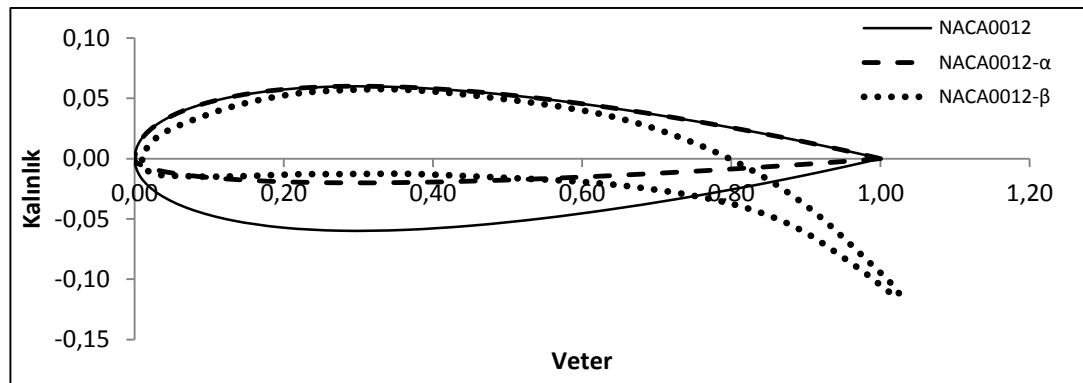
Kamburluk ve çukurluğun sistematik olarak değiştirilmesiyle Şekil 3.9.'deki gibi bir kanat profili oluşturulduktan sonra nümerik optimizasyon çalışması Ansys/Fluent yazılımı içerisinde gömülü olarak bulunan Adjoint Solver Modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen profil geometrisi (NACA0012- $\alpha$ ) Adjoint Solver modülü ile geliştirilmeye devam edilmiştir. Dizayn parametrelerinden bağımsız olan adjoint yaklaşımı tanımlı bölge içerisinde kalan gradyanların optimal hesaplama yöntemidir [20] [21] [22] [23]. Bu çalışmada mesh bölgesindeki kanat profil geometrisi üzerindeki tanımlı bölümün kaldırma kuvvetini maksimize etmesi, direnç kuvvetini minimize etmesi istenilmiş ve nihayetinde Kaldırma/Direnç katsayısı oranı maksimize olması hedeflenmiştir.

HAD analizleri Adjoint Solver ile yapılacağından dolayı adjoint hesaplamalarına ve gradyent şemalarına uyumluluk göz önüne alınmıştır. Bu nedenle türbülans modeli olarak k- $\epsilon$  türbülans modeli ve Green-Gauss Cell Based gradyen çözüm metodu tercih edilmiştir.

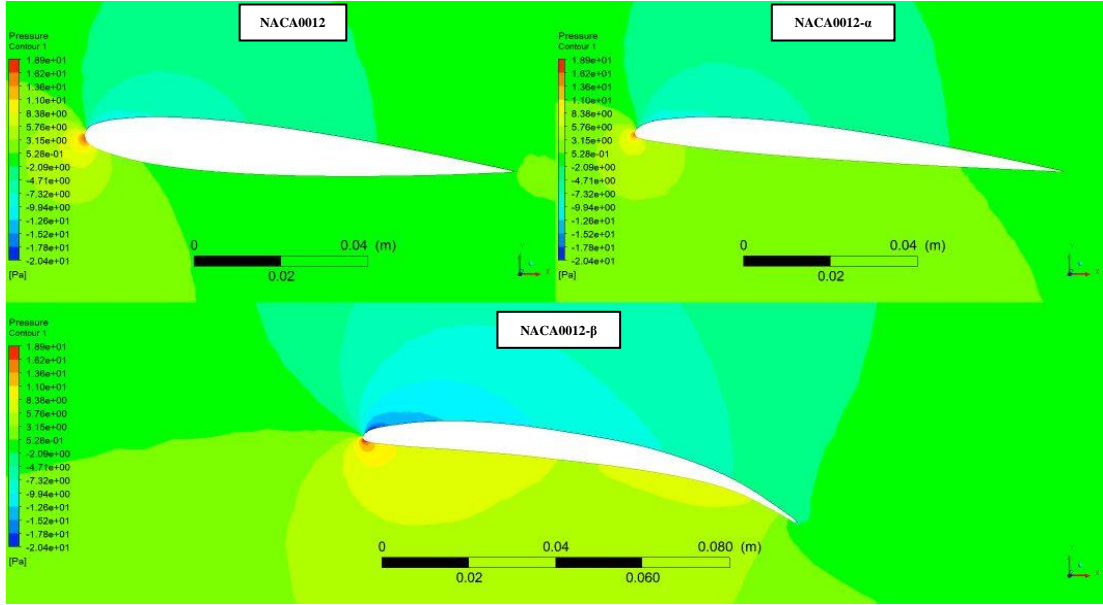


Şekil 3.10. Adjoint Solver metodu ile geliştirilen profil geometrisi

Kanat geometrisini içeren tanımlı bölge içerisindeki ağ yapısı,  $C_L/C_D$  oranını maksimize edecek şekilde modifiye edilerek değiştirilmesi sonucunda Şekil 3.10.'da görülen profil elde edilmiştir. Nümerik optimizasyon sonucunda elde edilen geometri bundan sonra NACA0012- $\beta$  olarak ifade edilecektir. Optimizasyon çalışmaları neticesinde elde edilen sonuçlar ışığında, parametrik optimizasyon ile türetilen NACA0012- $\alpha$  profiline ait  $C_L/C_D$  oranı %3,5 geliştirilerek 6,43 değerine çıkarılmıştır. Şekil 3.11.'de referans alınan NACA0012 profili, parametrik ve nümerik optimizasyon ile türetilen NACA0012- $\alpha$  ve NACA0012- $\beta$  profilleri gösterilmektedir.

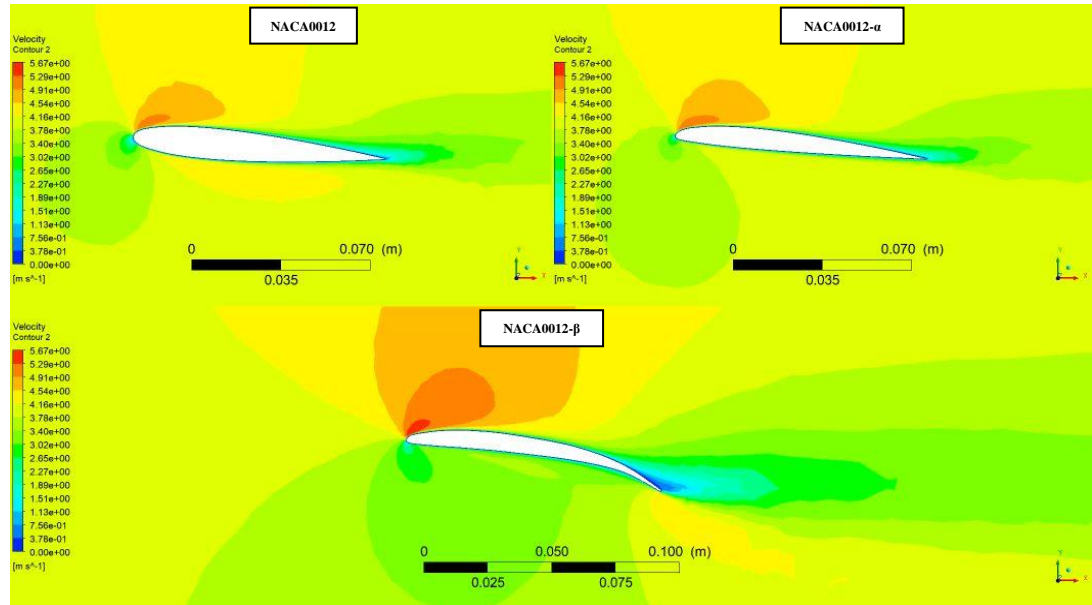


Şekil 3.11. 3 Kanat profilin arasındaki geometrik farklar



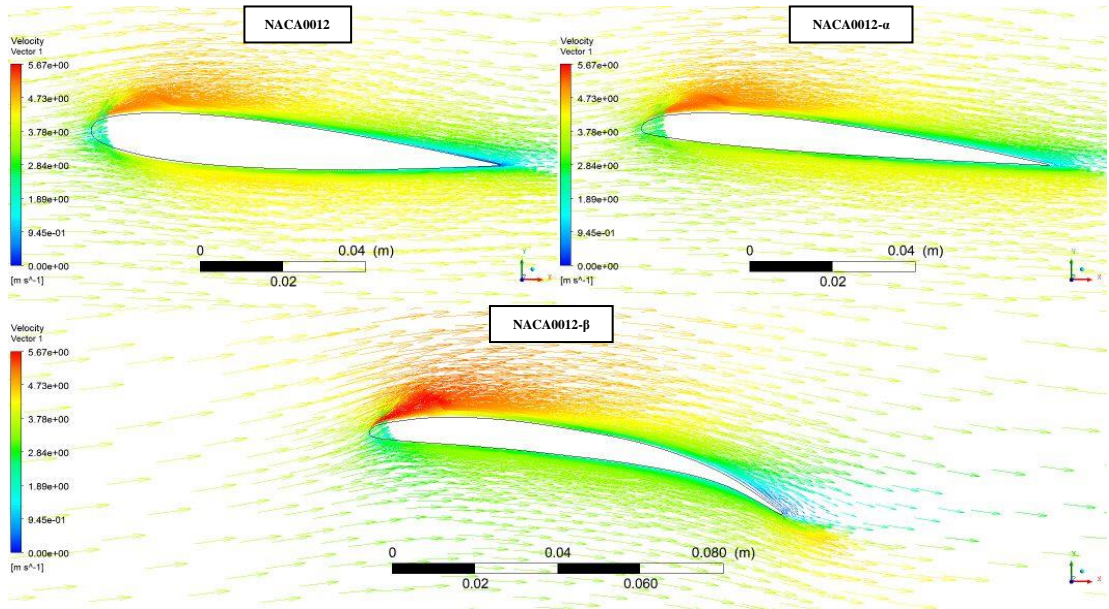
Şekil 3.12. 3 Kanat Profilin Basınç Gradyenleri Şeması

Şekil 3.12.'de 4 m/s hava hızında profiller etrafındaki basınç gradyeni verilmektedir. Profilin alt ve sırt bölgesi arasındaki en düşük basınç farkı NACA0012'de en yüksek basınç farkı ise NACA0012-β'da görülmektedir. Profiller etrafındaki basınç gradyenleri incelendiğinde optimizasyon çalışmalarıyla paralel olarak, kanat profilinden elde edilen basınç kuvveti, önce parametrik optimizasyonla artırılmış ve daha sonra nümerik optimizasyonla bu değer daha da geliştirildiği görülmektedir.



Şekil 3.13. 3 Kanat Profilin Hız Gradyenleri Şeması

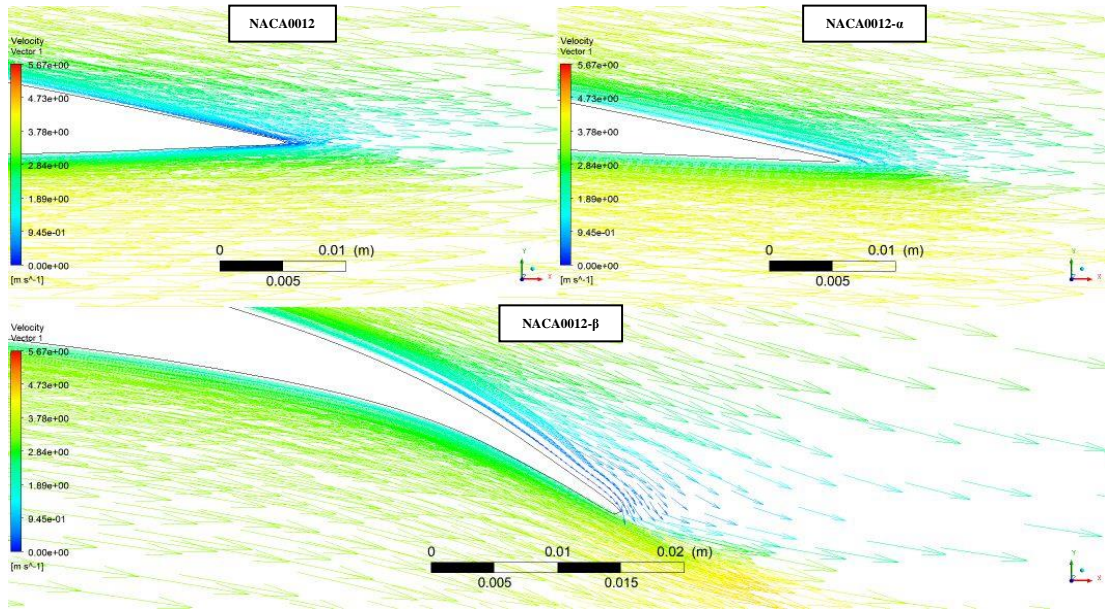
Şekil 3.13.'de profiller etrafındaki hız gradyeni görülmektedir. Bernoulli prensibiyle uyumlu olarak düşük basınç bölgelerinde hız artarken, yüksek basınç bölgelerinde ise azalmaktadır. NACA0012- $\beta$  profilinin hız gradyeni incelendiğinde, diğer profillere göre hızın kanadın alt bölgesinde yavaşladığı ve sırt bölgesinde net bir şekilde arttığı görülmektedir. NACA0012 kanat profili alt kısmında sarı olarak görülen hız bölgesinde akışın hızlandığı görülmektedir. Bu hızlanmanın NACA0012- $\alpha$  profilinde engellenmiş olduğu görülmektedir. Bu nedenle NACA0012- $\alpha$  profili NACA0012 kanat profiline göre daha iyi  $C_L/C_D$  değerine ulaştığını ve sonuçlardaki iyileşmeyi desteklemektedir. Bunun da kanadın kaldırma ve direnç katsayısı ( $C_L/C_D$ ) oranında pozitif artışa sebep olduğu öngörülmektedir.



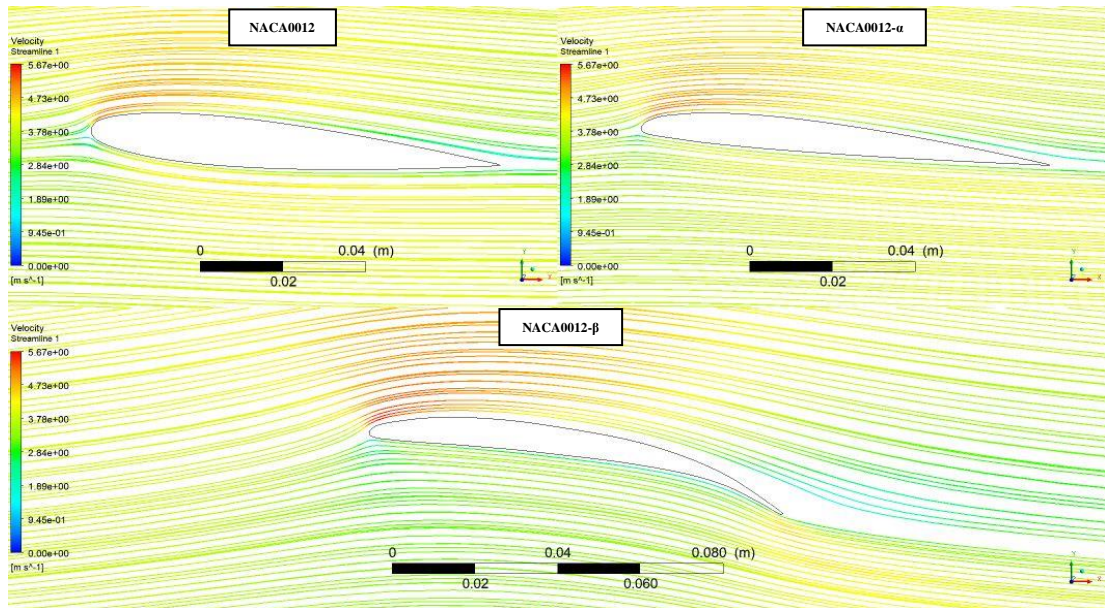
Şekil 3.14. 3 Kanat Profilin Hız Vektörleri

Şekil 3.14.'deki hız vektörleri incelendiğinde NACA0012- $\alpha$  profilinin alt kısmında gerçekleştirilmiş olan optimizasyona bağlı değişiklikle akımın profil şekline etkilenmeden yüzeyi yalayarak geçtiği görülmektedir. Bu durum Şekil 3.7.'de verilen grafikte uyumlu olarak NACA0012- $\alpha$  profilindeki direnç katsayısında meydana gelen azalmayı açıklamaktadır. Aynı şekilde NACA0012- $\beta$  profili için diğer iki profile göre partiküllerin kanadın üst yüzeyinde hızlanması kanadın üst yüzey alanının artmasından kaynaklandığı, aynı şekilde alt yüzeyinde yavaşlaması alt yüzey alanının diğer profillere göre azaldığını söylemek mümkündür.





Şekil 3.15. 3 Kanat Profilin Hız Vektörleri



Şekil 3.16. NACA0012-β Profili Akım Çizgisi

NACA0012-β profilinin kuyruk kısmında sürtünme kuvvetlerinden dolayı direnç katsayısı ( $C_D$ ) artsa da, şekil itibariyle kaldırma katsayısı üzerinde de pozitif bir etkiye neden olmaktadır. Buna ilave olarak, Şekil 3.15.'de kuyruk kısmındaki hız vektörleri ve Şekil 3.16.'da akım çizgileri yakından incelendiğinde NACA0012-β profilinin kuyruk kısmında akış ayrılmasının olduğu ve ani basınç düşmesinden kaynaklı hız vektörlerinde ters yönelimler görülmektedir.

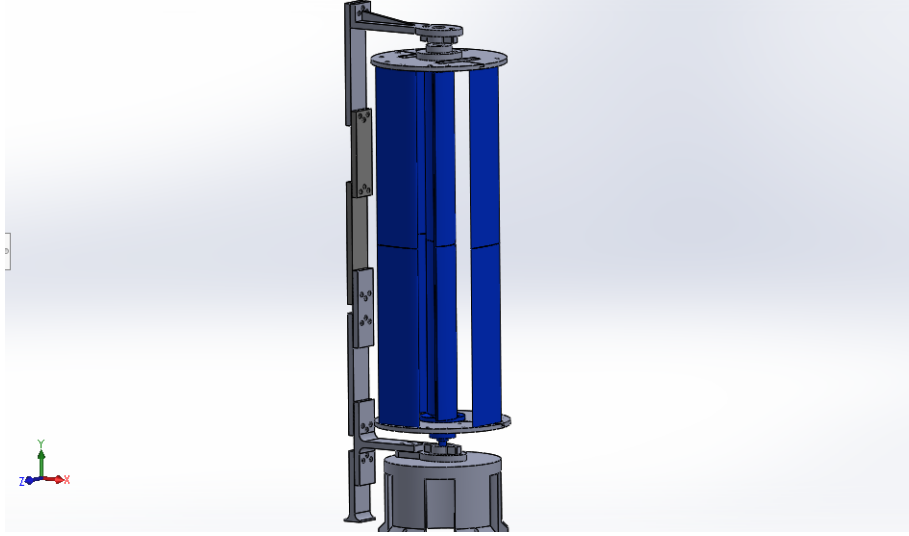
## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Tasarım Çalışmaları

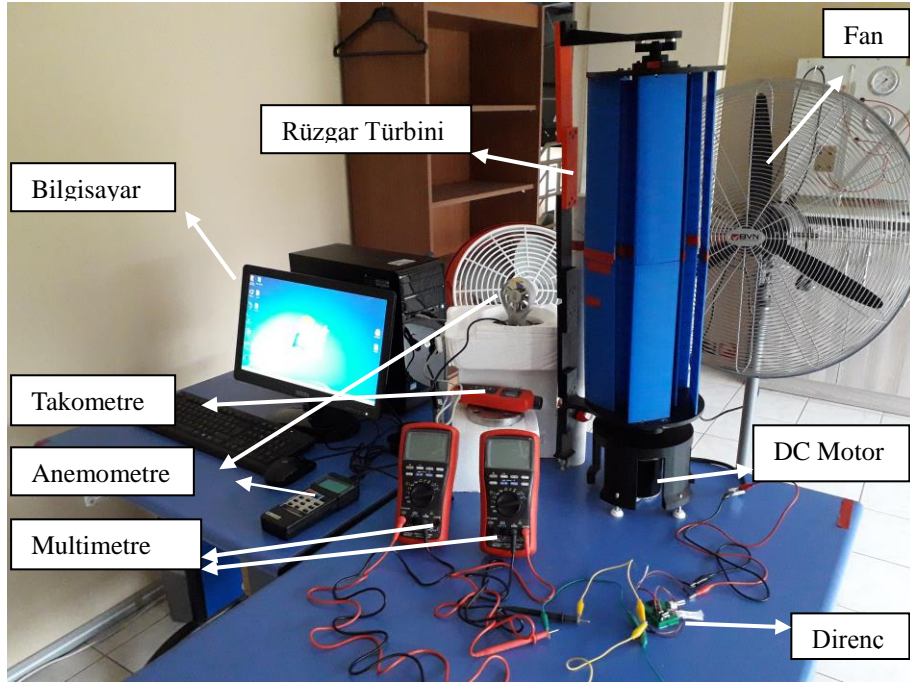
Optimizasyon çalışmalarından elde edilen kanat profillerine sahip dikey eksenli rüzgar türbinin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla eklemeli üretim yöntemi kullanılarak dikey eksenli rüzgar türbinin plastik(PLA, Polylactic Acid) aksamının tamamı 3D yazıcı (ZaxeX1) kullanılarak üretilmiştir. Geliştirilen kanat profillerinin performansının deneysel olarak incelenebilmesi amacıyla modüler bir dikey eksenli rüzgar türbini tasarlanmıştır. Tasarlanan türbinin boyutları Tablo 4.1.'de verilmektedir.

Tablo 4.1. Türbin tasarım geometrileri

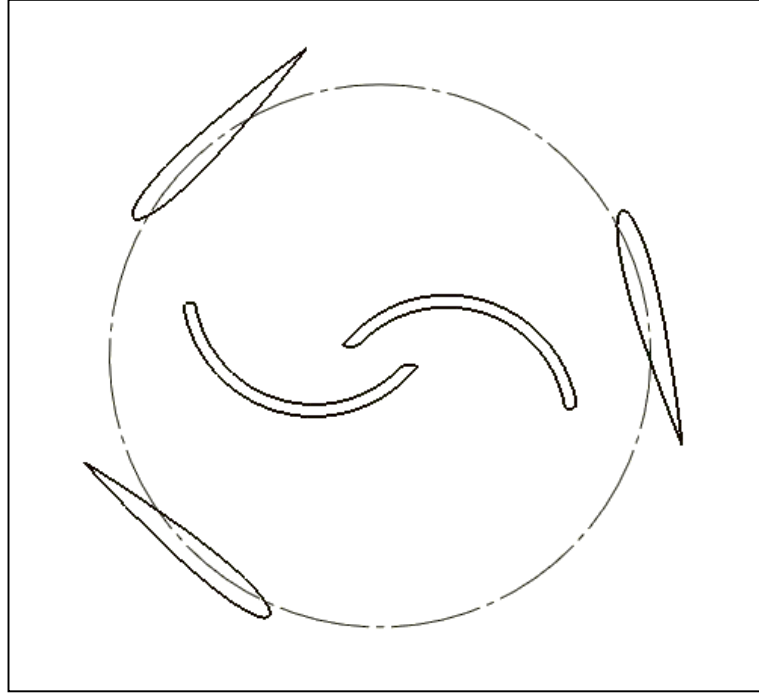
Türbin Geometrisi	
Yükseklik	556 mm
Rotor Çap	210 mm
Veter(Chord)	80 mm
Kanat Sayısı	3,4,5
Malzeme	Filament PLA
Ön Bakış Alanı	0,116 m <sup>2</sup>
Motor	50W DC



Şekil 4.1. Tasarlanan Darrieus türbinin montaj görüntüsü



Şekil 4.2. Deney düzeneği çalışmamız



Şekil 4.3. Türbin içerisindeki kanatların konumlandırılması

Tasarlanan dikey eksenli rüzgar türbini ve deney düzeneği Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de, türbin içerisinde kanatların pozisyonları ise Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Deney düzeneğinde yapay rüzgar oluşturulması için  $17400\text{m}^3/\text{h}$  debiye sahip vantilatör (Bahçıvan-BSV 750) kullanılmıştır. Rüzgar hızı ölçümlerimizi anemometre (Lutron AM-4206) kullanılarak yapılmıştır. Türbin devrini ölçebilmek için optik temassız bir takometre (Uni-T UT372) cihazı kullanılmıştır. Türbinle üretilen akım ve gerilim ölçümleri 2 adet Digital Multimetre (Brymen BM525s) ile ayrı ayrı yapılmıştır. Ölçüm sonuçları aynı zamanda anlık olarak data veri kablosu ile bilgisayara aktarılmış ve deney verileri alınmıştır. Rüzgar türbinine 24V 50W 2900d/d (Kormas) da bir DC motor bağlanmış ve dikey eksenli rüzgar türbininin kanatlarıyla mekanik enerjiye dönüştürülen rüzgarın kinetik enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi sağlanmıştır.

Eklemeli üretim yöntemiyle üretilen dikey eksenli rüzgar türbininde kullanılan sarf malzeme (Filament, PLA) miktarına ait detaylar Tablo 4.2.'de verilmiştir. Deney düzeneğinde NACA0012, NACA0012- $\alpha$ , ve NACA0012- $\beta$  profillerine sahip 3,4 ve 5

kanat için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Her bir kanat seti için deneyler toplamda 9 deney verisi olacak şekilde 3'er kez tekrarlanmıştır.

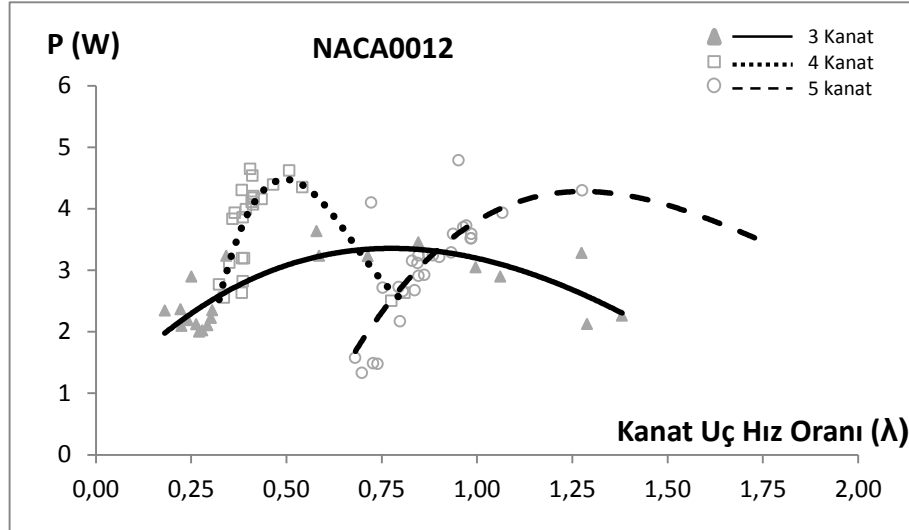
Tablo 4.2. Eklemeli Üretim için Türbin Parçaları Sarf Malzemeleri

Parça İsimleri	Filament Metre	Filament Ağırlık
Alt-Tabla Cover İnce	62,25 m	181,18 gr
Cover-adaptor-1	8,64 m	25,2 gr
Destek-Yan-01	13,26 m	38,58 gr
Destek-Yan-02	6,42 m	18,7 gr
Destek-Yan-03	12,24	35,63 gr
Destek-Yan-04	7,94 m	23,1 gr
Destek-Yan-05	15,55 m	45,26 gr
Destek-Yan-06	8,78 m	25,54 gr
Savinous-1	37,65 m	109,56 gr
Savinous-2	36,8 m	107,11 gr
8xKanat	8 x 10,14	8 x 29,50
Rulman-baglanti-1	2,58 m	7,52 gr
Rulman-baglanti-cover-2	2,6 m	7,55 gr
Rulmanlı-baglanti-50WDC	7,61 m	22,14 gr
Tabla_baglanti-1	2,21 m	6,44 gr
Tabla180_2parca_A-1	23,44 m	68,23 gr
Tabla180_2parca_A-2	23,41 m	68,18 gr
Tabla180_2parca_B-1	23,29 m	67,79 gr
Tabla180_2parca_B-2	22,28 m	64,83 gr
Toplam	429,18 m	1249,07 gr

#### 4.2. Sonuçlar

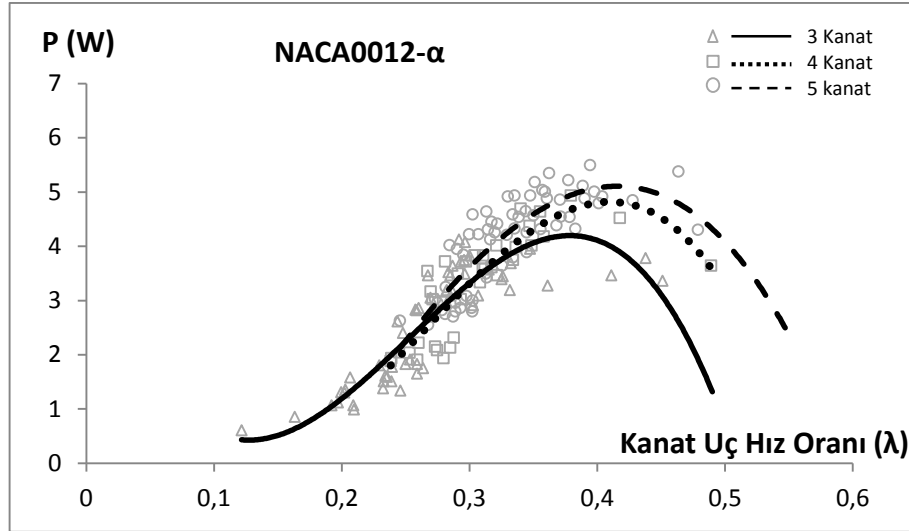
Referans olarak alınan (NACA0012), parametrik (NACA0012- $\alpha$ ) ve nümerik optimizasyonla geliştirilen kanat profilleri (NACA0012- $\beta$ ) modüler olarak tasarlanmış dikey eksenli rüzgar türbininde 3, 4 ve 5 kanatlı olarak test edilmiştir. Kanat uç hız oranına bağlı olarak, NACA0012, NACA0012- $\alpha$  ve NACA0012- $\beta$

profillerine sahip dikey eksenli rüzgar türbininden güç değerleri ölçülmüştür. Kanat sayısı parametre alınarak NACA0012 profili için ölçülen güç verileri Şekil 4.4.'de gösterilmektedir. 3 kanat için maksimum güç değeri 0.75 kanat uç hız oranında elde edilirken, 4 ve 5 kanatlı durumda maksimum güç sırasıyla 0,5 ve 1,25 kanat uç hız oranlarında elde edilmiştir. En yüksek güç 4 kanatlı türbinden ölçülmüştür.



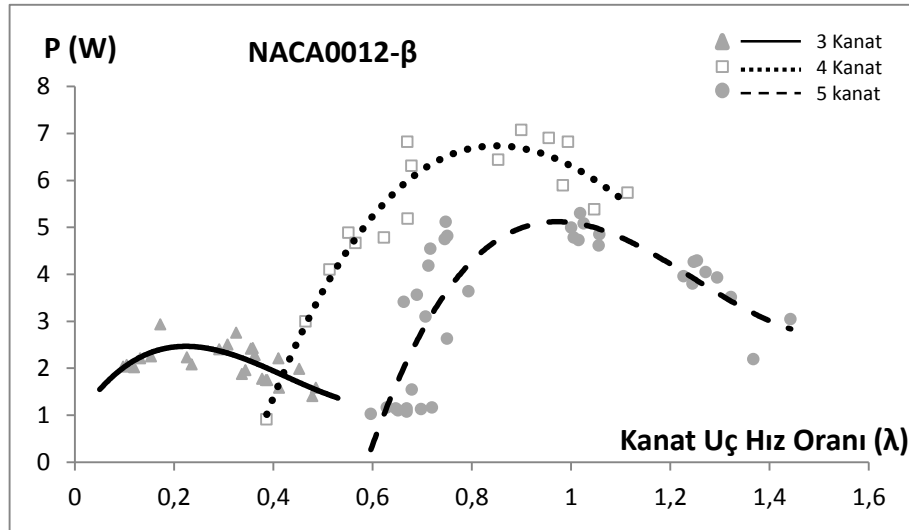
Şekil 4.4. NACA0012 profilinden elde edilen gücün kanat uç hız oranına göre değişimi

NACA0012- $\alpha$  profiline sahip türbinlerden alınan güç değerleri Şekil 4.5.'de gösterilmiştir. NACA0012- $\alpha$  profili kullanan türbinler NACA0012 profili kullananlar ile karşılaştırıldığında nispeten düşük kanat uç hız oranlarında maksimum güç değerlerine ulaşmıştır. 3 kanadın kullanıldığı türbin için 0.38 kanat uç hız oranında en yüksek güç elde edilirken, 4 ve 5 kanatlı türbinlerde en yüksek gücün elde edildiği kanat uç hız oranı 0.42 olarak tespit edilmiştir. NACA0012 kanat profili kullanılan türbinin aksine NACA0012- $\alpha$  profili kullanan türbine her kanat eklendiğinde güçte artış elde edilmiştir. Ancak nümerik analizlerde kanat profili üzerinde elde edilen  $C_L/C_D$  oranındaki artışa karşılık olarak deneysel çalışmalarda benzer oranda güç artışı tespit edilememiştir.



Şekil 4.5. NACA0012- $\alpha$  profilinden elde edilen gücün kanat uç hız oranına göre değişimi

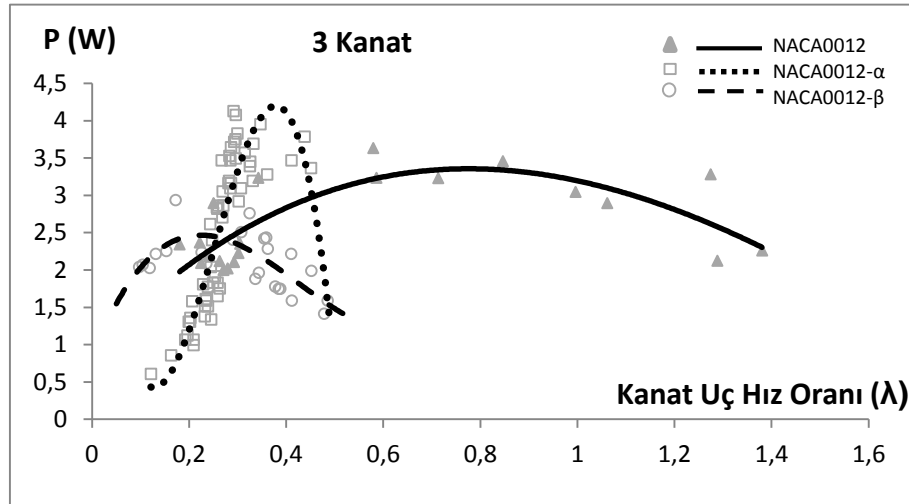
NACA0012- $\beta$  profilinin güç değerleri Şekil 4.6.'da verilmiştir. Kanat sayısı parametre alınarak yapılan deneylerde 3, 4 ve 5 kanat için en yüksek güç değerleri sırasıyla 0,29, 0,82 ve 0,98 kanat uç hız oranlarında elde edilmiştir. NACA0012- $\beta$  profile, NACA0012 kanat profiline benzer şekilde en yüksek güç 4 kanatlı türbinden elde edilmiştir.



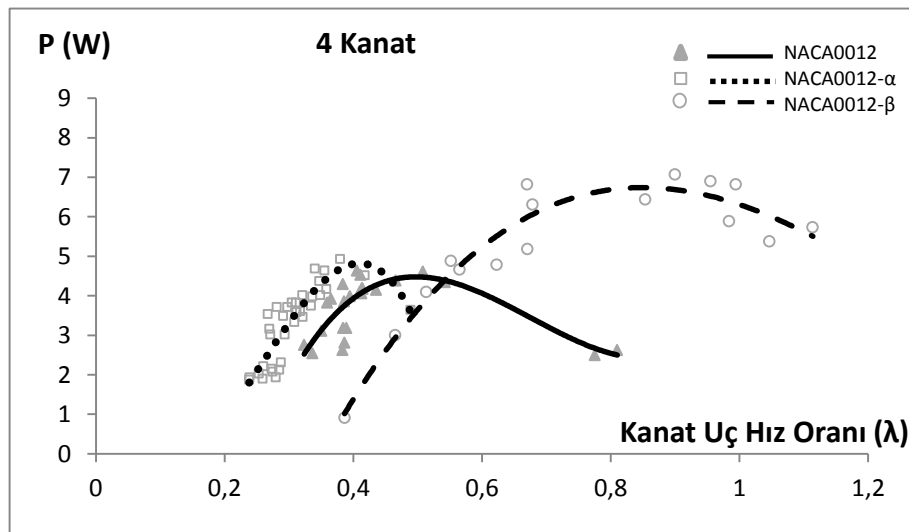
Şekil 4.6. NACA0012- $\beta$  profilinden elde edilen gücün kanat uç hız oranına göre değişimi

Bütün kanat profilleri aynı kanat sayılarında karşılaştırıldığında kanat uç hız oranına bağlı olarak en yüksek güç değerleri 3 kanatlı çark için Şekil 4.7.'de, 4 kanatlı çark

için Şekil 4.8.'de ve 5 kanatlı çark için de Şekil 4.9.'da gösterilmektedir. 3 kanatlı testlerde en yüksek güç değeri 4.20W ile NACA0012- $\alpha$  profilini kullanan türbinden elde edilirken, 4 kanatlı testlerde NACA0012- $\beta$  profilini kullanan türbinden 6.80 W değerleri elde edilmiştir. 5 Kanatlı testlerde hem NACA0012- $\alpha$  hem de NACA0012- $\beta$  profillerini kullanan türbinlerden yaklaşık 5.10 W güç elde edilirken, NACA0012- $\alpha$  ile maksimum güç değerine nispeten daha düşük kanat uç hız oranlarında ulaşılmıştır. Nümerik optimizasyon sonucu türetilen kanat profili NACA0012- $\beta$ 'yi kullanan kanatlarla diğer profilleri kullanan kanatlar karşılaştırıldığından ciddi bir performans artışı sağlamıştır.

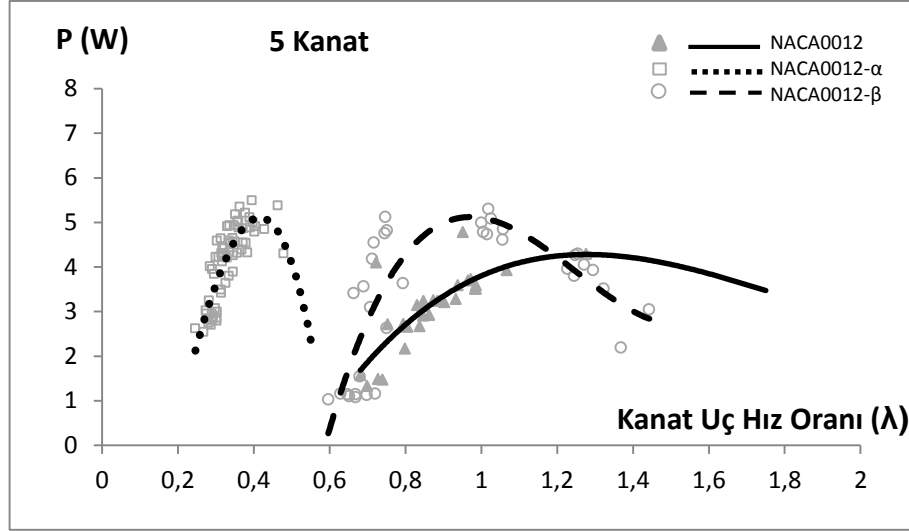


Şekil 4.7. Üç kanatlı türbinde kanat uç hız oranına bağlı olarak güç değerinin değişimi



Şekil 4.8. Dört kanatlı türbinde kanat uç hız oranına bağlı olarak güç değerinin değişimi



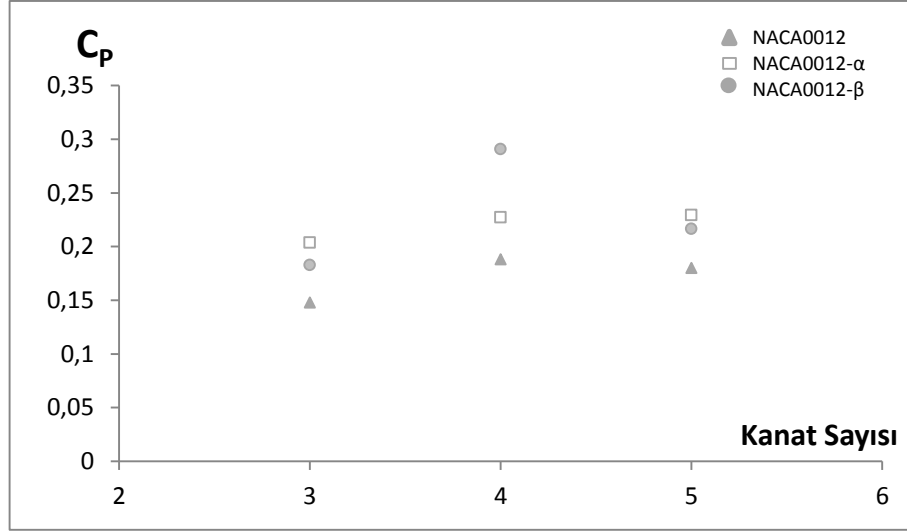


Şekil 4.9. Beş kanatlı türbinde kanat uç hız oranına bağlı olarak güç değerinin değişimi

Excel yardımıyla oluşturulan grafiklerin her birine kanat uç hız oranına bağlı olarak anlık ölçülen veriler ile uyumlu ayrı ayrı denklemler atanmıştır. Ve noktasal değerlere yakınsaması Tablo 4.3.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Kanat Uç Hız Oranına Bağlı Deneysel Verilerin Denklemleri

Profil/Kanat Sayısı	Denklem	R <sup>2</sup>
NACA0012/3 Kanat	$P = 0,8484\lambda^3 - 5,3635\lambda^2 + 6,7893\lambda + 0,9208$	$R^2 = 0,6066$
NACA0012/4 Kanat	$P = 91,686\lambda^3 - 185,63\lambda^2 + 116,6\lambda - 18,873$	$R^2 = 0,6385$
NACA0012/5 Kanat	$P = 3,4224\lambda^3 - 18,37\lambda^2 + 30,182\lambda - 11,431$	$R^2 = 0,6166$
NACA0012-α/3 Kanat	$P = -475\lambda^3 + 360,38\lambda^2 - 68,627\lambda + 4,3016$	$R^2 = 0,8077$
NACA0012-α/4 Kanat	$P = -366,64\lambda^3 + 285,21\lambda^2 - 49,063\lambda + 2,2598$	$R^2 = 0,7646$
NACA0012-α/5 Kanat	$P = -158,51\lambda^3 + 67,425\lambda^2 + 26,089\lambda - 6,0028$	$R^2 = 0,7132$
NACA0012-β/3 Kanat	$P = 39,311\lambda^3 - 50,1\lambda^2 + 16,502\lambda + 0,8428$	$R^2 = 0,4683$
NACA0012-β/4 Kanat	$P = 12,158\lambda^3 - 51,978\lambda^2 + 62,013\lambda - 15,885$	$R^2 = 0,9138$
NACA0012-β/5 Kanat	$P = 28,694\lambda^3 - 107,41\lambda^2 + 127,44\lambda - 43,624$	$R^2 = 0,6619$



Şekil 4.10. Kanat sayısına bağlı olarak güç katsayısındaki değişim

Kanat sayısına bağlı olarak güç katsayısındaki ( $C_p$ ) değişim Şekil 4.10.'da gösterilmektedir. Referans profilden %19'lük bir güç katsayısı elde edildiği şartlarda NACA0012- $\alpha$  ve NACA0012- $\beta$  elde edilen güç katsayısı sırasıyla %23 ve %29'dur. Bu da parametrik optimizasyonla %20'lik, nümerik optimizasyonla %54'lik bir güç artışı sağladığını göstermektedir.

### 4.3. Belirsizlik Analizi

Deneysel bulguların hata analizi için hassas bir yöntem olan Kline ve McClintock tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntemde ölçülmesi gereken büyüklük  $R$  ve bu büyüklüğe etki eden  $n$  adet bağımsız değişken ise  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  olsun. Bu durumda,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

Yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları  $W_1, W_2, \dots, W_n$ , olmak üzere ve  $R$  büyüklüğünün hata oranı  $W_R$  ise,

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

şeklinde verilmektedir[24]. Bir parametrenin değeri ölçülmesinde, sabit hatalar, rastgele hatalar ve imalat hataları nedeniyle ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata hesabı (Denklem 4.1) ve Denklem (4.2) ile hesaplanabilir. Bu hata tiplerinin birbirinden ayrılması zor olmasından dolayı araç gereçlerin imalatından kaynaklı bir hata olmadığı durum düşünülerek elde edilen hata değeri sabit hatalar ve rastgele hata değerlerini kapsamaktadır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçü aletlerinin hata oranlarını sırasıyla verecek olursak Rüzgar ölçümü için kullanılan Lutron AM-4206 Anemometre için  $\pm(2\%+0,2\text{m/s})$ , devir ölçümü için kullanılan UNI-T UT 372 Takometre için  $\pm(0,04\%+2)$ , DC akım ve voltaj için 2 ayrı cihaz kullanılan Brymen BM525s Multimetre için  $(0,2\%+4d)$  olarak hata oranları tanımlanmıştır. (Denklem 4.3)'te gösterilen Güç(P) ölçümü için akım ve voltaj değerlerinden oluşan  $W_P$  hata oranı (Denklem 4.4)'te ve (Denklem 4.5)'te gösterilen Kanat Uç Hız Oranı( $\lambda$ ) için türbin yarı çapı, açısız hız ve rüzgar hız ölçümlerinden oluşan  $W_\lambda$  hata oranı (Denklem 4.6)'da olduğu gibi hesaplanır.

$$P = I.V \quad (4.3)$$

$$W_P = \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial I} W_I \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial V} W_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{\omega.R}{V} \quad (4.5)$$

$$W_\lambda = \left[ \left( \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} W_\omega \right)^2 + \left( \frac{\partial \lambda}{\partial V} W_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

Deneysel ölçümlerin belirsizlik oranları yukarıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplandığında ortalama  $W_P$  ve  $W_\lambda$  için sırasıyla  $\pm 1,1\%$  ve  $\pm 6,9\%$  olarak bulunmaktadır.

#### 4.4. CO<sub>2</sub> Emisyonu ve Çevreye Etkileri

Deney düzeneği için oluşturulan rüzgar türbininden elde edilebilecek maksimum güç hesabı;

$$\dot{P}_{\infty} = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A * K_e \quad (4.7)$$

$$A = h * D \quad (4.8)$$

Olarak ifade edilir. (Denklem 4.7)'de havanın yoğunluğu  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), rüzgar hızı  $V$  (m/s), Türbinin ön bakış alanı  $A$  (m<sup>2</sup>) ve Enerji düzeltme katsayısı  $K_e$  olarak ifade edilmektedir. Bu ifadelerin değerlerini denklemde yerlerine yazılınca maksimum 7 m/s rüzgar hızına göre (Denklem 4.9)'teki değer türbine gelen rüzgarın taşıdığı gücü göstermektedir.

$$\dot{P}_{7m/s} = \frac{1}{2} * 1,225 * 7^3 * 0,11676 * 1,06 = 26,002 \text{ W} \quad (4.9)$$

olarak hesaplanabilmektedir. Şekil 4.10.'da gösterilen grafiğin verileri ile 4 kanatlı NACA0012- $\beta$  profil için %29'luk güç katsayısı değerini kullanarak,

$$\dot{P} = 26,002 * 0,29 = 7,541 \text{ W} \quad (4.10)$$

(Denklem 4.10)'teki güç değeri elde edilir. Türbin bu çalışma şartlarında ortalama olarak günde 24 saat çalıştığı düşünülürse (Denklem 4.11);

$$\dot{P}_{elektrik,gün} = 24 \text{ h/gün} * 7,541 \text{ W} = 180,984 \text{ Wh/gün} \quad (4.11)$$

Yılda 360 gün öngörülen şartlarda rüzgar türbinin çalıştığı kabul edilirse, elde edilecek elektrik gücü de (Denklem 4.12)'daki gibi bulunabilir.

$$\dot{P}_{elektrik,yıl} = 360 \text{ gün/yıl} * 180,984 \text{ Wh/gün} = 65154,24 \text{ Wh/yıl} \quad (4.12)$$

$$\dot{P}_{elektrik,yil} = 65,154 \text{ kWh/yil}$$

(4.13)

Tablo 4.4. Türbinde Kanat Profillerine Göre Anlık Güç(W) Değerleri

	3 Kanat	4 Kanat	5 Kanat
NACA0012	3,84 W	4,89 W	4,68 W
NACA0012- $\alpha$	5,29 W	5,91 W	5,96 W
NACA0012- $\beta$	4,75 W	7,5 W	5,63 W

Tablo 4.4.'te gösterilen değerleri birer adet türbin kullanıldığında elde edebileceğimiz sonuçlar olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.5.'deki verilerde yıl boyunca ortalama olarak elde edebileceğimiz güç miktarlarını göstermektedir.

Tablo 4.5. Yıl boyunca Kanat Profillerine Göre Elde Edilebilecek Güç(W) Miktarları

	3 Kanat	4 Kanat	5 Kanat
NACA0012	33,178 kW/yıl	42,250 kW/yıl	40,435 kW/yıl
NACA0012- $\alpha$	45,706 kW/yıl	51,062 kW/yıl	51,494 kW/yıl
NACA0012- $\beta$	41,040 kW/yıl	65,154 kW/yıl	48,643 kW/yıl

Bu sonuçlardan yola çıkarak Sakarya Üniversitesinde Esentepe kampüsünde üzerinde yaklaşık 250 adet aydınlatma direği olduğu düşünüldüğünde ve bu aydınlatma direklerinin enerjilerini rüzgar türbinlerinden elde edebileceği düşünüldüğünde yıl boyunca ortalama olarak elde edilebilecek güç miktarlarını Tablo 4.6.'da görülebilir.

Tablo 4.6. 250 Adet Türbin Kullanılması Durumunda Yıl Boyunca Elde Edilecek Enerji Miktarı

	3 Kanat	4 Kanat	5 Kanat
NACA0012	8294,4 kW/yıl	10562,4 kW/yıl	10108,8 kW/yıl
NACA0012- $\alpha$	11426,4 kW/yıl	12765,6 kW/yıl	12873,6 kW/yıl
NACA0012- $\beta$	10260 kW/yıl	16288,56 kW/yıl	12160,8 kW/yıl

Bu şartlar altında kanat profilleri üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda geleneksel kanat profillerinden olan NACA0012 kanat profili kullanıldığı durumda çevrimden yılda 10562,4 kW/yıl enerji elde edilebileceği, NACA0012- $\alpha$

kanat profili kullanıldığında türbinden yılda yaklaşık 2203,2 kW/yıl daha fazla güç elde edilebilecektir. Çalışmada adjoint solver nümerik analiz çalışması sonucunda elde edilmiş olan NACA0012- $\beta$  kanat profili kullanıldığında ise yılda ortalama NACA0012 ve NACA0012- $\alpha$  kanat profillerine göre sırasıyla 5726,16 kW/yıl ve 3522,96 kW/yıl daha fazla enerji elde edilebileceği görülebilmektedir. Bu şartları göz önüne alındığında en yüksek güç değerine ulaşılan NACA0012- $\beta$  profili ile 250 adet aydınlatma direğine yılda ortalama 9 saat çalışabilecek 20W gücünde led aydınlatma lambası için enerji ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele eriştiği söylenebilir.

#### 4.4.1. Maliyet hesabı

NACA0012- $\beta$  kanat profili kullanılan rüzgar türbini ile yılda üretilen enerji miktarı hesaplandığında, eğer şebekeden alınan enerji ile karşılansaydı, Ocak 2019 tarihi itibarıyla tek zamanlı enerji bedeli (0,279098 TL) ve dağıtım bedeli (0,154089 TL) üzerinden hesaplandığında 1 kWh enerjinin meskenlerde kullanılmasının bedeli fon, pay ve vergiler dahil ortalama (0,537508 TL) olacaktır [24].

$$Tasarruf = 65,15 \frac{kWh}{yıl} * 0,537508 \frac{TL}{kWh} = 35,02 \frac{TL}{yıl} \quad (4.14)$$

Bu hesaplardan görüldüğü gibi (Denklem 4.14) de bir adet türbinin yılda üreteceği enerji miktarını ortalama elektrik bedeli ile çarpımından tespit edilen miktar, elektrik enerjisi rüzgar türbininden üretildiği için elektrik faturası olarak ödenmeyecektir.

20W'lık lambaya gerekli gücü sağlayacak güç sistemi (Dikey eksenli rüzgar türbini ve depolama birimi) için gerekli bileşenler ve satıcı firmalardan alınan güncel maliyet bilgileri Tablo 4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Güç Sistemi Bileşenleri ve Maliyetleri (Şubat 2019 1\$=5,30TL)

Ürün	DC Motor (12V 10W )	Akü (6V 10Ah)	Filament (1200gr)	Bağlantı Elemanları
Birim Fiyat+KDV	11\$	17\$	180Tl	10TL

Tablo 4.7.'deki maliyet bilgileri ışığında bir güç sisteminin 338,40 TL'ye mal olacağı ve türbinden üretilen güç ile elektrik faturasından yılda 35,02 TL tasarruf edilebileceğinden hareketle güç sisteminin amortisman süresi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\text{Amortisman} = \frac{338,40 \text{ TL}}{35,02 \text{ TL/yıl}} = 9,663 \text{ yıl} \quad (4.15)$$

(Denklem 4.15)'da amortisman süresinin 9 yıl 7 ay 28 gün olduğu tespit edilmiştir. Ancak, elektrik kullanım bedeli birim fiyatı dolar endeksinin giderek artacağı öngörüsünden amortisman süresinin hesaplanandan daha kısa süre olacağı söylenebilir. Eğer optimizasyon çalışması yapılmamış ve türbinde NACA0012 profili kullanılmış olsaydı amortisman süresi 5 yıl 2 ay 26 gün artarak toplamda 14 yıl 10 ay 24 gün olacaktı.

#### 4.4.2. Emisyon hesabı

Alt ısı değeri 10025000 kcal (Dönüşüm faktörü 41,97 Tj/kt) olan Fuel-Oil %38 verim ile çalışan bir termik santralde yakılırsa, 1 kg Fuel-Oil'den yaklaşık olarak elde edilebilecek elektrik enerjisi (Denklem 4.17)'de olduğu gibi hesaplanabilir.

$$41,97 * 10^{12} \frac{1kWh}{3,6*10^6 kt} = 11658333,33 \frac{Wh}{t} = 11,658 kWh/kg \quad (4.16)$$

$$\dot{P}_{elektrik} = 0,38 * 11,658 kWh/kg = 4,43 kWh/kg \quad (4.17)$$

Rüzgar türbinini yıllık elektrik enerjisi üretimi ve 1 kg Fuel-Oil ile üretilecek elektrik enerjisi oranından, yılda tasarruf edilebilecek Fuel-Oil miktarı bulunabilir. (Denklem 4.18)'de 4 kanatlı NACA0012-β kanat profil kullanılmış bir adet türbin ile yılda ortalama üretilen enerji miktarını Fuel-Oil'den elde edilebilecek enerji miktarına bölündüğünde tasarruf edebileceğimiz yakıt miktarını hesaplamaya çalışılmıştır.

$$Yakıt_T = \frac{65,15 \text{ kWh/yıl}}{4,43 \text{ kWh/kg}} = 14,71 \text{ kg/yıl} \quad (4.18)$$

Tablo 4.8. Kanat Profiline Göre Yılda Tasarruf Edilebilecek Fuel-Oil Yakıtı Miktarları

	3 Kanat	4 Kanat	5 Kanat
NACA0012	7,49 kg/yıl	9,54 kg/yıl	9,13 kg/yıl
NACA0012- $\alpha$	10,32 kg/yıl	11,53 kg/yıl	11,62 kg/yıl
NACA0012- $\beta$	9,26 kg/yıl	14,71 kg/yıl	10,98 kg/yıl

Yakıt miktarını her kanat profili için ayrı ayrı hesaplandığında yılda tasarruf edilebilecek miktarları Tablo 4.8.'da görülebilmektedir.

Fuel-Oil'in CO<sub>2</sub> emisyonunu hesaplamak için çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte [25], genel olarak (Denklem 4.19)'de verilmiş olan bağıntı kullanılabilir.

$$Yakıt * Isıl Değer * Karbon İçeriği * Oksidasyon Faktörü * \frac{MW_{CO_2}}{MW_C} * C \quad (4.19)$$

(Denklem 4.16)'de elde edilen yakıt miktarını dönüşüm faktörü (DF, Isıl Değer:41,97 TJ/kt) ile çarpımından Enerji Tüketim (ET) değerine (Denklem 4.20)'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$(ET)_T = Yakıt_T * DF = 14,71 \frac{kg}{yıl} * 10^{-6} \frac{kt}{kg} * 41,97 \frac{Tj}{kt} = 6,174x10^{-4} \frac{Tj}{yıl} \quad (4.20)$$

Yakıtın Karbon İçeriği(Kİ) (Denklem 4.21)'da Fuel-Oil'in Karbon Emisyon Faktörü (KEF, 21,1 tC/TJ) ile Enerji Tüketim(ET) değerinden hesaplanır.

$$\begin{aligned} (Kİ)_T &= (ET)_T * (KEF) = 6,174x10^{-4} \frac{Tj}{yıl} * 21,1 \frac{tC}{Tj} = 0,013 \text{ tC/yıl} \\ &= 0,013 * 10^{-3} \text{ GgC/yıl} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Fuel-Oil'in Karbon Oksitleme Oranı (KOO) 0,99 alınırsa, Karbon Emisyonu ve Karbondioksit Emisyonu (Denklem 4.22) ve (Denklem 4.23)'daki gibi bulunabilir.

$$Emisyon_{C,T} = (Kİ)_T * (KOO)$$



$$= 0,013 * 10^{-3} \frac{GgC}{yil} * 0,99 = 0,01287 * 10^{-3} GgC/yil \quad (4.22)$$

$$Emisyon_{CO_2,T} = Emisyon_{C,T} * \frac{MW_{CO_2}}{MW_C} = 0,01287 * 10^{-3} \frac{GgC}{yil} * \frac{44}{12} \frac{GgCO_2}{GgC}$$

(4.23)

$$= 0,04719 * 10^{-3} GgCO_2/yil$$

$$Emisyon_{CO_2} = 0,04719 tCO_2/yil = 47,19 kgCO_2/yil \quad (4.24)$$

(Denklem 4.24)'den de anlaşılacağı üzere tasarlanan rüzgar türbini kullanılırsa sokak aydınlatması için, 1 adet lamba başına yılda 47,19 kg CO<sub>2</sub> emisyonu azaltılabilir. 250 lamba için bu durum yaklaşık olarak yılda 11,8 tCO<sub>2</sub> emisyon azatılımı olacaktır.

Tablo 4.9. Yılda Kanat Profiline Göre Azaltılması Öngörülen Karbondioksit Emisyon Değerleri

	3 Kanat	4 Kanat	5 Kanat
NACA0012	24,07 kgCO <sub>2</sub> /yıl	30,66 kgCO <sub>2</sub> /yıl	29,34 kgCO <sub>2</sub> /yıl
NACA0012-α	33,17 kgCO <sub>2</sub> /yıl	37,05 kgCO <sub>2</sub> /yıl	37,37 kgCO <sub>2</sub> /yıl
NACA0012-β	29,78 kgCO <sub>2</sub> /yıl	47,19 kgCO <sub>2</sub> /yıl	35,30 kgCO <sub>2</sub> /yıl

Tablo 4.9.'de görüleceği gibi 4 kanatlı NACA0012 profili kullanılan bir adet türbin yerine parametrik analiz sonucu geliştirilen NACA0012-α kanat profili kullanılırsa 6,4 kg daha fazla emisyon azatılımı yapılabilineceği, eğer NACA0012-β kanat profili kullanıldığı durumda 16,62 kg daha fazla emisyon azatılımı gerçekleştirilebileceği öngörülebilmektedir.

Avrupa Emisyon Ticaret Sistemine veya çeşitli enerji raporlarında belirtildiğine göre ülkelerin Kyoto sözleşmeleri gereği CO<sub>2</sub> salınımlarını azaltmak için verdikleri tahattütler, belirli yıl periyotlarında yerine getirmeleri gerekmektedir. Bu nedenle taraf olunan sözleşme gereği ülkelerin karbon (C) salınım değerlerinde azaltıcı önlemler almaları gerekmektedir. Bu şartlara uyulmadığı takdirde ülkelerin gelişmişlik düzeylerine göre kısa, orta ve uzun vadede para yaptırımları söz konusudur [26]. Ortalama olarak orta vadede 2019 yılı için 1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu azaltmanın fiyatı yaklaşık olarak 15 € olduğunu düşünüldüğünde 4 kanatlı NACA0012-β profil kullanılan bir adet türbin kullanıldığında ortalama CO<sub>2</sub> emisyon

salınım cezası (Denklem 4.25)ve (Denklem 4.26)'de olduğu gibi hesaplanabilir(2019 yılı Şubat ayı 1€ karşılığı 6 TL).

$$Ceza = 0,04719 \frac{tCO_2}{yil} * 15 \frac{Euro}{tCO_2} = 0,70785 Euro/yil \quad (4.25)$$

$$= 0,70785 \frac{Euro}{yil} * 6 \frac{Tl}{yil} = 4,25 TL/yil \quad (4.26)$$

Bu hesaplama göre ihtiyaç olan elektrik enerjisini termik santralden almak yerine çalışmada kullanılan kanat profilleri ile oluşturulan 250 adet türbinden üretilmesi durumunda CO<sub>2</sub> emisyonu azaltmanın bedeli 1062,50 TL olacaktır.

Enerji Enstitüsü'nün yayınladığı Türkiye kurulu gücü istatistiklerine göre 87139 MW toplam kurulu gücün 294 MW kadarını Fuel-Oil kullanan termik santraller oluşturmaktadır. Yakıt olarak Fuel-Oil kullanan termik santraller yerine rüzgar enerjisi santralleri kullanılsaydı, 294 MW kurulu güç için,

$$Emisyon = 0,04719 t * \frac{294 MW}{3,24 * 10^{-3} MW} = 4282 t \quad (4.27)$$

(Denklem 4.27)'deki CO<sub>2</sub> emisyonunda azalma sağlanabilirdi. Bu emisyon azaltımının Avrupa Emisyon Ticaret Sisteminde karşılığı yaklaşık olarak olarak 64230 € olarak hesaplanmaktadır.

## BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada HAD analizleri kullanılarak NACA0012 kanat profili için parametrik ve nümerik optimizasyon yapılmıştır. Kaldırma katsayısı, direnç katsayısı ve  $C_L/C_D$  oranı parametre alınarak yeni profiller türetilmiştir. H tipi hibrit Darrieus rüzgar türbininde 3, 4, ve 5 kanatlı durum için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve kanat performansları test edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. NACA0012 profilinin 3.92 olan  $C_L/C_D$  oranı, parametrik optimizasyonla (NACA 0012- $\alpha$ ) 6.24'e, nümerik optimizasyonla (NACA 0012- $\beta$ ) 6,42'e çıkarılmıştır. Ancak,  $C_L/C_D$  oranındaki bu artışın rüzgar türbinindeki güç artışına yansması NACA 0012- $\alpha$  ve NACA 0012- $\beta$  profilleri için sırasıyla %20 ve %54 olmuştur. Bu durum, dikey eksenli rüzgar türbininden elde edilen güç değeri üzerinde, kanatların atacağı bir tur için  $C_L/C_D$  oranının hep aynı oranda etkili olmamasıyla açıklanabilir. Oysa ki, profillerin türetildiği optimizasyon çalışmalarındaki HAD analizlerinde kanat hareketli olmadığı için odak noktası sadece  $C_L/C_D$  oranı olmuştur.
2. Nümerik optimizasyonla türetilen kanat profili (NACA 0012- $\beta$ ) parametrik optimizasyonla türetilen kanat profiline (NACA 0012- $\alpha$ ) göre %27 daha yüksek güç katsayısı değerine ulaşmıştır. Bunun nedenlerinden bir tanesi profilin sağladığı düşük direnç yüksek kaldırma katsayısıyken, başka bir tanesi ise, kanadın arka tarafındaki kuyruğun türbin yarım tur attıktan sonra havayı arkadan aldığı zaman sağladığı itmedir.
3. Kanat sayısının artması tork üzerinde bir artışa neden olmakla birlikte, türbin içerisinden geçen havanın akışını da etkilediği için, gerçekleştirilen

deneylerde kritik bir kanat kayısından sonra güçte düşme tespit edilmiştir. NACA 0012 ve NACA 0012- $\beta$  profilleri için 4 kanatlı türbinde en yüksek güç elde edilirken, NACA 0012- $\alpha$  profili için 5 kanatlı türbinde en yüksek güç değeri elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Dursun, B., Dikey Eksenli Bir Darrieus Türbin Dizayn Edilmesi Ve Kanat Üretimi, Gebze Yüksek Tek. Enst, Müh. ve Fen Bil. Enst. Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [2] Atlıhan, A. B., Rüzgar Enerjisi ve Darrieus Rüzgar Çarklarının İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Denizli, 2006.
- [3] [www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar\\_enerjisi.aspx](http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx), Erişim Tarihi: 12.11.2018.
- [4] BP Statistical Review of World Energy, British Petroleum (BP), June 2018, London, UK.
- [5] Şenel, M. C., KOÇ, E., Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enejisi Durumu Genel Değerlendirilmesi, Mühendis ve Makina, Cilt 56, Sayı 663, s. 46-56, 2015.
- [6] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,, 2016 Faaliyet Raporu, 2016.
- [7] Erişen, A., Bakırcı, M., NACA 0012 VE NACA 4412 Kanat Kesitlerinin Yeniden Tasarlanarak Had ile Analiz Edilmesi, Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, s. 50-82, 2014.
- [8] Önen, B., Çınar, A., Düz flaplı pozitif kambura sahip NACA 4412 kanat kesitinin aerodinamik performansının bilgisayar destekli analizi, Ulusal Tasarım imalat ve Analiz Kongresi, 11-12 Kasım 2010, Balıkesir.
- [9] Bekka, N., Bessaih, R., Sellam, M. and Chpoun, A., Numerical Study of Heat Transfer around the Small Scale Airfoil Using Various Turbulence Models, Num. Heat Transfer, Part A: Applications, 56(12), 946-969, 2010.
- [10] Güleren, M. K., Demir, S., Rüzgar Türbinleri İçin Düşük Hücüm Açılarında Farklı Kanat Profillerinin Performans Analizi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 31, 51-59, 2011.
- [11] Yılmaz, İ., Çam, Ö., Taştan, M., Karcı, A., Farklı Rüzgar Türbin Kanat Profillerinin Aerodinamik Performansının Deneysel İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 19/4, 577-584, 2016.

- [12] Yao, J., Yuan, W., Wang, J., Xie, J., Zhou, H., Peng, M., Sun, Y., Numerical simulation of aerodynamic performance for two-dimensional wind turbine airfoils, *International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation*, *Procedia Engineering* 31; 80-86, 2012.
- [13] Şahin, İ., Acır, A., Numerical and Experimental Investigations of Lift and Drag Performances of NACA 0015 Wind Turbine Airfoil, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 3, No. 1, February, 22-25, 2015.
- [14] Şamdan, O., Darrieus Tipi Rüzgar Türbini Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2016, İzmir.
- [15] Sabaeifard, P., Razzaghii, H., Forouzandeh, A., Determination of Vertical Axis Wind Turbines Optimal Configuration, *International Conference on Future Environment and Energy Singapore*, 2012.
- [16] Gömeç, F. S., Performance Prediction of Darrieus Type Vertical Axis Wind Turbines Using Numerical Simulations,, Master of Science in Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, 2014, Ankara.
- [17] Castelli, M. R., Betta, S. D., Benini, E., Effect of Blade number on a Straight Blade Vertical Axis Darrieus Wind Turbine, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechanical and Manufacturing Engineering* Vol:6, No:1, 2012.
- [18] Lee, Y. T., Hee, C. L., Power performance Improvement of 500W Vertical Axis Wind Turbine with Salient Design Parameters, *World Academy of Science, Engineering Technology*, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol:10, No:1, 2016.
- [19] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, *Güven Bilimsel*, s. 565, 2008, İzmir.
- [20] Schramm, M., Stoevesant; B., Peinke; J., Lift Optimization of Airfoils Using the Adjoint Approach., *European Wind Energy Association (EWEA Annual Conference and Exhibition)*, 2015, Paris.
- [21] Schramm, M., Stoevesant, B., Peinke, J., Optimization of Airfoils Using the Adjoint Approach and the Influence of Adjoint Turbulence Viscosity,, *Computation Journal*, 2018.
- [22] Shrivastava, K., Jainb, S., Bajpaic, L., Adjoint Based Optimization of NACA 4412 Aerfoil Using Ansys Fluent, *International Journal for Scientific Research and Development* Vol:4, Issue 07.

- [23] Gramanzini, J. R., Adjoint Based Airfoil Shape Optimization in Transonic Flow, Missouri University of Science and Technology, A Thesis of Master of Science in Aerospace Engineering, 2015, Missouri.
- [24] Bilen, K., Dar Kanallarda Yoğuşma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 2007.
- [25] [www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari](http://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari), No:8358, Erişim Tarihi: 10.02.2019.
- [26] Pekin, M. A., Ulaştırma Sektöründen Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2006.
- [27] Carbon Dioxide Price Forecast, Synapse Energy Economics, Inc. 2015, Massachusetts.

## ÖZGEÇMİŞ

Erdem AKMAN 29.10.1989 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini İstanbul'un Fatih ilçesinde tamamladı. 2006 yılında Fatih Vatan Lisesinden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makina ve İmalat Mühendisliği bölümünü 2012 yılında bitirdi. İmalat sanayinde çeşitli firmalarda Makina mühendisliği görevlerinde bulundu. Son olarak 2018 yılında Teknopark İstanbul Kuluçka Merkezinde bir Arge projesi ile girişimcilik denemesinde bulundu. Nisan 2019 yılından itibaren de Utku Otomasyon Ltd. Şti.'de Arge Mühendisi olarak görev almaya başlamıştır.