



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**RÜZGAR TÜRBİNİ KANADINDA KAMBUR BALİNA KANAT  
YAPISI UYGULANMASI VE OPTİMİZASYONU**

**Hazırlayan  
Tuna Murat BODUR**

**Danışman  
Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Eylül 2022  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**RÜZGAR TÜRBİNİ KANADINDA KAMBUR BALİNA  
KANAT YAPISI UYGULANMASI VE OPTİMİZASYONU**

**Hazırlayan  
Tuna Murat BODUR**

**Danışman  
Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Eylül 2022  
KAYSERİ**

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı Soyadı : Tuna Murat BODUR

İmza :

**“Rüzgar Türbin Kanadında Kambur Balina Kanat Yapısı Uygulaması ve Optimizasyonu”** adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Danışman

Tuna Murat BODUR

Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı**

**Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde, planlanması, yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ hocama çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca gerek donanım gerek fikir alışveriői ve gerek yazılım konusundaki katkılarından dolayı MSG (Multi Science Gate) Teknoloji Ltd. Őti ve WEAR (Rüzgar Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma) Ekiplerine teşekkür ederim.

Tez boyunca sürekli fikir alışverişinde bulunduğumuz, hayatımın her adımında yol göstericim olan Abim Dr. Tech. Osman BODUR' a teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tuna Murat BODUR

Kayseri, Eylül 2022

# RÜZGAR TÜRBİNİ KANADINDA KAMBUR BALINA KANAT YAPISI UYGULAMASI VE OPTİMİZASYONU

**Tuna Murat BODUR**

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi, Eylül 2022**

**Danışman: Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ**

## ÖZET

Rüzgar türbin kanatları ve insansız hava araçları üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla kanat modellerindeki değişimlere ilgi artmaya devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, NREL Faz II kanat modeli üzerine kambur balina yüzgeç yapısına benzer girinti ve çıkıntıların uygulanmasıyla elde edilen farklı modellerin verim araştırılması yapılmıştır. Sayısal çalışmalar öncelikle Referans Kanat ve 30 ayrı farklı model olmak üzere toplam 31 farklı modele uygulanmıştır. Sayısal analizler ve görüntülemeler Cradle yazılımının SC-Flow ürününde yapılmıştır ve modellerin analizleri için türbülans modeli olarak  $k-k_L-w$  geçiş modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçları neticesinde kaldırma katsayısı ( $C_L$ ), sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) ve bunlara bağlı aerodinamik performans katsayıları hesaplanmıştır. Oluşturulan 30 adet modifiyeli modelden, Model-29'un performans katsayısının (L/D) referans kanattan yaklaşık %22 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Buna bağlı, Referans Kanat ve Model-29'un döner kanat performansları 71,98 rpm dönüş hızında ele alınmıştır. Döner kanat performanslarına göre Model-29'un performans katsayısında yaklaşık %74'lük bir artış olduğu görülmüştür. Bu model ile art iz bölgesindeki türbülanslı bölgenin hacminin küçüldüğü ve türbin ardında etkisinin referans kanada göre daha küçük olduğu görülmüştür. Performans katsayılarına etkileyen kanat dizayn parametreleri istatistik yöntemlerle hesaplanmış, girinti ve çıkıntının sayısının artması ve yerleşim yerinin performansı etkileyen en önemli parametreler olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar Türbin Kanadı, Kambur Balina Yüzgeçleri, Akış Analizi, Tüberkül, NREL Faz II

# APPLICATION AND OPTIMIZATION OF HUMPBACK WHALE BLADES IN WIND TURBINE BLADES

**Tuna Murat BODUR**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**M.Sc. Thesis, September 2022**

**Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ**

## ABSTRACT

With the rise in studies on wind turbine blades and unmanned aerial vehicles, interest in changes in wing models continues to increase. In this thesis study, the efficiency of different models obtained by applying indentations and protrusions similar to the humpback whale fin structure on the NREL Phase II blade model was investigated. Numerical studies were applied to a total of 31 different models, primarily on the Reference blade and 30 different models. Numerical analyses and imaging were performed in the ScFLOW product of Cradle software and the  $k-k_L-w$  transition model was used as the turbulence model for the analysis of the models. As a result of the analysis results, lift coefficient ( $C_L$ ), drag coefficient ( $C_D$ ) and related aerodynamic performance coefficients were calculated. From the 30 modified models created, it was observed that the performance coefficient ( $L/D$ ) of the Model-29 is approximately 22% higher than that of the reference blade. Accordingly, the rotary blade performances of the Reference blade and the Model-29 are discussed at a rotational speed of 71.98 rpm. According to the rotary blade performances, there was an increase of about 74% in the performance coefficient of the Model-29. With this model, it has been seen that the volume of the turbulent region in the after-track region is reduced and the effect behind the turbine is smaller than that of the reference blade. The blade design parameters affecting the performance coefficients were calculated by statistical methods, and it was found that the increase in the number of indentations and protrusions and the placement location are the most important parameters affecting the performance.

**Keywords:** Wind Turbine Blade, Humpack Whale Fin, CFD Analysis, Tubercules, NREL Phase II

## İÇİNDEKİLER

### RÜZGAR TÜRBİNİ KANADINDA KAMBUR BALİNA KANAT YAPISI UYGULAMASI VE OPTİMİZASYONU

#### Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI .....	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET .....	vi
ABSTRACT.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xiii
GİRİŞ.....	1

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİ VE LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Giriş.....	5
1.2. Literatür Çalışması.....	11

## 2. BÖLÜM

### AMAÇ VE KAPSAM

2.1 Amaç ve Kapsam .....	24
2.1.1 S809 Kanat Profili.....	24
2.1.2 NREL FAZ II Türbin Kanat Modeli.....	25
2.1.3 Kambur Balina Kanat Model Uygulamaları .....	26
2.1.4 Referans Kanat ve Modifiyeli Kanat Dizaynları .....	26

### 3. BÖLÜM

#### SAYISAL VE İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

3.1 Sayısal Yöntemler .....	33
3.1.1 Cradle Yazılımı .....	33
3.1.1.1 ScFLOW Yazılımı.....	34
3.1.2 Türbülans Model Seçimi .....	35
3.1.3 LKE (Laminer Kinetik Enerji) k-kL- $\omega$ Türbülans Geçiş Modeli .....	35
3.2 İstatistik Analiz Metotları.....	36
3.2.1 Taguchi Metodu.....	36
3.2.2 Anova Analizi.....	37

### 4. BÖLÜM

#### SAYISAL YÖNTEM

4.1 Giriş .....	38
4.2 Akışkan Hacminin Belirlenmesi.....	38
4.3 Kanatların Konumlandırılması ve Ağ Örgüsü.....	40

### 5. BÖLÜM

#### SONUÇLAR

5.1 Giriş .....	45
5.2 Sayısal Analiz Sonuçları .....	45
5.3 İstatistiksel Analiz Sonuçları .....	68

### 6. BÖLÜM

#### TARTIŞMA VE ÖNERİLER

6.1. Giriş.....	72
6.2. Sonuç .....	73
6.3. Öneriler .....	75
Tezden Yapılan Uluslararası Bildiriler ve Hazırlanan Makaleler .....	76

<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>77</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>85</b>
<b>EK-1.....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>87</b>



## KISALTMALAR VE SİMGELER

<b><u>Sembol</u></b>	<b><u>Anlamı</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
Re	Reynolds sayısı	-
St	Strouhal sayısı	-
$C_L$	Kaldırma kuvvet katsayısı	-
$C_D$	Sürüklenme kuvvet katsayısı	-
$C_P$	Güç Katsayısı	-
$C_L / C_D$	Aerodinamik Performans Katsayısı- 1	-
$C_L^3 / C_D^2$	Aerodinamik Performans Katsayısı- 1	-
C	Veter (Chord) uzunluğu	m
$V_\infty$	Serbest akış hızı	m/s
$\rho$	Hava yoğunluğu	kg/m <sup>3</sup>
$\alpha$	Genlik	m
Z	Yerleşim	m
$\lambda$	Dalga Boyu	m
S	Span	m
AR	Açıklık Oranı (Aspect Ratio)	-
CFD	Computational Fluid Dynamics	-
HAD	Hesaplamaalı akışkanlar dinamiği	-
CTA	Constant Temperature Anemometer	-
$\alpha$	Hücum açısı	0
A	Alan	m <sup>2</sup>

**TABLULAR LİSTESİ**

Tablo 2.1. NREL Faz II kanat bilgileri .....	25
Tablo 2.2. Kambur Balina Kanat Model Durumları .....	26
Tablo 2.3. Model Detayları .....	26
Tablo 4.1. Analiz Kanat Konumlandırma Parametreleri .....	41
Tablo 4.2. Mesh Bağımsızlık Tablosu .....	42
Tablo 5.1. Sayısal Analiz Sonuçları .....	46
Tablo 5.2. Döner Kanat Analiz Sonuçları .....	52
Tablo 5.3. Sinyal Gürültü Oranları için Yanıt Tablosu.....	69



## ŞEKİLLER LİSTESİ

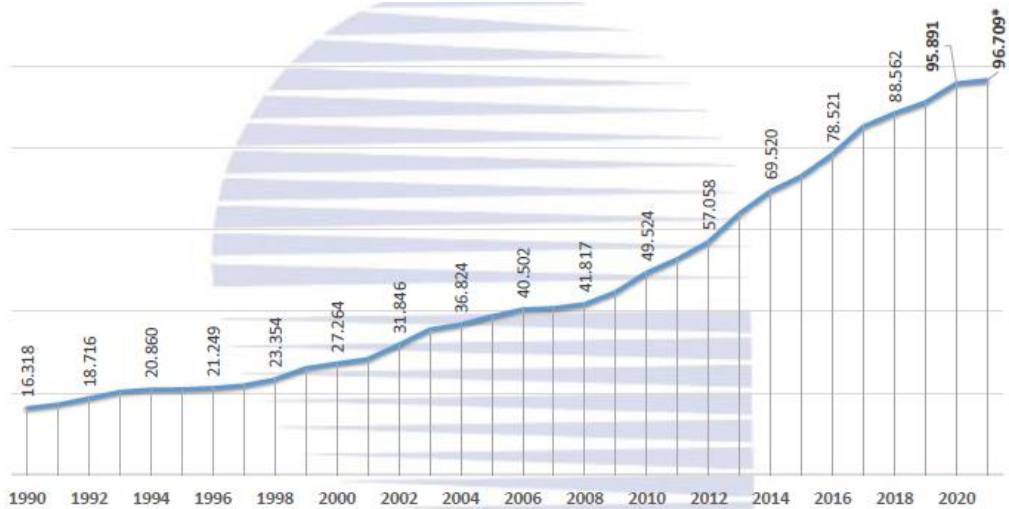
Şekil 1.1. Elektrik enerjisi kurulu güç yıllık değişimi (MW 1990- 2020) .....	1
Şekil 1.2. Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri kümülatif kurulum – 2020 .....	2
Şekil 1.3. Türkiye’deki işletmede olan RES’lerin türbin markalarına göre dağılımı- 2020 .....	2
Şekil 1.4. Levha üzerindeki akışın doğal türbülansa geçiş aşamaları .....	4
Şekil 1.5. Aerodinamik kuvvetler .....	5
Şekil 1.6. Kanat profil geometrisi .....	6
Şekil 1.7. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarına örnek. ....	8
Şekil 1.8. Rüzgâr türbini rotor kısmı ve akış alanı şematik gösterimi .....	10
Şekil 1.9. Pektoral yüzgeç ve kambur balinanın çıkıntılı yapısı .....	12
Şekil 1.10. Tüberküllü ve Tüberkülsüz kambur balina kanat modelleri için, kaldırma ve sürüklenme verileri .....	13
Şekil 1.11. Konfigürasyon temsilleri a)C1 b) C2 c)C3 d)C4 .....	14
Şekil 1.12. Modifiye pervane bıçak genlik ve dalga boyu .....	14
Şekil 1.13. Temel pervane (üst) ve modifiye pervane (alt). ....	14
Şekil 1.17. Rüzgar türbini bıçağının eğim açısının şematik diyagramı .....	15
Şekil 1.18. INER 25 kW rüzgar türbin kanadı hücum kenarı vortex jeneratörleri.....	15
Şekil 1.19. Tüberküllü bir kanadın 3D görünümü (a) ve plan görünümü (b) .....	16
Şekil 1.20. Farklı tüberkül modelleri.....	17
Şekil 1.21. Kullanılan tüberküllü kanat modelleri.....	19
Şekil 1.22. Tüberkül modelinin referans kanat ve değişken varyasyonlarına ait dizaynlar .....	20
Şekil 1.23. Ke ve Ark. analiz modellerinde kullandıkları genlik, dalga boyları ve yerlerinin örneklere göre değişimi.....	22
Şekil 2.1. S809 Kanat profili .....	24
Şekil 2.2. NREL Faz II Kanat modelinin yerleşim geometrik ölçüleri .....	25
Şekil 2.2. Modifiyeli kanat modelleri .....	32
Şekil 3.1. Taguchi metodu çalışma mekanizması.....	37
Şekil 4.1. Sabit (a) ve Döner Kanatlar (b) İçin Akış Hacimleri .....	39
Şekil 4.2. Kanat modelinin sistem içerisinde konumlandırılması ve aerodinamik yük çevirme parametreleri .....	40

Şekil 4.3. Mesh Bağımsızlığı Çalışması .....	42
Şekil 4.4. Kanat Modelleri Üzerinde Mesh Örgüsü ve Sınır Tabaka Kalınlığı (a-d) .....	43
Şekil 4.5. Döner Kanat Akış Hacmi ve Kanat Bölgesi Mesh Örgüsü .....	44
Şekil 5.1. Döner Kanat Simetri Toplam Basınç Dağılımı .....	53
Şekil 5.2. Döner Kanat, Kanat Merkez Bölümün Art İz Toplam Basınç Dağılımı .....	54
Şekil 5.3. Döner Kanat Art İz Bölgesi Toplam Basınç Dağılımı – 20 metre .....	56
Şekil 5.4. Döner Kanat Simetri Hız Dağılımı .....	57
Şekil 5.5. Döner Kanat – Kanat Merkez Bölümün Art İz Hız Dağılımı .....	58
Şekil 5.6. Döner Kanat Art İz Bölgesi Hız Dağılımı – 20 metre .....	60
Şekil 5.7. Döner Kanat – Kanat %75’lik Bölümün Art İz Toplam Basınç Dağılımı .....	61
Şekil 5.8. Döner Kanat – Kanat %75’lik Bölümün Art İz Hız Dağılımı .....	62
Şekil 5.9. Döner Kanat – Kanat %50’lik Bölümün Art İz Toplam Basınç Dağılımı .....	64
Şekil 5.10. Döner Kanat – Kanat %50’lik Bölümün Art İz Hız Dağılımı .....	65
Şekil 5.11. Döner Kanat – Kanat %25’lik Bölümün Art İz Toplam Basınç Dağılımı .....	67
Şekil 5.12. Döner Kanat – Kanat %25’lik Bölümün Art İz Hız Dağılımı .....	68
Şekil 5.13. Ana Etki Değerlendirme Tablosu .....	70
Şekil 5.14. Sistem Grup Parametre Analizi .....	71

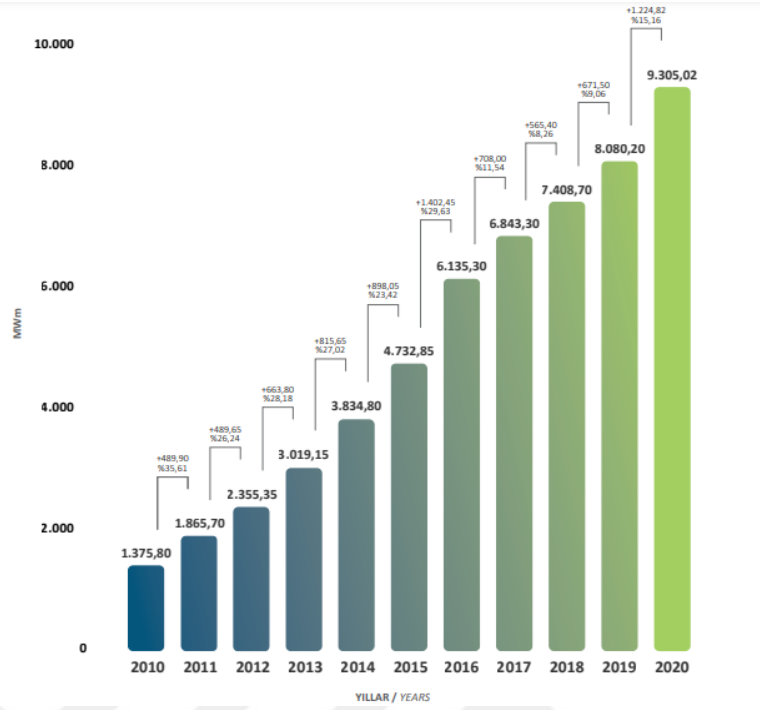
## GİRİŞ

Enerji arz ve taleplerin gün geçtikçe artması, beraberinde her gün gelişmeye devam eden rüzgâr türbin teknolojisini ortaya çıkartmaktadır. Rüzgâr enerjisinin temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir olması son yıllarda rekabetin, hızın ve gelişmişliğin bir göstergesi haline almıştır. Türkiye olarak, artan enerji talebine karşılık kurulan rüzgâr türbinleri yurtdışı menşeli ürünler olup, yurt dışından ithal edilmesi ya da Türkiye’de üretim yerleri bulunan yurtdışı firmalarının çözümlerini beklemek, türbin kurulum süre ve bütçesini her geçen gün artırmaktadır.

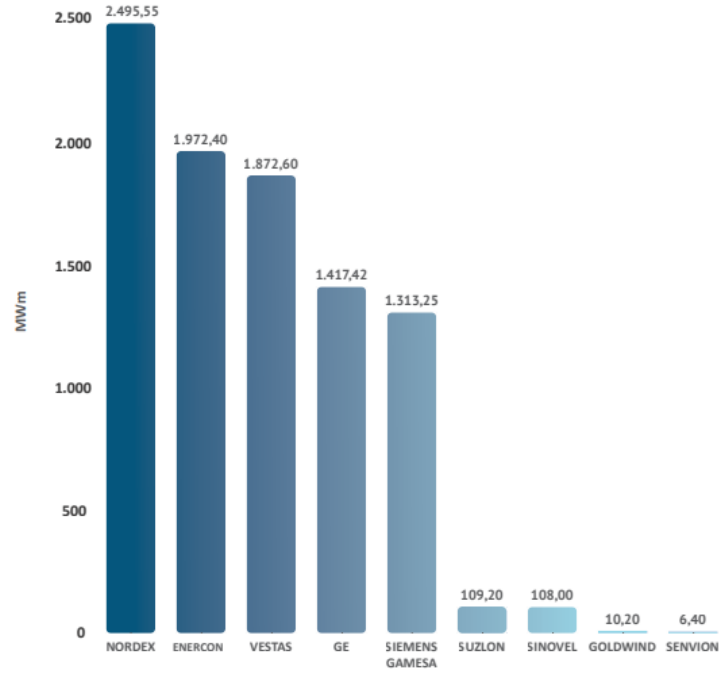
Türkiye içerisinde elektrik enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişiminin (Şekil 1.1) yanında Türkiye rüzgâr potansiyeli göz önünde bulundurduğumuzda (Şekil 1.2), ön fizibilite raporlarına göre kurulacak olan rüzgâr türbinlerinin de yurtdışından getirilip kullanılması (Şekil 1.3), bazen istenilen verimi elde edemememize sebep olabilmektedir. Bu ve bunun gibi sebepler göz önünde bulundurulduğunda artık Türkiye olarak ülkemize ait rüzgâr türbin tasarımları ve üretim metotları kritik hale gelmiştir.



Şekil 1.1. Elektrik enerjisi kurulu güç yıllık değişimi (MW 1990- 2020) [1]



Şekil 1.2. Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri kümülatif kurulum – 2020 [2]



Şekil 1.3. Türkiye’deki işletmede olan RES’ lerin türbin markalarına göre dağılımı-2020 [2]

Rüzgâr enerjisinden faydalanma verimini etkileyen en kritik parametrelerden birisi rüzgâr türbinin kanat yapısıdır. Kanat yapısının aerodinamik olarak tasarımının iyileştirilmesi doğrudan verimi etkilemektedir. Rüzgâr türbini kanatlarının hem yapısal hem de

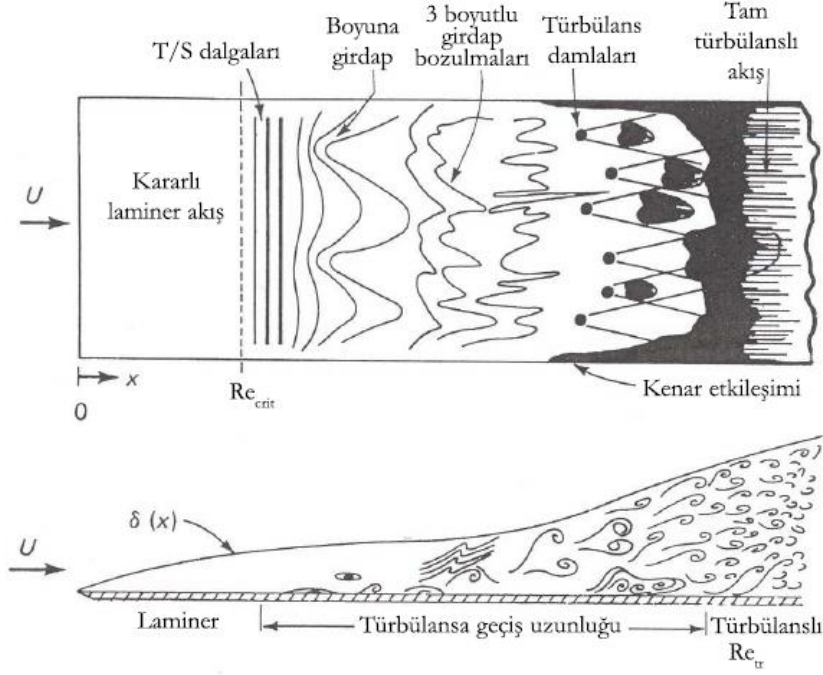
aerodinamik olarak senkronize olarak tasarlanması gerekmektedir [3]. Çalışma esnasında aerodinamik ve yapısal performansının iyi olabilmesi için malzeme ve üretim şeklinin en iyi şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu sebeple, kanat performansı üzerinde tasarım süreci oldukça etkilidir [4]. Bu yüzden kanadın aerodinamik ve yapısal performansında optimizasyon oldukça önemlidir.

Aerodinamik performansı arttırmak için, laminar ayrılma kabarcığının etkilerini yok etmek adına yeni yöntemler araştırılmaktadır. Bu yöntemlere Akış kontrolü denilir ve aktif ya da pasif metotlar olarak 2 sınıfa ayrılabilir. Akış kontrol yöntemleri kullanılarak, sürüklenme kuvveti azaltılabilir, kaldırma kuvveti artırılabilir, akış ayrılması geciktirilebilir, ses ve titreşim azaltılabilir [5].

Osborne Reynolds' un tanımladığı boyutsuz parametrelerden olan Reynolds sayısı, viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlere oranı olarak ifade edilmektedir. Reynolds sayısı akışkanlar mekaniğinin parametreleri arasındaki en önemli yapıtaşlarından birisidir. Akışın türbülanslı veya laminar olması Reynolds sayısına bağlı bir özelliktir. Kanat profillerinde Reynolds sayısı veter (chord) boyu  $C$ , serbest akış hızı  $V_{\infty}$  havanın yoğunluğu  $\rho$  ve havanın dinamik viskozitesi  $\mu$  ne bağlı denklem ile ifade edilip, denklem 1.1 de gösterildiği gibidir [6,7].

$$Re = \rho V_{\infty} C / \mu \quad (1.1)$$

Akış kontrolünü sağlamadan önce sınır tabaka, geçiş bölgesi, türbülanslı sınır tabaka gibi kavramlardan bahsetmek gerekmektedir. Sınır tabaka, viskoz kayma gerilmesi etkilerinin ortaya çıktığı ve akışkanın viskozitesinin olduğu bölgedir. Örnek olarak bir kanat profili üzerindeki sınır tabaka, Re sayısının değerine göre laminar sınır tabaka, türbülansa geçiş sınır tabaka ve türbülanslı sınır tabaka Şekilde 1.4 de gösterildiği gibi oluşmaktadır. Laminar sınır tabakada akış düzenli ve kararlı bir yapıya sahiptir. Re sayısının artması durumunda akış türbülansa geçiş sınır tabaka kısmını oluşturur ve akış giderek kararsız bir hal almaya başlar. Son olarak türbülanslı sınır tabaka ise akışın düzensiz ve son derece kararsız olduğu bölgedir. Bu bölgede girdap (vortex) akımları dediğimiz yapılar ve türbülanslı akım ayrılması meydana gelir [6].



Şekil 1.4. Levha üzerindeki akışın doğal türbülansa geçiş aşamaları [6]

Şekil 1.4'de gösterildiği gibi doğal türbülansa geçiş olayı sınır tabaka nedeniyle kararsız olarak meydana gelir. Bu tip türbülansa geçişlerde serbest akım türbülansı oldukça düşüktür. Levha üzerinde akış ile ilgili rüzgâr tüneline deney yapan Schubauer ve Skramstad [8] hücum kenarı mesafesinde yerel Re sayısının ( $Re$ )  $2.8 \times 10^6$ 'dan az olduğu durumlarda sınır tabakanın laminar;  $3.9 \times 10^6$ 'dan büyük olduğu durumlarda ise sınır tabakanın tam türbülanslı olduğunu belirtip, göstermişlerdir.

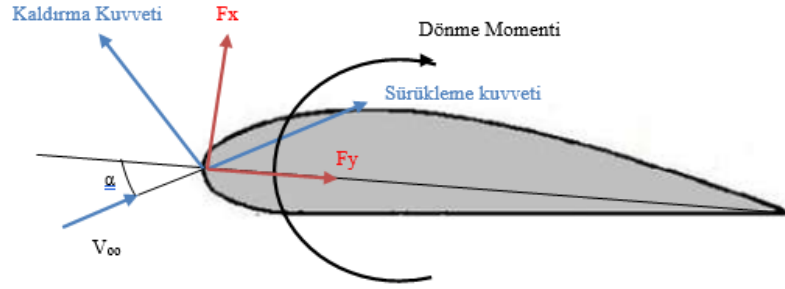
Bu çalışma ile, geliştirilecek optimizasyon parametreleri ile geleneksel kanatların dışına çıkabilecek, yenilikçi profillerin aerodinamik açıdan tasarlanması mümkün kılınabilecektir. Ek olarak ucu açık olan bu konudaki kanatların tasarlanmasına yelken açabilmesi hedeflenmektedir.

# 1. BÖLÜM

## GENEL BİLGİ VE LİTERATÜR TARAMASI

### 1.1. Giriş

Aerodinamik performans, kaldırma ve sürükleme kuvveti ve bu kuvvetlerin diğerine oranları ile ilgilidir. Aerodinamikteki performans çalışmaları, kaldırma kuvvetinin yüksek olması ve sürükleme kuvvetinin düşük olması nedeniyle her zaman bu konular üzerine odaklanmıştır [9].

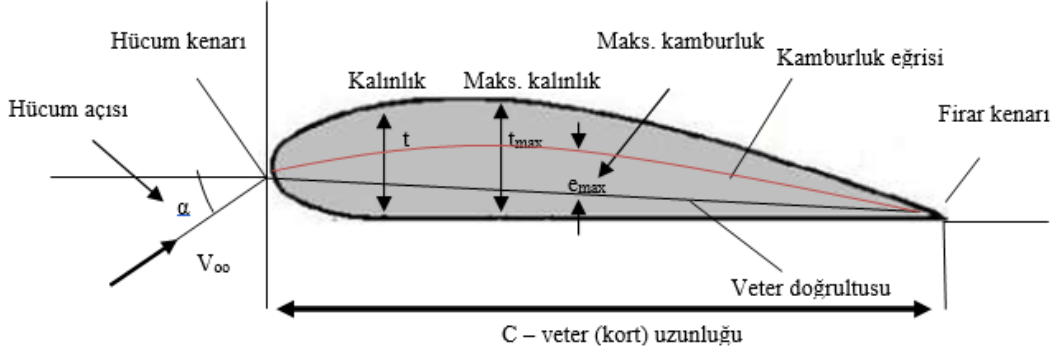


Şekil 1.5. Aerodinamik kuvvetler

Kanat profilleri, verimli şekilde kaldırma üretmek için tasarlanan profillerdir. Kanat profilini tarif ederken, temsili görüntüsü Şekil 1.6'da görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi ifadeler: kalınlık (azami), kamburluk (azami), hücum açısı, veter (kord) hattı, hücum kenarı, firar kenarı, vb. kullanılmaktadır ve bir kanat profil üzerine etkiyen kuvvetler Şekil 1.5'te tarif edildiği gibi olabilmektedir [10].

Cisime gelen ve cisme göre uzak mesafedeki akışa serbest akış (*freestream*) denilmektedir. Bu mesafeden cisme gelen akışın hızına ise serbest akış hızı (*freestream*

velocity) denilmektedir. Kanat profilinin uç kısmına hücum kenarı (*leading edge*) denilmektedir. Profilin arka uç kısmına ise, firar kenarı (*trailing edge*) denilmektedir. Profilin ön uç kısmı ile arka uç kısmı arasındaki mesafeye veter (*chord*) adı verilmektedir. Veter uzunluğu ve serbest akış hızı doğrultusu arasında kalan açıya hücum açısı (*angle of attack*) denilmektedir ve Şekil 1.6'da görülmektedir [11].



Şekil 1.6. Kanat profil geometrisi [11]

Bir şekle sahip kanat profilleri üzerinde kaldırma ( $C_L$ ) ve sürüklenme ( $C_D$ ) katsayıları, kanat yüzey kesit alanına ( $A = C(\text{chord}) \times S(\text{span})$ ), ortamında bulunduğu akışkanın yoğunluğuna ( $\rho$ ), akışkan hızına ( $V$ ) ve akışkanın profil üzerinde oluşturduğu kaldırma ( $F_L$ ) ve sürüklenme ( $F_D$ ) kuvvetlerine bağlıdır [12]. Şekil 1.6. profil bazlı (2-boyutlu) inceleme olduğu için birim alan sadece chorda bağlı olarak gösterilebilmektedir. Bu doğrultuda  $C_L$  ve  $C_D$  katsayıları denklem (1.2) ve (1.3) de görüldüğü gibi olmaktadır.

$$C_L = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho V^2 C} \quad (1.2)$$

$$C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 C} \quad (1.3)$$

Bunlara ek olarak, basitçe düşünüldüğü zaman ise aşağıdaki gibi gösterilebilirler [12].

$$C_L = C_L(\alpha, Re)$$

$$C_D = C_D(\alpha, Re)$$

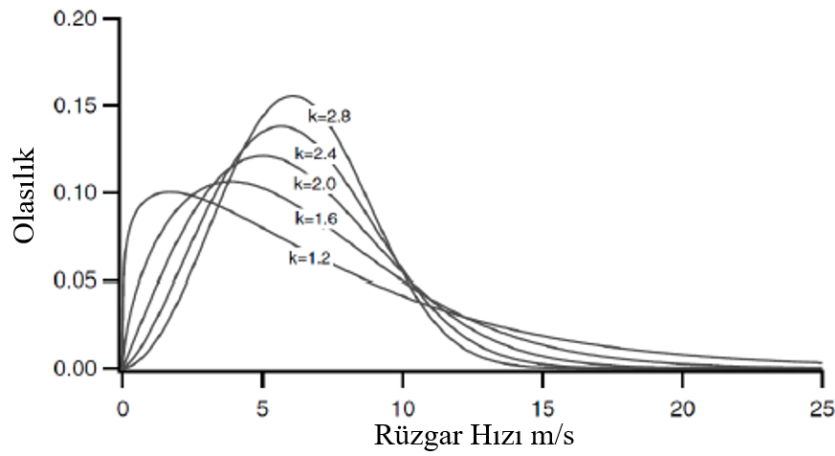
Gelişen aerodinamik araştırmalar üretim için gerekli maddi yükümlülük ve daha sonra üretim teknolojisini göz önünde bulundurularak geliştirilmeye devam etmektedir.

Kanat üzerinde, hız profilleri ve integral parametreleri basınç gradyenlerinden ve türbülans seviyelerinden etkilenmektedir. Olumsuz güçlü basınç altında, akış geçişleri hızlı bir şekilde olmaktadır ve hız profili geçiş tamamlanmadan önce yanıt vermemektedir. Serbest akım türbülansının geçişin erken aşamalarındaki hız profilleri üzerindeki etkileri özellikle güçlüdür [13]. Rüzgar hızı değişimi genellikle Weibull ve Rayleigh dağılımları gibi olasılık dağılım fonksiyonları ile temsil edilir [14-18].

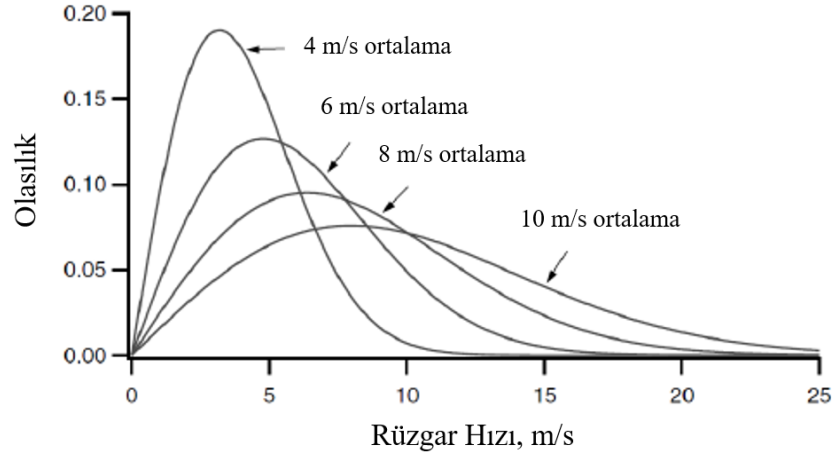
Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu iki parametrenin bilinmesini gerektirir: ortalama rüzgar hızı  $\bar{V}$  ile ilgili şekil faktörü  $k$  ve ölçek faktörü  $c$ . Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunu ( $p(V)$ ) ve kümülatif dağılım fonksiyonunu ( $F(V)$ ) temsil eden denklemler aşağıda listelenmiştir [19]:

$$p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1.4)$$

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1.5)$$



a) Weibull



b) Rayleigh

Şekil 1.7. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarına örnek [19].

Şekil 1.7.a.'daki örnek incelendiğinde, Weibull olasılık yoğunluğu fonksiyon örneklerine bakıldığında, k şekil faktöründeki artış, eğrinin daha dik olmasına neden olmaktadır. K ve c parametrelerinin daha fazla detaylı açıklaması ve hız ortalaması olan  $\bar{V}$  ya bağlı değerlendirilmesini Manwell ve ark. [19] yapmışlardır.

Rüzgar hızı değişkenliğini temsil etmek için Rayleigh olasılık dağılımı, Weibull dağılımına kıyasla uygulaması daha kolay olduğu tercih edilmektedir [20].

$$p(V) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (1.6)$$

$$F(V) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

Farklı ortalama rüzgar hızlarında Rayleigh olasılık yoğunluğuna ait örnek yine Şekil 1.7.b'de gösterilmiştir.

Yukarılarda ifade edilen rüzgar yoğunluk fonksiyonları, rüzgar türbinlerinden elde edilecek olan yıllık enerji üretim miktarlarını bulmakta kullanılır. Bir rüzgar türbininden elde edilecek yıllık ortalama enerji miktarı;

$$AEP = \bar{P} \times 365 \times 24 \quad (1.8)$$

Yukarıdaki 1.8 numaralı denklemde yer alan,  $\bar{P}$  yıllık üretilecek olan ortalama güç miktarını (kW), 365 yıl içerisindeki gün miktarını, 24 ise gün içerisinde yer alan saat miktarını ifade etmektedir.

Ortalama güç miktarı olan  $\bar{P}$ , belirli bir rüzgar hızında üretilen gücün ( $P(V)$ ), o rüzgar hızının olasılığıyla ( $p(V)$ ) çarpımının integraline eşittir (Denklem 1.9).

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V)p(V)dV \quad (1.9)$$

$p(V)$  weibull yada Rayleigh denklemlerinden bulunan ifadedir.

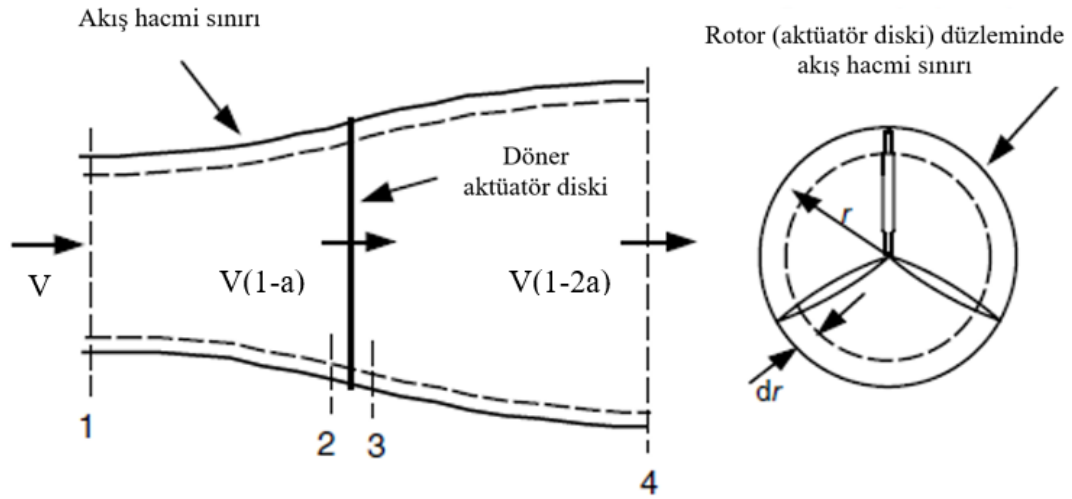
Türbin tarafından üretilen güç ( $P$ ), rüzgarda mevcut olan güçten ( $P_w$ ) farklıdır. Rüzgar türbinleri rüzgardan kinetik enerjiyi ( $E$ ) alarak elektriğe dönüştürür; Kütlesi  $m$  olan ve  $V$  hızıyla hareket eden bir hava akımının kinetik enerjisi şu şekilde verilir:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1.10)$$

Bir rüzgar akımına maruz kalan  $A$  kesit alanına sahip bir rüzgar rotoru (Şekil 1.8) göz önüne alındığında, birim zaman başına enerji (rüzgarda mevcut güç) aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$P = \frac{1}{2}C_p\rho AV^3 \quad (1.11)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan,  $\rho$ ; havanın yoğunluğunu ( $1,25 \text{ kg/m}^3$ ),  $C_p$ ; güç katsayısını,  $A$ ; rotor süpürme alanını,  $V$ ; rüzgâr hızını ifade etmektedir [21].



Şekil 1.8. Rüzgâr türbini rotor kısmı ve akış alanı şematik gösterimi [19]

Bunlara bağlı olarak, rüzgârda var olan güç türbin tarafından üretilen güçten farklıdır. Çünkü rüzgâr türbinden geçtiğinde kinetik enerjisinin bir kısmı rotora aktarılırken kalanı türbinden çıkan hava tarafından taşınır. Bu nedenle üretilen güç, güç katsayısı ile çarpımından elde edilir.

$$P = C_p \times P_w \quad (1.12)$$

Bu ifadenin teorik olarak maksimum değeri Betz Limiti olarak, 0.593 (ya da 16/27) olabilmektedir. Ve uygulamalarda bu değerden daha düşük değerler elde edilmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin çalışma esnasında kanatları üzerinde büyük akış ayrılmaları olmaktadır. Bunlarda yüksek titreşimlere maruz kalmalarına sebep olmaktadır. Kanat üzerinde dinamik akış alanının değişmesi aerodinamik kuvvetlerin değişmesine neden olmaktadır. Yapılan CFD analizlerinde öteleme (yer değiştirme) hareketinde bulunan S809 kanat modeli, kararsız aerodinamik kuvvetlerini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Aerodinamik etkileri gözlemlmek için, BEM (Blade Element Theory) teorisi ve BL (Beddoes-Leishman) modelleri önerilmiştir. Bu yöntemler

ile titreşim ve kararsız yüklerin kanatlar üzerinde aerodinamik yorulma yükleri analiz edilebilir [22].

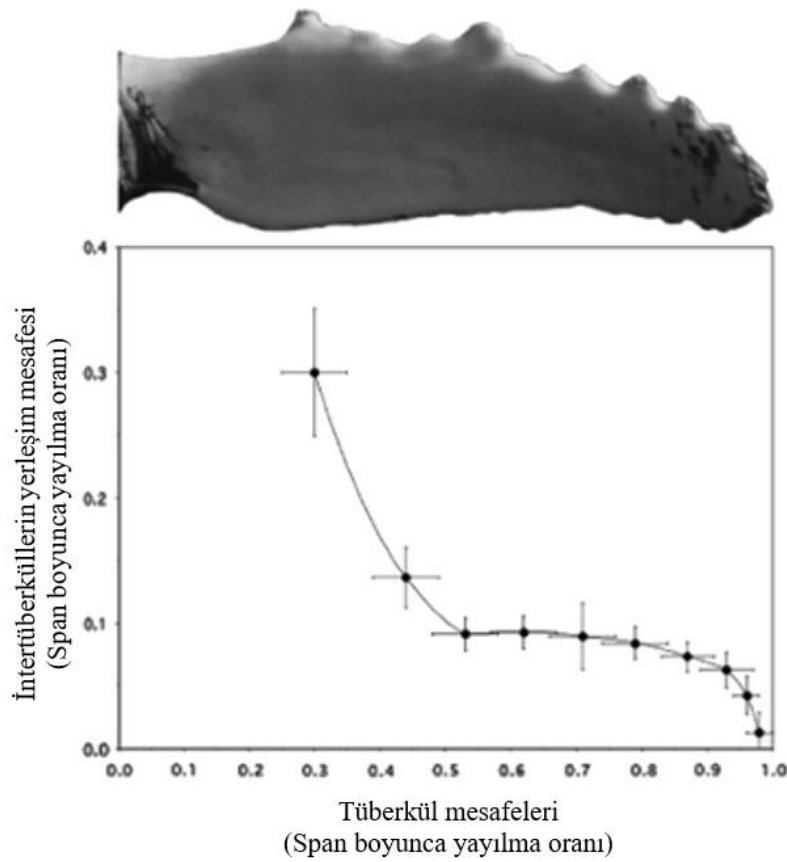
Kanat profilleri üzerinde sınır tabakası boyunca titreşimlerin oluşması iki türden meydana gelmektedir; akış yönünde lokal sürtünmelerden kaynaklı ve akış ayrılımlarından kaynaklı dalga paketleridir [23].

Aerodinamik ve verim çalışmalarında rüzgâr türbin kanatlarının yanı sıra, su altı ve üstü taşıtlarda, hava araçlarında kullanılan pervanelerde aynı prensip ele alınarak geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle kambur balina kanatlarının su altında sürtünme kuvvetlerini azalttığı, kaldırma ve moment etkilerini artırdığı bilinmektedir.

## 1.2. Literatür Çalışması

Kambur balinalar, balina türlerinde en büyük ve değişken balyalı yüzgeçlere ve tüm deniz memelilerinde en uzun pektoral yüzgeçlere sahip memelilerdir [24]. Suda avlanma yetenekleri mükemmeldir ve pektoral yüzgeç cephesinin çıkıntılara sahiptir. Yüzgeç şeklindeki ön ayaklar omuz yüksekliğinde hareket eder ve kanat açıklığı boyunca biraz esneklik gösterir. Diğer balinalarla karşılaştırıldığında, yüzgeç ön ayakları yüksek bir En Boy oranı sahiptir, ancak ön kısımlarında sonunda hafif bir eğrilik göstermektedir. Kambur balinanın göğüs yüzgeci özel öncü çıkıntılara sahiptir. Bu eşsiz yapı, göğüs yüzgecinin performansını artırır [25]. Bu eşsiz yapıya ait pektoral görüntü Şekil 1.9' da verilmiştir.

Ön yüzgeç uzunluğu yaklaşık 0.25-0.33 iken [26,27], yüzgecin kesiti, %21 kalınlaşma ile düşük dirençli NACA 634-021 kanat yapısına çok benzerdir [24].

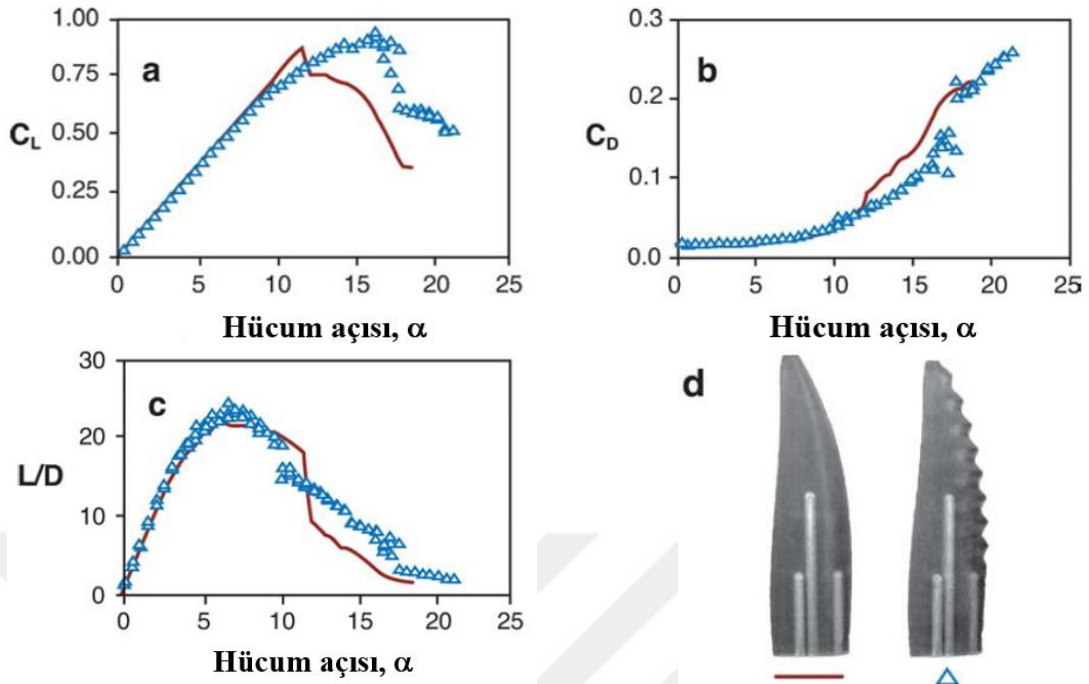


Şekil 1.9. Pektoral yüzgeç ve kambur balinanın çıkıntılı yapısı[28]

Dalgalı cisimler üzerinde yapılan deneylere göre, tasarımın açıklığı boyunca, belirli varyasyonlarda ki periyodik değişimler göstermiştir [29]. Bu da düz tasarlanan yapılara kıyasla en az %30'luk direnç azalmasına sebep olduğu gözlenmiştir [30].

Rüzgar tüneli içerisinde yapılan Kambur Balina kanat uygulamalarının testlerinde, hücum kenarına uygulanan tüberkül modellerinin, stol açısını geciktirdiği ve sürtünme kuvvetini artırmadan toplam kaldırmaı artırdığı gözlemlenmiştir [31].

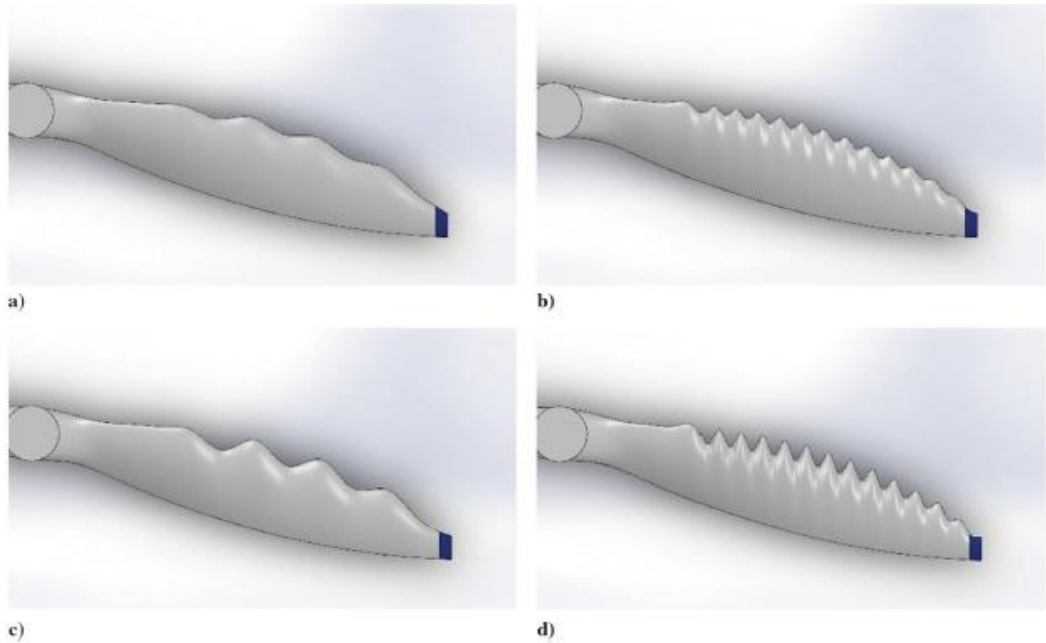
Stol açıları, tüberkülsüz model için  $12^\circ$  ve tüberküllü model için ise  $16,3^\circ$ 'de meydana gelmiştir (Şekil 1.10.a.). Maksimum kaldırma, tüberküllü model için biraz daha büyük olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 1.10.a.). Tüberküllü model için sürükleme katsayısı( $c_d$ )  $12^\circ < \alpha < 17^\circ$  aralığında, tüberkülsüz olandan daha düşük ve  $10^\circ < \alpha < 12^\circ$  aralığında sadece biraz daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 1.10.b). En uç kaldırma/sürükleme oranı, tüberküllü yapılarda daha fazla mevcut olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 1.10.c).



Şekil 1.10. Tüberküllü ve Tüberkülsüz kambur balina kanat modelleri için, kaldırma ve sürüklenme verileri [31]

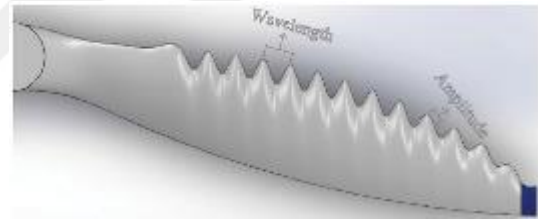
Tüberküller, bir kaldırma yüzeyinin etrafındaki akış alanını değiştiren yuvarlak çıkıntılardır. Tüberkül etkisi önemli ölçüde aerodinamik açıdan kanatları [32, 33], rüzgar türbin kanatları ve gelgit türbin kanatlarını [34], deniz araç pervanelerini [35] ve elektronik ısıtıcı emici fanları [36] etkilemektedir.

Özellikle, Butt ve Talha çalışmalarında, pervane kanatları boyunca balina kanat benzerliklerinde, kanat aralarına dalgalanmalar ve değişken dalga boyları vererek bunlar üzerlerinde yaptıkları farklı değişkenliklerin sayısal çalışmalarını yaparak kaldırma ve sürüklenme oranlarında her yapılan değişkenliğin verim artışına sebep olduğunu belirtmişlerdir [37]. Şekil 1.11, Şekil 1.12 ve Şekil 1.13'ten de anlaşılacağı üzere bu optimizasyon çalışmalarının artırılması gerektiğinde bahsetmişlerdir [38].

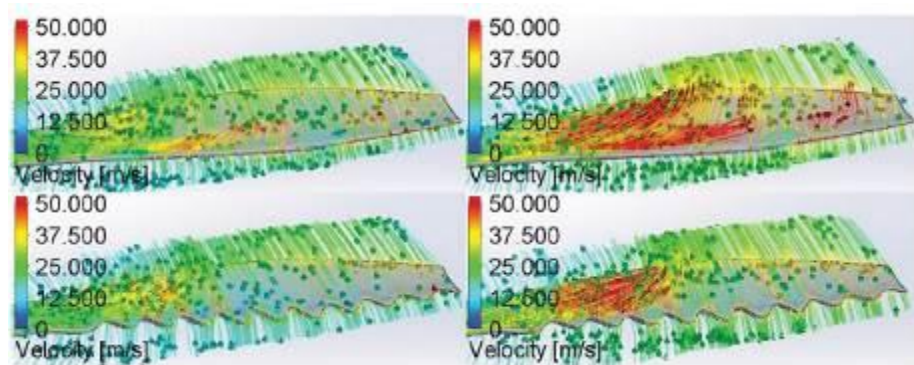


Şekil 1.11. Konfigürasyon temsilleri a)C1 b) C2 c)C3 d)C4 [37]

Configuration	Normalized tubercle wavelength	Normalized tubercle amplitude	Tubercle sweep angle, deg
C1	0.085 $s$	0.1 $c$	13.61
C2	0.03 $s$	0.1 $c$	32.12
C3	0.085 $s$	0.2 $c$	22.81
C4	0.03 $s$	0.2 $c$	50.36
Baseline	N/A	N/A	N/A



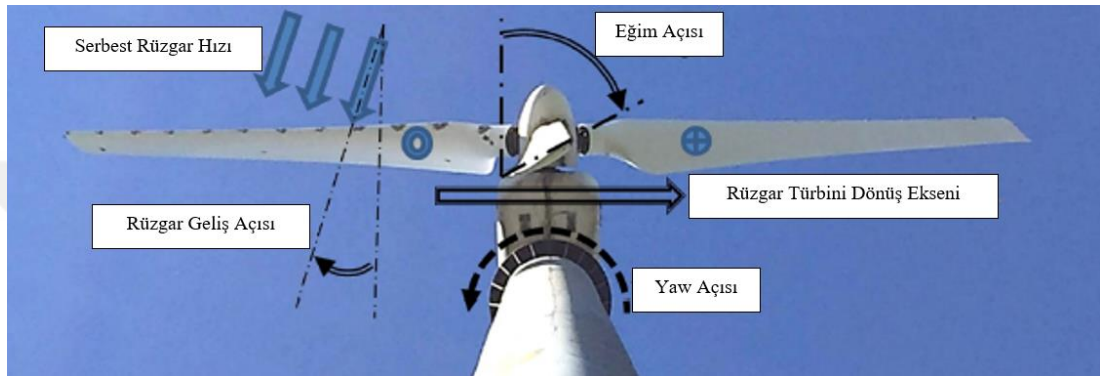
Şekil 1.12. Modifiye pervane bıçak genlik ve dalga boyu [37]



Şekil 1.13. Temel pervane (üst) ve modifiye pervane (alt) [37].

Lin Y. ve Chiu P. Çalışmalarında kambur balina yüzgeçlerinde var olan çıkıntılara benzer kısımları FX63 rüzgar türbin kanadına 50'lik bir eğim açısı ile uygulayarak (Şekil 1.14) aktif akış kontrol mantığında, performans değişimlerini farklı dönüş hızına göre gözlemlemişlerdir. Başlangıç rüzgâr hızı 4 m/s olduğunda, çıkış gücü 786.46 W'tan 1.5

kW'a yükseltilebilir olduğu görüşmüştür. Mevcut deneysel sonuçlardan, ön kenar çıkıntıları (Şekil 1.18) rüzgâr türbini çıkış gücünü etkili bir şekilde stabilize edebileceği ve ortalama güç çıkışını artıracacağı belirtilmiştir. Ancak değişik hücum açılarında ve ortam rüzgâr hızlarında güç üretiminin ilişkilerini inceleyerek, mevcut cihazın, bazı sabit zift açılarında optimum Cp-TSR (uç hız oranı) ilişkisinde çıkış gücünü de stabilize edebileceği bulunmuştur [38].



Şekil 1.17. Rüzgar türbini bıçağının eğim açısının şematik diyagramı [38]



(a)

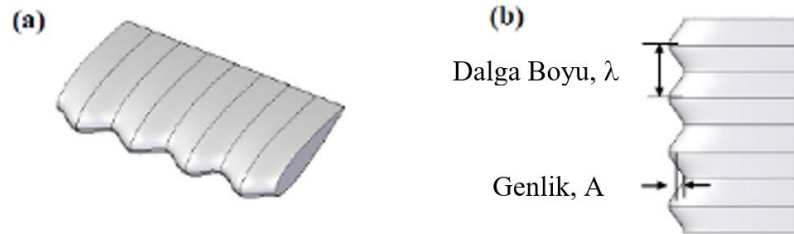
(b)

Şekil 1.18. INER 25 kW rüzgar türbin kanadı hücum kenarı vortex jeneratörleri [38]

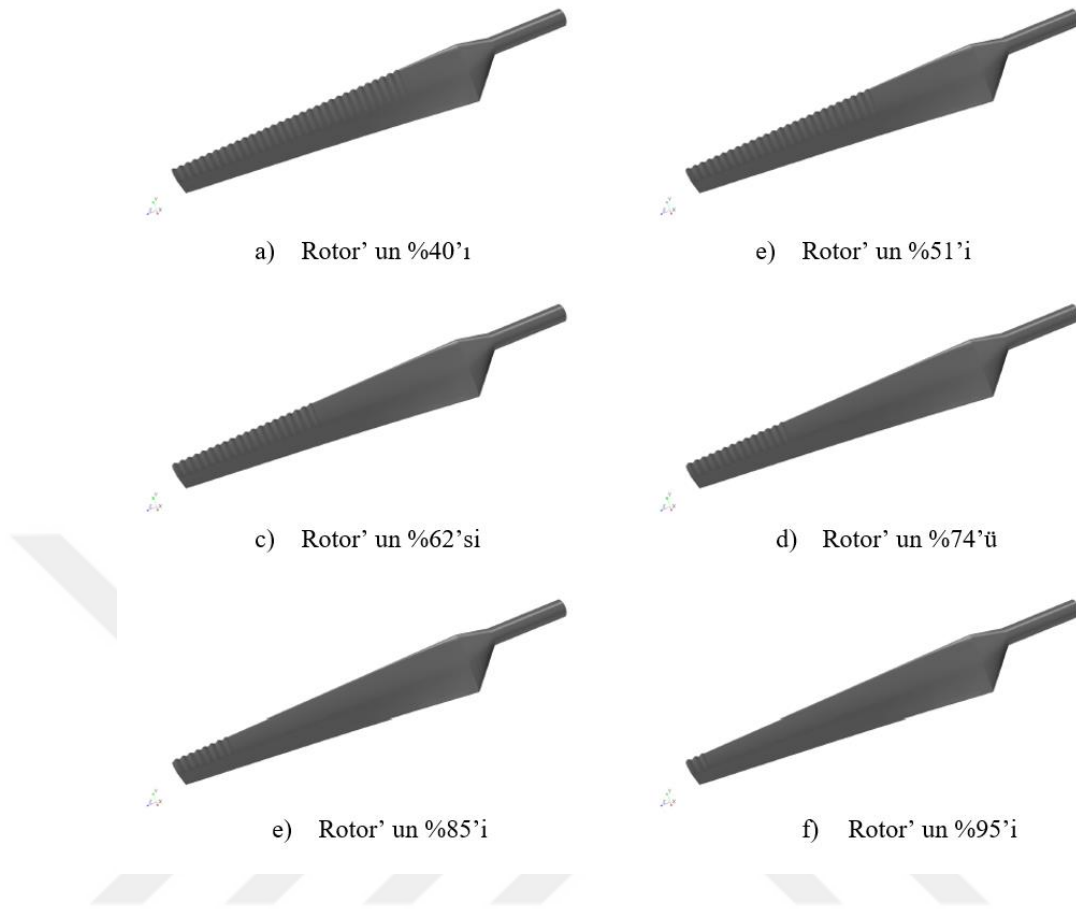
Son zamanlarda, Shi ve arkadaşları gelgit türbin kanadı performansını artırmak için kambur balinalardan esinlenen türbin kanatlarına hücum kenarlarına tüberküllerin uygulanmasını önerdi. Deneylerinden, bu tür tasarımların maksimum güç katsayısını düşürmeden düşük uç hız oranı (TSR) bölgesindeki hidrodinamik performansı artırabileceği de gösterilmiştir [39]. Domel ve arkadaşları ise köpekbalıklarının derisini

kaplayan diş benzeri dişlerle modifiye edilmiş kanat profil yüzeyi tasarımların en iyi bildirilen geleneksel düşük profilli girdap jeneratörlerine kıyasla, düşük saldırı açılarında %323'e kadar iyileşme sağlayabildiğinden bahsetmişlerdir [40].

Rüzgâr türbin kanatlarının hücum kenarlarında, dalgalı ve sinüzoidal şekline dönüştürülen tüberküller, yüksek rüzgâr hızlarında akış ayrılmasını geciktirdiği için aerodinamik performansı artırma yönünde potansiyel bir çözüm gibi görünmektedir [41]. Abate G. ve Mavris D. Çalışmalarında, Nrel Faz VI türbin kanadı boyunca farklı tüberkül pozisyonları göz önüne alarak, performansını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarını %40, %51, %62, %74, %85, %95 oranlarında hücum kenarına 6 farklı modelle (Şekil 1.19 ve Şekil 1.20) uygulayarak 5, 10, 15 ve 20 m/s rüzgâr hızlarında denemişlerdir. Sayısal olarak yapılan çalışmada özellikle, bıçak açıklığının %95'inden kanat ucuna yakın tüberküllerin yerleştirilmesi, ortalama 10 m/s rüzgâr hızı göz önüne alındığında, Yıllık enerji üretim potansiyelinde %10'luk bir iyileşme gösterdiğini belirtmişlerdir [41].



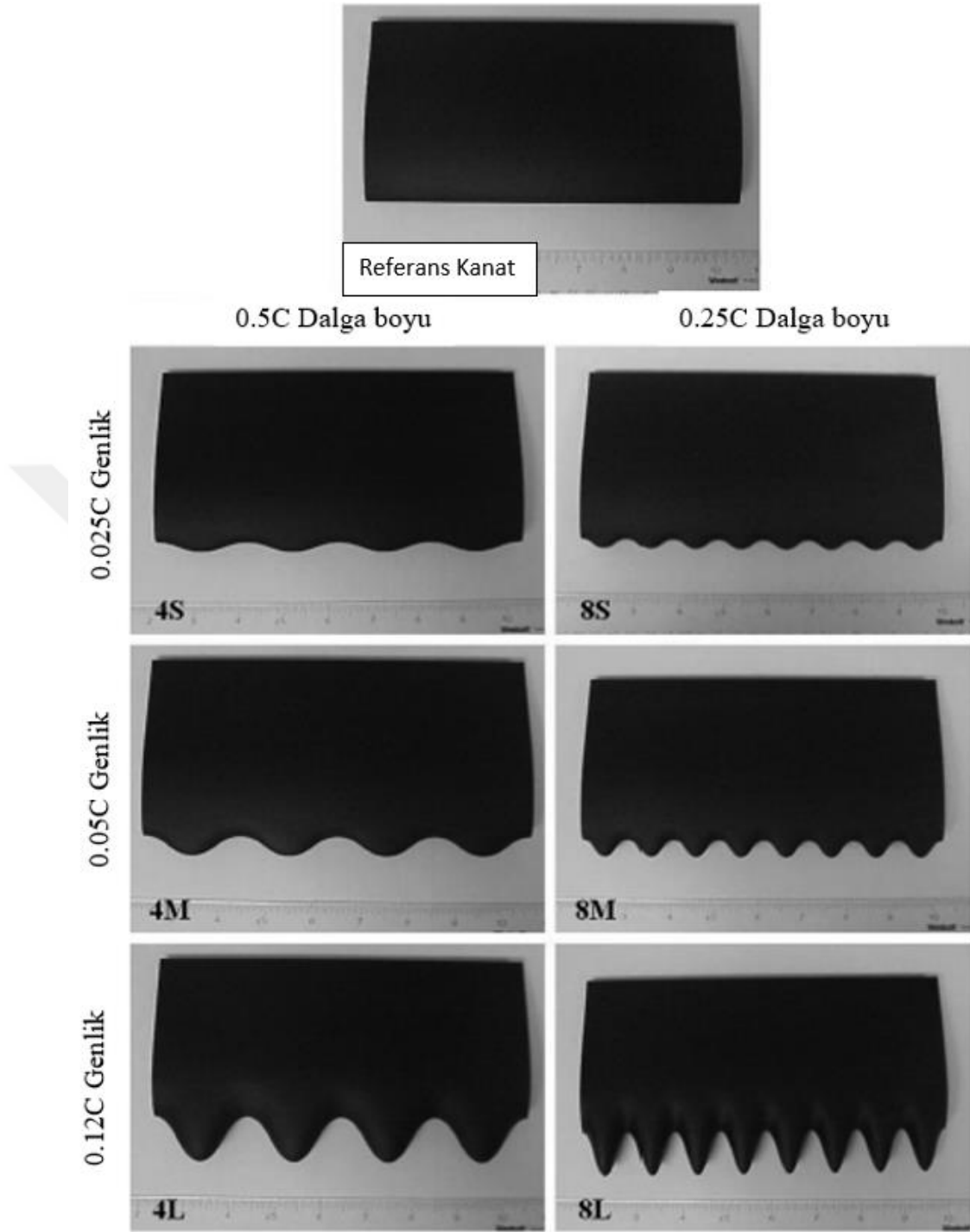
Şekil 1.19. Tüberküllü bir kanadın 3D görünümü (a) ve plan görünümü (b) [41]



Şekil 1.20. Farklı tuberkül modelleri [41]

Hansen ve arkadaşları [42] tüberkülleri iki farklı tam açıklıklı kanatta test etti: NACA 0021 ve NACA 65-021 kanat profili bölümleri. NACA 0021, balina paletinin enine kesit profiline daha çok benzediği için seçildi; NACA 65-021, kirişin %50'sinde maksimum kalınlık konumuna sahip olduğundan, karşılaştırma amacıyla farklı bir kanat profili türü olarak kullanıldı. Sonuçlar, tüberkül genliği azaldığında her iki kanadın daha yüksek kaldırma katsayısına ve daha büyük durma açısına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, durak sonrası rejimde, daha büyük genliğe sahip kanatların performansı daha olumlu görünmektedir. Dalga boyu azaltma, maksimum kaldırma katsayısında, durma açısında ve durak sonrası özelliklerde iyileştirmelere yol açar. Bununla birlikte, dalga boyunda daha fazla azalmanın performans üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu bir nokta vardır. Sonuçları temel kanatla karşılaştırarak, Hansen ve ark. ayrıca NACA 65-021 kanadında tüberküllerin NACA 0021'den ziyade NACA 65-021 kanadında daha faydalı olduğunu fark etti, çünkü maksimum kalınlık pozisyonu NACA 65-021'de olduğu gibi daha kıçta olduğunda, laminar sınır tabakasının uzantısı daha büyüktür ve bu nedenle tüberküller daha faydalı olabilir [42].

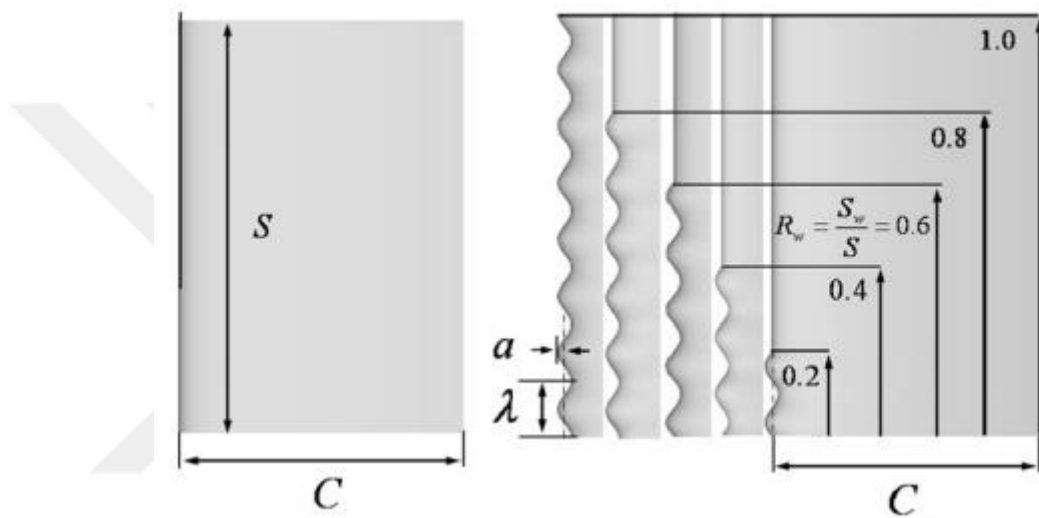
Johari ve diğeri [43] kâmbur balina paletlerinin aralığında tüberköl genliğı ve dalga boyu değerlerini değiştirmiş ve altı modeli temel modelle karşılaştırmıştır (şekil 1.21). Genel olarak, tüberköl kanat profilleri ile temel model arasında, tüberköl uygulandığında ayrılmada gecikmeyle birlikte farklı bir durma davranışı fark ettiler; ayrıca hücum açısı taban çizgisi durma açısının altında olduğunda hücum kenarı tümsekleri kaldırma katsayısında bir azalmaya neden olur. Bununla birlikte, duraklama sonrası rejimde, tüberköl, temel modele kıyasla kaldırma katsayısını %50'ye kadar iyileştirebilir. Genlik ve dalga boyunu değiştirerek, Johari ekibiyle ayrıca durma, kaldırma ve sürüklemedeki bu geometrik parametrelerin etkilerini de inceledi. Özellikle, daha küçük genliğe sahip kanatlar, stall açısı ve maksimum kaldırma katsayısı açısından en iyi performansı göstermiş ve daha yüksek genlik değerleri, daha yumuşak stall özellikleri ile sonuçlanmıştır. Dalga boyu etkileri, daha küçük dalga boyuna sahip tüberköl daha yüksek maksimum kaldırma katsayısı ve daha düşük sürükleme ile durma açısı elde etmesine rağmen, yazarlar tarafından küçük kabul edildi [43].



Şekil 1.21. Kullanılan tüberküllü kanat modelleri [43]

Yoon arkadaşları ile [44], açıklık boyunca tüberkül konumunu değiştirerek dikdörtgen bir kanat etrafındaki dalgalı bir hücum kenarının akış hidrodinamik özellikleri üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırdı. Üç farklı hücum açısında tüberküllerin kapladığı açıklık uzunluğu üzerinden kanat açıklığı uzunluğu tarafından tanımlanan beş farklı dalgalanma oranı değerini test ettiler. Şekil 2.13, sabit genlik ve dalga boyu ile karakterize edilen, test

edilen beş modeli göstermektedir. Düşük hücum açıları için, dalgalı hücum kenarı modifikasyonlarının hidrodinamik kuvvetler ve akış yapıları üzerindeki etkisi neredeyse yok denecek kadar azdır. Dalgalanma arttıkça, stall, düz kanatta olduğundan daha erken gerçekleşir; Stall sonrası rejimde, dalgalı kanatlarda temel modele göre kaldırma katsayısı artar. Bir akış analizinden, Yoon ve ark. ayrıca tüm kanatların, nispeten düşük bir basıncın fark edildiği dalgalı oluklarda meydana gelen sınırlayıcı akım çizgilerinin spiral oluşumları ile karakterize edildiğini buldu (Şekil 1.22).



Şekil 1.22. Tüberkül modelinin referans kanat ve değişken varyasyonlarına ait dizaynlar [44]

Bir başka çalışmada, Kumar S. ve Amano R. [45] tüberküllerin rüzgâr türbin kanatlarının tek bıçaklı yapısı üzerine uygulaması üzerine yaptıkları sayısal çalışmada, rüzgâr türbin kanatları üzerine uygulanan dalgalı tüberkül yapılarının kaldırma kuvvetini ciddi oradan artırdığı ve gelecek rüzgâr türbin kanatlarının bunun üzerine yoğunlaşılacağı aşikar olduğunu belirtmişlerdir [45].

Bu tür benzersiz yapılarla, ön kenar çıkıntıları, mühendislik uygulamaları için yaygın olarak kullanılan girdap jeneratörü benzeri etkileri sergileyebilir. Deneysel literatürde [46], kanat profillerinde hücum kenar çıkıntılarının ve balina yüzgeç uygulamalarının akış ayrılma açısını geciktirebileceği, sürtünmenin azalmasına ve kaldırma kuvvetinin artmasına neden olabileceği kanıtlanmıştır.

Temel rüzgar türbini kanadının ve tüberküllu kanatların geometri parametrelerinin belirlenmesinden oluşur. Temel model seçildikten sonra, sinüzoidal bir yol izleyerek ve arka kenar çizgisini sabit tutarak hava folyosunu ölçeklendirerek tüberküller oluşturulur [47].

$$\Delta c = A \times \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \quad (1.11)$$

Yukarıda görünen denklemde  $\Delta c$  ifadesi, her bir istasyondaki kanat modelinin çeşitli kort büyüklüğünü ifade etmektedir.  $A$  ifadesi, tüberküllerin genliğini,  $\lambda$  ise dalga boylarını,  $z$  ise kanat uzunluğu boyunca kanat modelinin yerini ifade etmektedir [48].

Bunun neticesinde hesaplanacak olan her yeni chord, orijinal kordun üzerine yeni hesaplanan kord eklenerek bulunur [48].

$$c = \bar{c} + \Delta c \quad (1.12)$$

Kanat modellemesinde, seçilen parametreler deneysel üretimlerine göre şekillenebilmektedir [48].

Kanat parametrelerini belirledikten sonra faydalı tasarım için en basitten gidilmesi gerekmektedir. Basitlik için, genlik ( $\bar{A}$ ), dalga boyu ( $\bar{\lambda}$ ) ve kanat genişliğinin başlangıç noktası ( $\bar{z}_0$ ) dikkate alınmalıdır [48].

$$A = \frac{A}{c_0} \quad (1.20)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{R} \quad (1.21)$$

$$\bar{z} = \frac{z_0}{R} \quad (1.22)$$

Yukarıdaki 1.20 numaralı denklemde  $c_0$  kanat kesitindeki kort uzunluğunu, R kanat toplam uzunluğunu  $z_0$  ise tüberkül uygulamasının kanat uzunluğu boyunca nereden başlayacak olduğunu ifade etmektedir.

Ke ve arkadaşları [49] NREL Faz IV modeli üzerinde yapmış oldukları çalışmalarında, 1.20, 1.21 ve 1.22 numaralı denklemleri kullanarak 8 adet değişik (Şekil 1.23) dizayn ortaya koymuşlardır.

Durum	1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{A}$ [-]	0.055	0.032	0.032	0.04	0.055	0.04	0.025	0.04
$\bar{\lambda}$ [-]	0.078	0.055	0.021	0.021	0.032	0.025	0.056	0.03
$\bar{z}$ [-]	0.42	0.23	0.61	0.90	0.81	0.79	0.60	0.90
$A/\lambda$ [%]	9.4	7.75	20.3	25.3	22.89	21.31	5.9	17.7

Şekil 1.23. Ke ve Ark. analiz modellerinde kullandıkları genlik, dalga boyları ve yerlerinin örneklere göre değişimi [49]

Seçmiş oldukları modellere göre yapmış oldukları analizlerde, rüzgar hızının 7m/s nin altındaki durumlarda seçtikleri tüberkül modellerinin türbin performansında negatif etki yarattığı gözlemlenmiştir. Ancak tüberkül modellerinin kanat açıklığının %60'ından büyük noktalarda yapıldığında ve rüzgar hızının 10m/s nin üstünde ki durumlarda kanat arkası akış karakteristiğinde düzelmelerin olduğunu ifade etmişlerdir.

Kaldırma/sürüklenme oranı, kaldırma ve sürüklenme arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılır ve kaldırma katsayısının, sürüklenme katsayısı  $C_L/C_D$ ' ye bölünmesiyle belirlenir. L(kaldırma)/D(sürüklenme) oranı, kanat profili verimliliğini gösterir. Daha yüksek L/D oranlarına sahip uçaklar/ rüzgar türbin kanat profilleri, daha düşük L/D oranlarına sahip olanlardan daha verimlidir diye ifade edilebilmektedir.

Bu ifadenin yanında, literatürde bir de hava araçları için aerodinamik performans katsayısı konusunda  $C_L^3/C_D^2$  şeklinde bir ifade karşımıza çıkmaktadır. Bu ifadenin önemli oluşunun sebebi, performans durumunda daha yavaş hareket eden hava aracının yanı sıra, aynı miktarda yakıtla daha uzun havada kaldığı gözlenmektedir [50]. Buradan anlaşılacağı gibi dayanıklılık durumlarında bu faktör ne kadar büyükse türbin

kanatlarından/hava araçlarından elde edilecek olan verim ifadesinde artışlar gözlemlenmektedir.

Sieradzki A. ve arkadaşları [51] yaptıkları çalışmada,  $C_L/C_D$  oranı ile  $C^3_L/C^2_D$  oranını incelemişlerdir. Bu iki aerodinamik performans göstergesi, seçilen konfigürasyonun uçuş menzili ve dayanıklılık açısından potansiyeli hakkında bilgi verir. Dahası, boyutsuz kayma oranı değeri varsayılan referans değerlerden bağımsızdır ve bu nedenle en küçük metodik hatayla doludur. Öte yandan, varsayılan referans alanı değeri değiştirildiğinde seçilen uçak için dayanıklılık faktörünün değeri değişir. Hesaplanan tüm durumlarda toplam kaldırma yüzey alanının referans alanı olarak kullanılmasının nedeni budur ifadelerini kullanmışlardır [51].

## 2. BÖLÜM

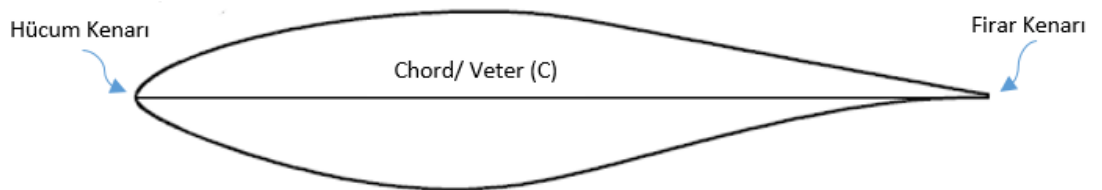
### AMAÇ VE KAPSAM

#### 2.1 Amaç ve Kapsam

Çalışma boyunca referans olarak alınan NREL Faz II türbin kanadına kambur balina kanat yapısının uygulanmasının neticesinde oluşan, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerindeki değişimler ile verimde artış/azalışlar incelenmiştir. Çalışma sayısal modelleme, sayısal analiz olarak gerçekleştirilmiş sonuçlar neticesinde, kambur balina kanat uygulaması için yapının etkinliğini etkileyen parametreler, istatistik analizler yapılarak elde edilmiştir. Bu kanat modelinin (NREL Faz II) seçilmesindeki en büyük etken, model üzerine aerodinamik geliştirme çalışmalarının az olduğu gözlemlenmiştir. Ancak parametrik verilerin ve deneysel sonuçların NREL kütüphanesinde mevcut olan türbin modeli olmasıdır. Yapılmakta olan genlik ve dalga boy değişimleri parametrik bağlara kurulu şekilde gerçekleştirilmektedir.

#### 2.1.1 S809 Kanat Profili

Çalışma amacı doğrultusunda analizlerin ve üzerine geliştirmelerin yapıldığı NREL Faz II kanat yapısı, tek tip kanat profili içermekte olup NREL ailesine ait S809'dur (Şekil 2.1).

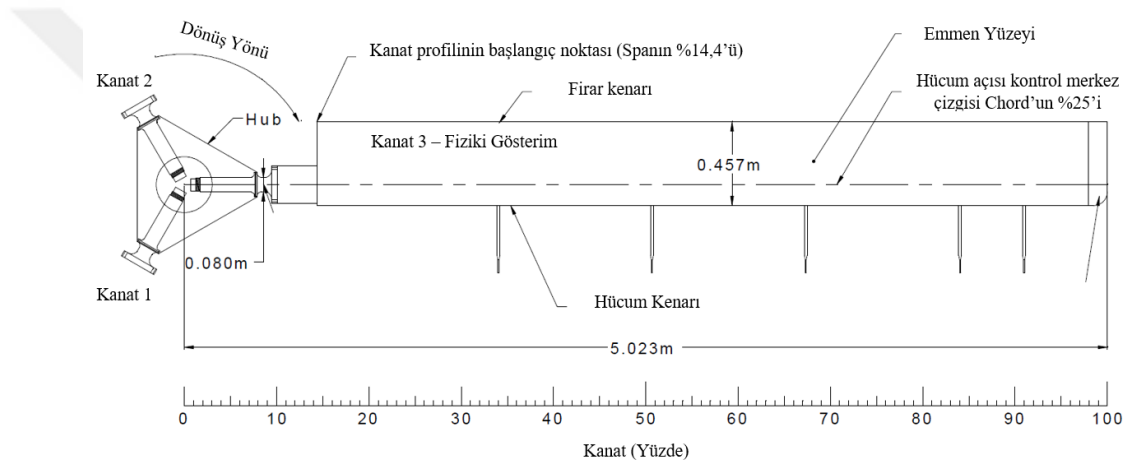


Şekil 2.1. S809 Kanat profili [52]

Model kanat veter uzunluğu 0.4572 m olarak sabit tutulmuştur. Kanat modeli OSU/AARL personelleri tarafından tasarlanmıştır [52]. Kanat modeline ait koordinatlar Ek-1’de verilmiştir.

### 2.1.2 NREL FAZ II Türbin Kanat Modeli

Referans kanat olarak belirlenmiş olan NREL Faz II kanat model bilgileri NREL dosyaları içerisinde alınmıştır. Şekil 2.2’de türbin kanat geometrisi gösterilmiştir ve kanat profili ise Şekil 2.1’de verildiği gibi NREL S809’dur.



Şekil 2.2. NREL Faz II Kanat modelinin yerleşim geometrik ölçüleri [53]

Tablo 2.1’de görüldüğü üzere kanat 5.023 m rotor çapına, yaklaşık 0.4572 m kanat genişliğine (veter uzunluğuna),  $12^\circ$  hücüm açısına, düz bir yapıya (istasyonlarda burulma açısında değişiklik yok) sahiptir ve yaklaşık 20 kW elektrik üretebilmektedir.

Tablo 2.1. NREL Faz II kanat bilgileri [54]

Kanat Modeli	NREL Faz II
Kanat Kesit ve Planformu	NREL (Sabit Veter uzunluğu, Sabit burulma açısı)
Kök Uzantısı	0.723 m
Kanat Kök Hücüm Açısı	12 derece
Kanat Profili	NREL S809
Kanat Veter Uzunluğu	0.4572 m
Rüzgar Hızı	6 m/s
Türbin Gücü	19.8 kW
Kanat Bükümü	Burulma Açısı Yoktur.

### 2.1.3 Kambur Balina Kanat Model Uygulamaları

NREL kütüphane verilerine bağlı kalınarak oluşturulan normal referans kanadın ardından, kanat üzerinde Şekil 2.3' te görüldüğü üzere, dalga boyu, genliği ve konum açısından değişkenliklere bağlı özet tablo verilmiş ve bunlara bağlı olarak 30 adet kanat modeli oluşturulmuştur.

Tablo 2.2. Kambur Balina Kanat Model Durumları

Dalga Boyu	S/5, S/10, S/20
Genlik	Cx0.8, Cx0.9 (Chordun %20 ve %10 küçültülmüş hali)
Yerleşim/ Konumlandırma	Sx0.6, Sx0.7, Sx0.8, Sx0.9, Sx1
S= Span & Kanat Uzunluğu, C= Chord & Veter Uzunluğu	

Tablo 2.2 incelendiği zaman, oluşturulacak olan modellerde yerleşim alanının, kanat span boyunca %60'lık kısımdan %100'lük kısmına kadar ki değişimleri incelenecektir. Bunun sebebi, Bodur ve Genç [55] ön çalışmalarında görüldüğü gibi dalgalı yapının, kanat spanı boyunca %75'lik ve %100 arasında en iyi performansı göstermesidir.

### 2.1.4 Referans Kanat ve Modifiyeli Kanat Dizaynları

Kanat üzerinde oluşturulacak dalga boyu değişimleri, genliklerin yerleri ve konumlandırmaları, Tablo 2.2'ye göre planlanmış ve bu veriler ile oluşturulan modellerin genel detayları Tablo 2.3'te gösterildiği gibi meydana gelmiştir.

Tablo 2.3. Model Detayları

İstasyon Sayısı	Dalga Boyu ( $\lambda$ )		Genlik (A)		Yerleşim (Z)	
	Değişken Özellik	Boyutu (m)	Değişken Özellik	Boyutu (m)	Değişken Özellik	Boyutu (m)
11	Span/5	0.8600	Chord*0.8	0.36576	Span*0.6	3.303
11	Span/5	0.8600	Chord*0.8	0.36576	Span*0.7	3.733
11	Span/5	0.8600	Chord*0.8	0.36576	Span*0.8	4.163
11	Span/5	0.8600	Chord*0.8	0.36576	Span*0.9	4.593
11	Span/5	0.8600	Chord*0.8	0.36576	Span*1	5.023
11	Span/5	0.8600	Chord*0.9	0.41148	Span*0.6	3.303
11	Span/5	0.8600	Chord*0.9	0.41148	Span*0.7	3.733
11	Span/5	0.8600	Chord*0.9	0.41148	Span*0.8	4.163
11	Span/5	0.8600	Chord*0.9	0.41148	Span*0.9	4.593

11	Span/5	0.8600	Chord*0.9	0.41148	Span*1	5.023
21	Span/10	0.4300	Chord*0.8	0.36576	Span*0.6	3.303
21	Span/10	0.4300	Chord*0.8	0.36576	Span*0.7	3.733
21	Span/10	0.4300	Chord*0.8	0.36576	Span*0.8	4.163
21	Span/10	0.4300	Chord*0.8	0.36576	Span*0.9	4.593
21	Span/10	0.4300	Chord*0.8	0.36576	Span*1	5.023
21	Span/10	0.4300	Chord*0.9	0.41148	Span*0.6	3.303
21	Span/10	0.4300	Chord*0.9	0.41148	Span*0.7	3.733
21	Span/10	0.4300	Chord*0.9	0.41148	Span*0.8	4.163
21	Span/10	0.4300	Chord*0.9	0.41148	Span*0.9	4.593
21	Span/10	0.4300	Chord*0.9	0.41148	Span*1	5.023
41	Span/20	0.2150	Chord*0.8	0.36576	Span*0.6	3.303
41	Span/20	0.2150	Chord*0.8	0.36576	Span*0.7	3.733
41	Span/20	0.2150	Chord*0.8	0.36576	Span*0.8	4.163
41	Span/20	0.2150	Chord*0.8	0.36576	Span*0.9	4.593
41	Span/20	0.2150	Chord*0.8	0.36576	Span*1	5.023
41	Span/20	0.2150	Chord*0.9	0.41148	Span*0.6	3.303
41	Span/20	0.2150	Chord*0.9	0.41148	Span*0.7	3.733
41	Span/20	0.2150	Chord*0.9	0.41148	Span*0.8	4.163
41	Span/20	0.2150	Chord*0.9	0.41148	Span*0.9	4.593
41	Span/20	0.2150	Chord*0.9	0.41148	Span*1	5.023

Tablo 2.3.'de yerleşimleri ve ölçüleri netleştirilen kanat geometrileri 3-Boyutlu dizayn programlarında dizayn edilmiş ve referans kanatlar ile birlikte Şekil 2.2 de görüldüğü üzere 31 adet kanat modeli oluşturulmuştur.



i. Referans Kanat



ii. Model-1



iii. Model-2



iv. Model-3



v. Model-4



vi. Model-5



vii. Model-6



viii. Model-7



ix. Model-8



x. Model-9



xi. Model-10



xii. Model-11/16



xiii. Model-12



xiv. Model-13



xv. Model-14



xvi. Model-15



xvii. Model-16



xviii. Model-17



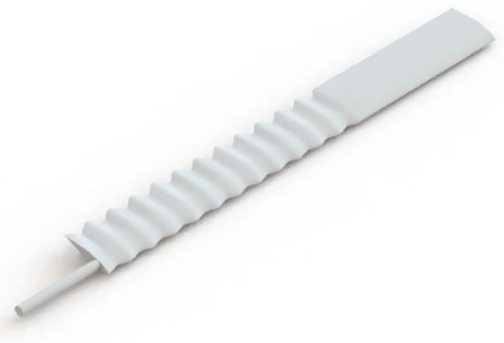
xix. Model-18



xx. Model-19



xxi. Model-20



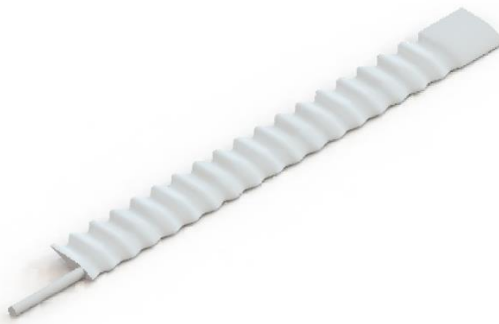
xxii. Model-21



xxiii. Model-22



xxiv. Model-23



xxv. Model-24



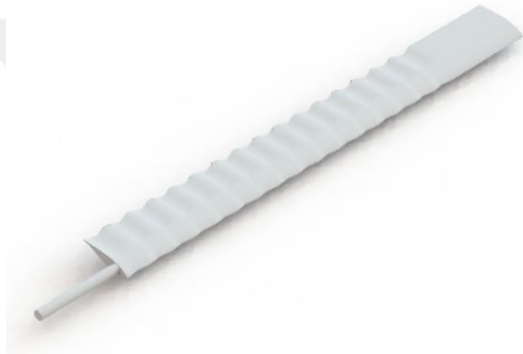
xxvi. Model-25



xxvii. Model-26



xxviii. Model-27



xxix. Model-28



xxx. Model-29



xxxi. Model-30

*Şekil 2.2.* Modifiyeli kanat modelleri

## 3. BÖLÜM

### SAYISAL VE İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

#### 3.1 Sayısal Yöntemler

Aerodinamik araştırlamalar üzerine yapılan çalışmalar imkan doğrultusunda deneysel ve/veya sayısal olarak yapılabilir. Deneysel alışmalar, özel deneysel ortamlar veya özel alanlar gerektirebilir. Aerodinamik araştırmalarda yapılan deneysel çalışmalar, rüzgar ya da su tüneli gibi düzenekler aracılığı ile yapılabilirken, sayısal çalışmalar bilgisayar destekli yapılmaktadır. Sayısal analiz yöntemlerine nazaran deneysel çalışmalar çok zahmetli ve pahalı düzenekler gerektirmektedir ve ortam sağlayıcıları (nem, basınç, sıcaklık vb.) deneysel çalışmada en büyük değişken parametrelerdir ki deney sayısını artırmaktadırlar. Bu sebeple birçok araştırmacı sayısal çalışmalara yönelmektedir. Sayısal çalışmalarda bilgisayar kapasitelerine göre paket programlar kullanılabilir gibi açık kaynaklı kodlarda kullanılabilir. Ek olarak, görünmez sıvı akışını ve ısı transferini görselleştirmek için simülasyon yazılımı kullanılabilir.

Tez boyunca yapılan tüm çalışmalar sayısal analizlere göre şekillendirilmiştir. Sayısal analiz için Erciyes Üniversitesi Teknopark içerisinde yer alan MSG Teknoloji Ltd. şti. bünyesinde mevcut lisanslı Cradle (ScFLOW) yazılımı kullanılmıştır.

#### 3.1.1 Cradle Yazılımı

Cradle CFD, kolay kullanımı, kullanıcı dostu, CFD görüntüleme ve simülasyonu için geliştirilmiştir. Akışkan ve termal problemleri için, problemler özelinde geliştirilmiştir ve

neticede otomotiv, havacılık, elektronik, inşaat, mimarlık, turbomakina, fan, denizcilik gibi çok çeşitli disiplinlere hizmet vermektedir.

Özellikle kullanıcılara, hareketli ağ uygulamalarında sabit mesh yeteneği, yüksek hızlı ağ örme kabiliyeti, çok çeşitli CAD dosyalarını içerisine alıp, işleme ve temizleme ve diğer kendi yazılım ailesi içerisindeki yazılımları ile ortak çalışabilmesi sebebiyle rahatlık sağlamaktadır.

Cradle problemler özelinde; ScFLOW, SC/Tetra, scSTREAM gibi hesaplamalı ısı-akış analiz yazılımları bulunmaktadır [56].

### **3.1.1.1 ScFLOW Yazılımı**

Karmaşık geometrileri yapısal olmayan ağ (unstructured mesh) ile kullanılarak doğru temsil etmeye yarayan yeni nesil CFD yazılımıdır. Her seviyedeki kullanıcılara hitap edebilmektedir ve kaliteli ağ örme, karmaşık modeller oluşturmaya yarayan ön hazırlık kısımları ile hızlı ve kararlı sonuçlar elde etmek için geliştirilmiştir.

Yazılımı ön plana çıkartan özellikleri şunlardır:

- Polyhedral mesh (Çok yüzlü, bal peteği modeli)
- Serbest yüzey
- Bağımsız hareketli mesh
- Serbestlik dereceli analizler
- Kaviteasyon
- Sıkıştırılabilir Akış
- Buharlaştırma/ Yoğunlaşma
- Ayrık Eleman Yöntemi (Discrete Element Method – DEM)
- Termoregülasyon Modeli (Jos)
- Co-Simülasyon (Kendi ailesi arasındaki yazılımlar ile ortak çalışabilme)

### 3.1.2 Türbülans Model Seçimi

Bugüne kadar geliştirilmiş olan bütün türbülans modellerinin kendilerine has üstünlükleri ve zaafıları mevcuttur ve hiçbiri her türlü probleme uygun olarak kabul edilemez. Bu sebeple herhangi bir mühendislik çalışmasında HAD çözümü için RANS/URANS yaklaşımları kullanılması düşünüldüğünde, üzerinde çalışılacak meseleye en uygun türbülans modelini seçebilmek de diğer pek çok değişken yanında büyük önem arz etmektedir.

Genel anlamda akışkan hareketleri, süreklilik, enerji ve Navier-Stokes denklemleri ile tanımlanır. Bu denklemler belirli kabuller yapılarak çözülmektedir. Navier-Stokes denklemleri zaman ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dönüştürülerek çözülmektedir. Navier-Stokes denklemlerinde yapılan bu ortalama zaman dönüşümü karşımıza yeni değişken parametreler çıkarmaktadır. Bu yeni oluşan parametreler türbülans değişkenleridir. Bu terimler denkleme yerleştirildiğinde türbülans modelleri ortaya çıkmaktadır.

### 3.1.3 LKE (Laminer Kinetik Enerji) $k-k_L-\omega$ Türbülans Geçiş Modeli

Tez çalışması boyunca yapılan sayısal çalışmalarda “ $k-k_L-\omega$ ” türbülans geçiş modeli kullanılmıştır. Düzgün bir akışta düz bir düzlemde, laminer sınır tabakasının kalınlığının, ön kenardan uzaklıkla orantılı olarak arttığı ve sınır tabakasının kenardan aşağı akış yönünde türbülanslı hale geldiği bilinmektedir [57].

Türbülanslı sınır tabakasının kalınlığı, laminer sınır tabakasından çok daha kalındır ve duvardaki cilt sürtünmesi, türbülanslı sınır tabakasında, laminer sınır tabakasına göre daha fazla artar. Bu nedenle, bir cismin etrafındaki akışın simülasyonunda geçişin yerini tahmin etmek önemlidir. Walters ve Lylek [58] tarafından önerilen LKE (Laminer Kinetik Enerji) modeli, geçiş akışını tahmin etmek için RANS (Reynolds-ortalımalı Navier-Stokes) tabanlı yaklaşımlardan biridir.

Geçiş pozisyonunun yukarı akışında, sınır tabakasında T-S dalgaları (Tollmien-Schlichting dalgaları) adı verilen iki boyutlu geçici bozulmalar bulunur. Bozukluklar yavaş yavaş gelişir ve üç boyutlu ve kararsız dalgalar haline gelir. Bu süreç türbülanslı

sınır tabakasına geçişin nedeni olarak kabul edilmektedir. LKE modelinde bir sınır tabakasının geçiş öncesi bölgesindeki bozucuların enerjisi "Laminer Kinetik Enerji ( $k_L$ )" olarak ifade edilirken türbülans kinetik enerjisi "k" olarak ifade edilir ve k ve  $k_L$ 'nin taşıma denklemi iki ayrı denklem ile çözülür [59].

Bu kısımda dikkat edilmesi gereken 2 husus vardır.

- Düşük Reynolds sayılı uyarlanabilir duvar işlevi, LKE modelinde mevcut değildir.
- Sınır tabaka geçişini tahmin etmek için  $y^+$ 'nin birden küçük olması tavsiye edilir.

Yapılan çalışmalara göre bu akış analiz metodu, türbülansa geçiş noktasında ve türbülansla birlikte oluşan çalkantılarını detaylı ele aldığından, düşük Reynolds sayılı akışkanlarda gerçeğe yakın sonuç verebilmektedir [7, 60, 61].

## 3.2 İstatistik Analiz Metotları

### 3.2.1 Taguchi Metodu

Herhangi bir üründe ve ürünün üretim aşamasında, kontrolü zor, denemesi zor ve maliyetli olan, değişkenlikleri çok fazla olan faktörlerin sistem için en uygun varyasyonlarını seçerek, ürün ve prosesdeki değişen unsurların en aza indirmeye çalışan deneysel tasarım metodudur [62]. Ürünlerin üretim kalitesinin artmasının yanında, farklı ürünlerin üretilip, kaliteli ürünün ortaya konulması için deneme yanılma sayısını azaltıp, maliyeti düşürme ve zamandan tasarruf etme açısından da kullanılmaktadır [62, 63].

Çalışma mekanizması Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.1. Taguchi metodu çalışma mekanizması [64]

Özellikle, kalıp sektöründe, metal ve döküm sektöründe, mekanik dişli tasarımlarında, hidrolik pozisyonlamalarda sayısal denetim çalışmaları yapılmakta ve kalite artırımları başarılı şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

### 3.2.2 Anova Analizi

Varyans Analizi (Analysis Of Variance) birden fazla bağımsız grubun bulunduğu ve bu gruplar içerisindeki verilerin ise grup ortalamalarında istatistiksel olarak bir fark olup olmadığı ve bu farkların hangisi üzerinde durulması gerektiği üzerine durmaktadır [65]. Veri yapısına ve çalışma tasarımına göre değişik modeller içerir [66]. Çeşitli örneklemelerin önemini test etmek adına, örnek hacmi büyüklüğü ve parametrelerin bilinme durumuna göre Z veya T test modellerini kullanmaktadır. Grup sayısı ikiden fazla olduğunda, değişimi etkileyen sebeplerin sayısı iki ve daha fazla ise Z ve T testleri işlemlerini kaybetmektedir. Bu durumda T testinin genişlemiş modeli ANOVA devreye girmektedir ve böylece bu değişimlerin sebebini anlama açısından kullanılmaktadır [67].

Varyans analizi farklı biçimlerde uygulanmaktadır ve bunlardan birkaçı aşağıdaki gibidir;

- Verilerin ortaya çıktığı ve elde edildiği deneme tipine,
- İçeriğinde bulunan faktör sayısına,
- Grupların birbirine bağıllığı konusuna,
- Ortak değişkenlerin bulunması durumuna göre[67],

## 4. BÖLÜM

### SAYISAL YÖNTEM

#### 4.1 Giriş

Bu bölüm, NREL Faz II rüzgar türbininde kullanılan kanatların (S809 kanat profiline sahip) kambur balina kanat uygulamasından esinlenilerek modifiye edilmesi sonucunda oluşturulan modellerin sayısal modellenmesini ve var olan hali ile karşılaştırılmasını içermektedir.

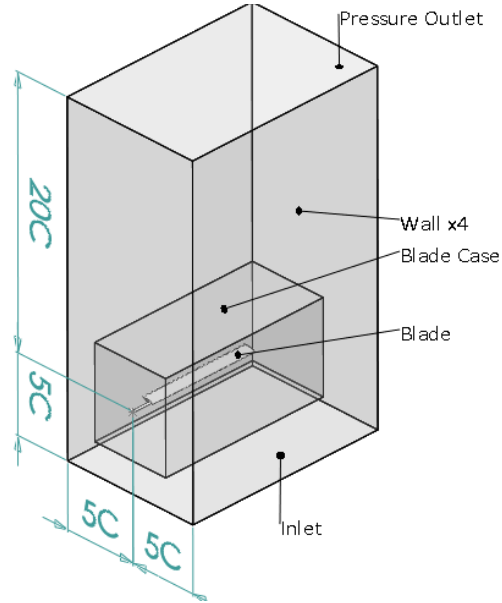
Sayısal modelleme içerisinde, en optimum kanat yapısını modelinin bulabilmesi adına oluşturulan 31 modelin (referans kanat dahil) üretim ve deney zahmetinden kaçınmak adına yapılmıştır. Sayısal modeller 3 boyutlu tasarımların, düşük Reynolds sayılı akışlarda türbülansa geçiş noktalarında performansını gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

#### 4.2 Akışkan Hacminin Belirlenmesi

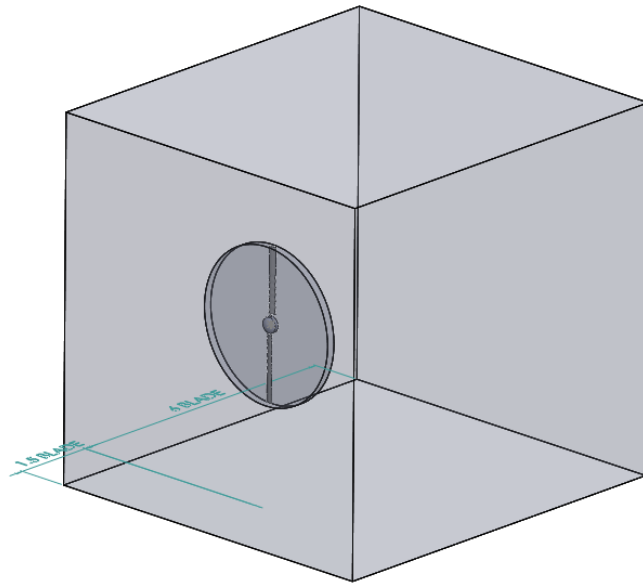
Gerçekleştirilen sayısal analizler, iki tür olarak yapılmıştır. Bunlar;

1. 31 ayrı modelin sabit (herhangi bir hareketin olmadığı) tutulduğu ve akış yönüne literatür içerisinde bildirildiği gibi gerçekleştirilmiş sonuçlar elde edilmiştir.
2. 31 ayrı modelden elde edilen sonuçlara göre, en verimli görünen kanat ile referans kanadın 71.68 rpm de döndürülerek 3 boyutlu sayısal analiz yapılmıştır.

Genç M.S. ve Ark. 2011 tarihinde yaptıkları çalışmada [68], akış hacminin olması gereken ölçülerini belirtmişlerdir. Çalışmaya göre, hücum kenarından akışkanın girdiği yüzeye (inlet) kadar  $10c$ , kanat hücum kenarından akışkanın çıkış yüzeyine (pressure outlet) kadar olan kısma  $20c$ , kanat kenarından üst ve alt duvar alanlarına da  $10c$  olmalıdır [68].



a) Sabit Kanatlar İçin Akış Alan Hacmi



b) Döner Kanatlar İçin Akış Alan Hacmi

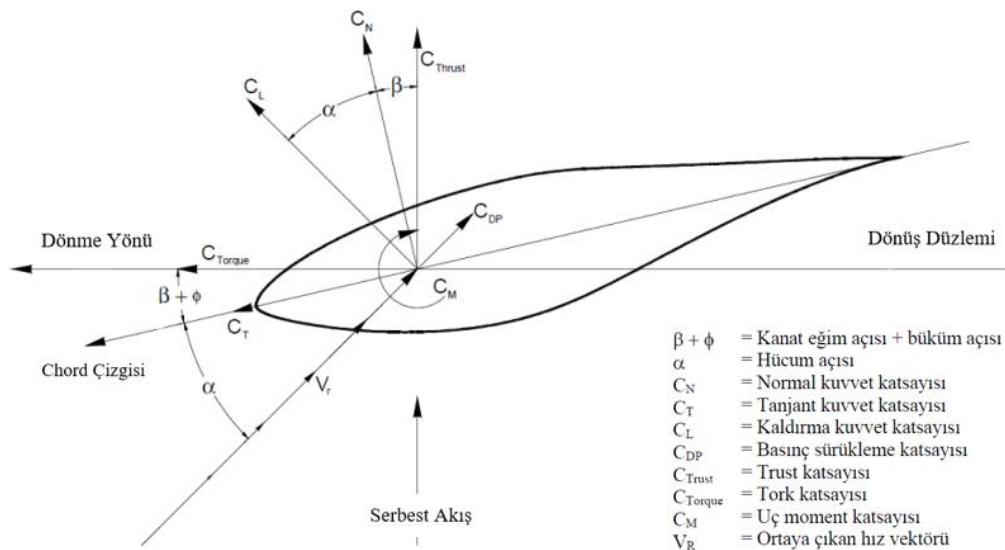
Şekil 4.1. Sabit (a) ve Döner Kanatlar (b) İçin Akış Hacimleri

Yapılan sayısal analizler, gerçek kanat span boyutlarında (5.023m) 3 boyutlu olarak gerçekleştirildiği için ağ sayısı çok fazla olmaktadır. Buna bağlı olarak 31 model için de seçilen akış hacimleri Şekil 4.1.a' da belirtildiği gibi, kanadın yan duvarlara olan uzaklığı 5C (Kanadın veter uzunluğunun 5 katı kadar), akış giriş noktasına 5C, akışkanın çıkış noktasına olan kısma ise 20C uzunluklarında ayarlanmıştır.

Şekil 4.1.b'de gösterilen döner kanat modellerinde ise akışkan hacimleri daha farklı ayarlanmıştır. 2 kanatlı model için, akışkan giriş noktasına 1.5 kanat boyu ( $5,023 \times 1,5 = 7,5342$  m) döner alanın yan duvarlara olan uzaklığı da 1.5 kanat boyu, akışkanın çıktığı alana uzaklığı ise, 6 kanat boyu uzaklığı ayarlanmıştır. Aksi halde çözüm süreleri ve diskte kaplayacak olduğu alanlar çok fazla artmaktadır.

### 4.3 Kanatların Konumlandırılması ve Ağ Örgüsü

Sayısal analizleri gerçekleştirilecek modellerin akış hacmine yerleştirilmesi Şekil 4.2'de belirttiği gibi yapılmıştır.



Şekil 4.2. Kanat modelinin sistem içerisinde konumlandırılması ve aerodinamik yük çevirme parametreleri [69]

Analizler gerçekleştirilirken oluşturulan ağ yapısının doğruluğunu/ yeterliliğini kontrol için deneysel veriler ile karşılaştırmak diğer bir değişle validasyon çalışması yapmak gereklidir.

Analiz parametrelerinde dikkat edilen hususlar Tablo 4.1’de verildiği gibidir.

Tablo 4.1. Analiz Kanat Konumlandırma Parametreleri [70]

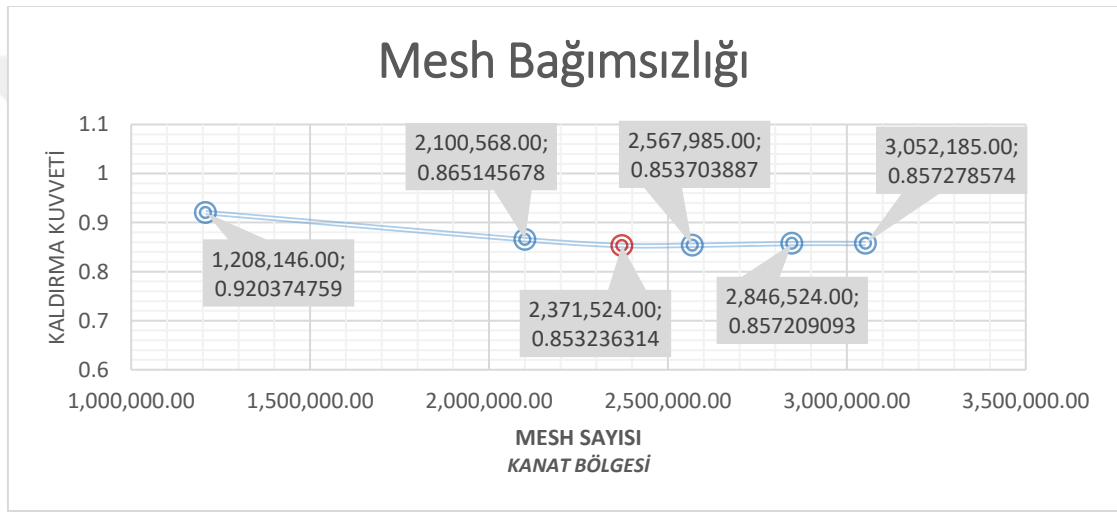
Kanat Kesit ve Planformu	NREL (Sabit Veter uzunluğu, Sabit burulma açısı)
Kanat Kök Hücüm Açısı	12 derece
Kanat Profili	NREL S809
Kanat Bükümü	Burulma Açısı Yoktur.
Analizde Kullanılan Akışkan Tipi	Hava ( $\rho = 1,206 \text{ kg/m}^3$ , Vizkozite = $1,83E-05 \text{ Pa.s}$ , $C_p = 1007 \text{ J/ (kg. K)}$ )
Akışkan Hızı	9,96 m/s

Akışkan hızı olarak belirlenen ve Tablo 4.1’de gösterilen 9,96 m/s, Butterfield ve Ark.’nın [70] S809 kanat profiline 1992 tarihinde Colorado State Üniversitesi’ndeki yaptıkları  $Re = 300,000$  sayılı deneysel veriler baz alınarak oluşturulmuştur. Ancak hesaplamalar doğrultusunda akışkan hızı 9,96 m/s baz alındığında sayısal modelimizin yaklaşık  $Re = 300,097$  olduğu görülmüştür.

Akışkan hızının belirlenmesinin ardından referans kanat baz alınarak mesh bağımsızlığı yapılmıştır ki bu da tüm modellerde uygulanmıştır. Mesh bağımsızlığı için kullanılan mesh sıklık tablosu Tablo 4.2 ve grafiği de Şekil 4.3’ de gösterilmiştir.

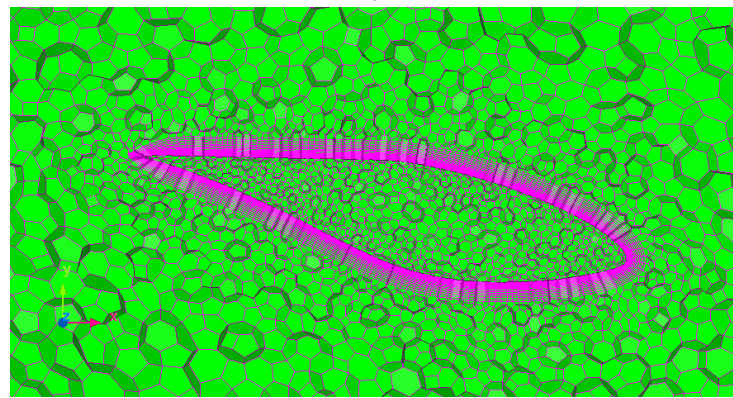
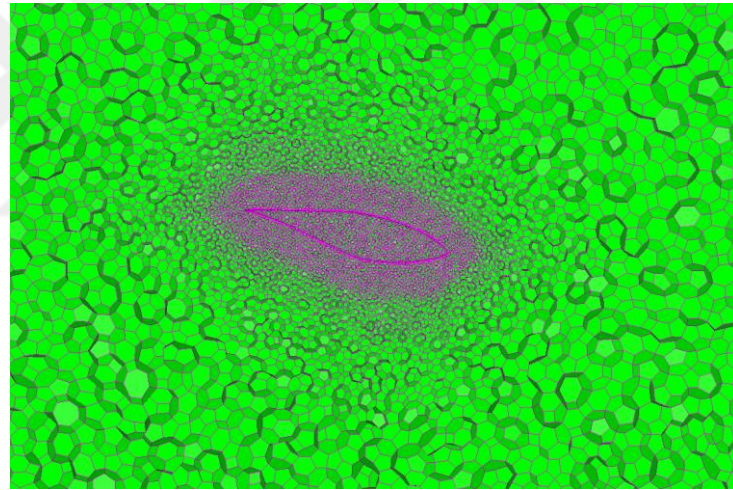
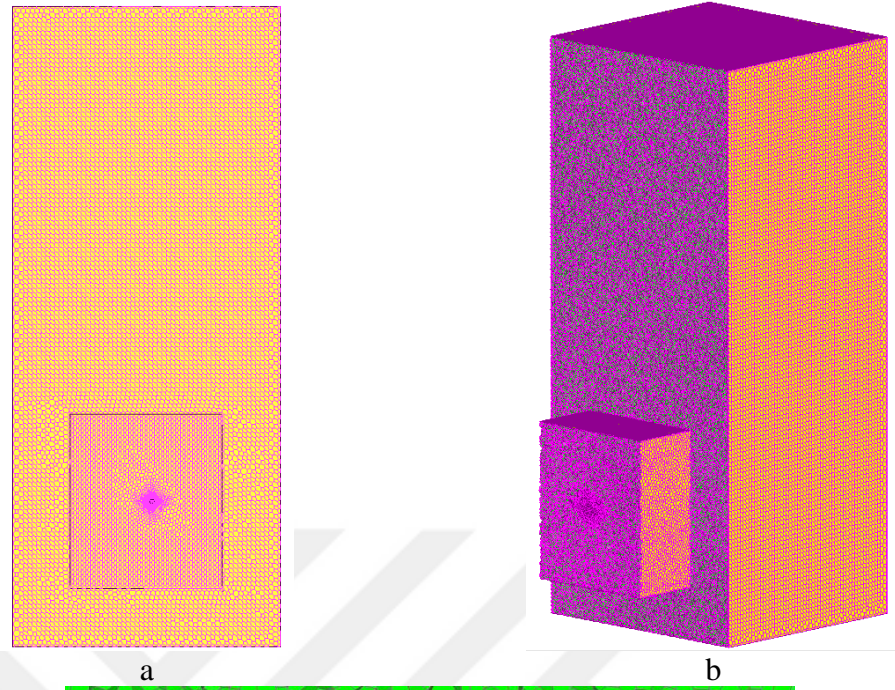
Tablo 4.2. Mesh Bağımsızlık Tablosu

Versiyon Numarası	CL	Mesh Sayısı (Kanat Bölgesi)
11	0.92037476	1,208,146.00
16	0.86514568	2,100,568.00
<b>13</b>	<b>0.85323631</b>	<b>2,371,524.00</b>
17	0.85370389	2,567,985.00
12	0.85720909	2,846,524.00
18	0.85727857	3,052,185.00



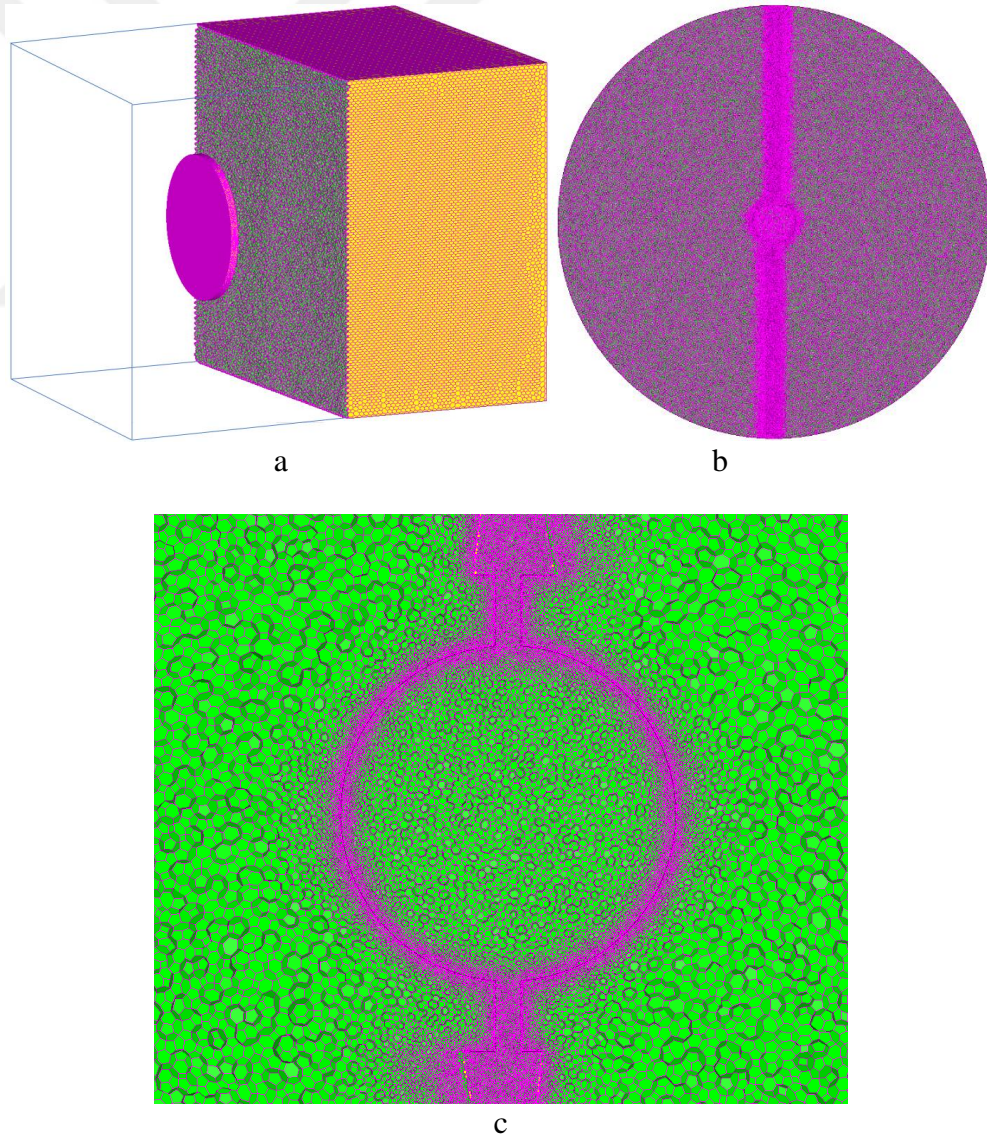
Şekil 4.3. Mesh bağımsızlığı çalışması

Tablo 4.3 ve Şekil 4.3' te gösterildiği gibi mesh bağımsızlığı için birçok sıklıkta yapılar denenmiştir ve aynı şartlar altında listelen ve sıklığı yaklaşık birbirine yakın olan ağ örgülerinin analiz sonuçlarına göre seçilmişlerdir. Mesh bağımsızlığına göre Versiyon-13 (1.515.320,00[serbest akış alanı] + 2.846.524,00[kanat çevresi hacmi] = 3.886.844,00 toplam mesh sayısı) sonrasındaki değişim çok fazla olmadığı için zamandan ve hesaplardan tasarruf etmek için diğer modellerde kullanılmak üzere seçilen mesh modeli olmuştur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kanat Modelleri Üzerinde Mesh Örgüsü ve Sınır Tabaka Kalınlığı (a-d)

Akışkan hızının belirlenmesinin ardından, sayısal akışkan dinamiğinde sınır tabaka etkilerinin irdelenmesi ve analiz sonuçlarının çözüme yakınması için sınır tabakada bunun ağ örgüsü oluşturmamız gerekmektedir. Modellerimiz üzerinde girinti ve çıkıntı fazla olduğu için bu ağ yapısını dikkatlice ve çok fazla oluşturmamız gerekmektedir. Kanat yüzeyinin hemen üstünden başlayan ağ yapısının ilk katının uzaklığı  $y^+$  ile belirlenir. Bu tez boyunca bu değer 1 kabul edilmiş ve  $Re=300,000$  için ayarlanmıştır. Kanat üstünde oluşturulacak tabaka kalınlığı ise Şekil 4.4.d’te görüleceği üzere her katta 1,2 kat artacak şekilde ayarlanmıştır. Sabit kanatların analizlerinin bitmesinden sonra, referans ve verimli modellerin dönerli kanat analizleri içinde Şekil 4.5’ te gösterildiği gibi ağ örgüsü tanımlanmıştır ve akış alan hacmi de Şekil 4.1.b’ de verilmiştir.



Şekil 4.5. Döner Kanat Akış Hacmi ve Kanat Bölgesi Mesh Örgüsü

## 5. BÖLÜM

### SONUÇLAR

#### 5.1 Giriş

Çalışma sürecinde yapılan sayısal analizler referans NREL Faz II türbin kanadı ve 30 adet modifiye edilmiş ayrı model olup toplamda 31 adet model üzerine yapılmıştır. Analiz şartları Tablo 4.1’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz boyunca Cradle-Sc-Flow yazılımı ve yazılım içerisinde yer alan LKE k-k<sub>L</sub>-w türbülansa geçiş modeli kullanılmıştır. Sayısal analizin ardından gerçekleştirilen istatistik analizi içerisinde parametre değişkenliklerini görmek için Taguchi ve Anova analizleri gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlar bölüm içerisindeki 5.2. ve 5.3 numaralı kısımlarda sunulmuştur.

#### 5.2 Sayısal Analiz Sonuçları

Kanat modelleri Şekil 4.2’de akış alanına yerleştirilmesi ile yürütülmüştür. Analizlere göre her kanadın kaldırma katsayısı, yaklaşık sürükleme katsayısı ve bunlara bağlı olarak, aerodinamik performans katsayıları olan L/D oranı ile  $C^3/C^2_d$  oranları irdelenmiştir. Tablo 5.1’ de görüleceği üzere her bir kanat modeli ve Base (Referans kanat) kısımlarına ait analiz sonuçları gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarında elde edilen  $F_{Trust}$  ve  $F_{Torque}$  kuvvetleri öncelikle  $C_{L1}$  ve  $C_{D1}$ ’yi hesaplamakta kullanılmış ardından, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi  $C_L$  ve  $C_D$ ’ye açısız dönüşümü sağlanmıştır. Bu açısız dönüşümde  $\alpha = 12^\circ$  alınmıştır ki bunun sebebi de NREL Faz II kanadının montaj aşamasındaki yerleşiminden kaynaklıdır.

Tablo 5.1. Sayısal Analiz Sonuçları

	$F_{Trust}$	$F_{Torque}$	Yüzey Alanı	$C_L$	$C_D$	L/D Aerodinamik Performans	$C_L^3/C_D^2$ Aerodinamik Performans
Model Numarası	(N)	(N)	A (m <sup>2</sup> )	Kaldırma Katsayısı	Sürüklenme Katsayısı	Referans Oran Farkları	Referans Oran Farkları
Referans	2,07E+02	5,25E+01	4,24E+00	8,34E-01	2,12E-01	3,93935538	12,9366588
1	1,92E+02	5,08E+01	4,00E+00	8,20E-01	2,17E-01	-3,998%	-9,338%
2	1,78E+02	4,43E+01	3,70E+00	8,20E-01	2,04E-01	1,901%	2,126%
3	1,85E+02	5,11E+01	3,91E+00	8,10E-01	2,23E-01	-7,914%	-17,606%

4	1,78E+02	4,71E+01	3,79E+00	8,02E-01	2,12E-01	-4,146%	-11,588%
5	1,79E+02	4,75E+01	3,84E+00	7,96E-01	2,11E-01	-4,412%	-12,763%
6	1,83E+02	5,04E+01	4,00E+00	7,83E-01	2,15E-01	-7,701%	-19,978%
7	1,90E+02	5,05E+01	3,97E+00	8,17E-01	2,17E-01	-4,659%	-10,962%
8	2,08E+02	5,69E+01	4,06E+00	8,74E-01	2,40E-01	-7,387%	-10,073%
9	1,92E+02	5,13E+01	4,01E+00	8,18E-01	2,18E-01	-4,902%	-11,269%
10	2,09E+02	6,05E+01	4,02E+00	8,89E-01	2,57E-01	-12,297%	-17,941%
11	1,92E+02	4,74E+01	3,97E+00	8,26E-01	2,04E-01	2,568%	4,183%

12	1,88E+02	4,94E+01	3,97E+00	8,10E-01	2,13E-01	-3,469%	-9,505%
13	1,85E+02	5,05E+01	3,93E+00	8,04E-01	2,20E-01	-7,167%	-16,928%
14	1,83E+02	5,02E+01	3,89E+00	8,07E-01	2,21E-01	-7,316%	-16,865%
15	1,77E+02	4,80E+01	3,84E+00	7,88E-01	2,13E-01	-6,200%	-16,854%
16	1,97E+02	5,25E+01	4,12E+00	8,16E-01	2,18E-01	-4,895%	-11,463%
17	1,95E+02	5,04E+01	4,09E+00	8,15E-01	2,11E-01	-1,782%	-5,732%
18	1,96E+02	5,42E+01	4,08E+00	8,23E-01	2,27E-01	-8,045%	-16,489%
19	1,74E+02	4,64E+01	4,06E+00	7,31E-01	1,95E-01	-5,007%	-20,913%

20	1,73E+02	4,60E+01	4,04E+00	7,31E-01	1,95E-01	-4,626%	-20,210%
21	1,91E+02	5,38E+01	3,88E+00	8,42E-01	2,37E-01	-9,987%	-18,168%
22	1,90E+02	5,34E+01	3,97E+00	8,20E-01	2,30E-01	-9,614%	-19,664%
23	1,97E+02	5,27E+01	4,09E+00	8,23E-01	2,20E-01	-5,233%	-11,354%
24	1,76E+02	4,09E+01	3,89E+00	7,75E-01	1,80E-01	9,282%	10,966%
25	1,78E+02	4,72E+01	3,86E+00	7,87E-01	2,09E-01	-4,498%	-13,912%
26	1,98E+02	5,21E+01	4,13E+00	8,19E-01	2,16E-01	-3,570%	-8,621%
27	1,99E+02	5,62E+01	4,09E+00	8,30E-01	2,35E-01	-10,165%	-19,634%

28	2,02E+02	4,83E+01	4,03E+00	8,55E-01	2,05E-01	5,899%	15,029%
29	1,95E+02	4,07E+01	4,06E+00	8,21E-01	1,71E-01	21,745%	46,022%
30	1,90E+02	4,63E+01	4,04E+00	8,03E-01	1,96E-01	4,075%	4,369%

Tablo 5.1’de görüldüğü üzere, kaldırma katsayısı olan  $C_L$ ’nin hesaplanmasında kullanılan  $F_{Trust}$  değerinin referans (base) kanat modelinde en fazla, modifiye edilen kanatlarda daha az olduğu görülmüştür. Ancak her model, dizaynından kaynaklı farklı yüzey alanlarına sahip olması  $C_L$ ’nin modifiye edilmiş modellerin birkaçında daha fazla çıkmasına sebep olmuştur. Buna ek olarak sürüklenme katsayısına etki eden  $F_{Torque}$  değerinin ise, modifiye edilen çoğu modelde daha düşük çıkması,  $C_D$  değerinin daha düşük yani daha az sürüklemenin olduğunu göstermektedir. Hesaplanan  $C_L$  ve  $C_D$  değerlerinin ardından, havacılık ve rüzgar enerjisi bakımından verimlilik ifadesi olan  $L/D$  oranı ile  $C^3_L/C^2_D$  oranları hesaplanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen,  $C_L$  değerinin; Referans Model’de 8,34E-01, Model-8’de 8,74E-01, Model-10’da 8,89E-01, Model-21’de 8,42E-01, Model-28’de 8,55E-01 olduğu gözlemlenmiştir. Referans kanada göre Model-10’da 1,066 artış ile bu değer en fazla olduğu görülmüştür.

$C_D$  değerinde ise; Referans Model’de 2,12E-01, Model-2’de 2,04E-01, Model-4’te 2,12E-01, Model-5’te 2,11E-01, Model-11’de 2,04E-01, Model-17’de 2,11E-01, Model-20’de 1,95E-01, Model-24’te 1,80E-01, Model-25’te 2,09E-01, Model-28’te 2,05E-01, Model-29’da 1,71E-01 ve Model-30’da 1,96E-01 olduğu görülmektedir. Bu değer Referans kanada göre yaklaşık %21’ düşüş ile Model-29’da olduğu gözlemlenmiştir. Bu düşüş bu modelde sürtünme katsayısının azalabildiğini göstermiştir.

Dikkat edilirse, modeller arasında  $C_L$ ’nin arttığı modeller arasında  $C_D$ ’nin azaldığı modeller ya da tam tersi durum mevcut değildir. Sadece modeller arasında, Model-28’de bu durum istisna (kaldırma katsayısı artarken, sürüklenme değeri de azalmıştır) olmuştur. Modellerin durumlarına göre farklı türden sonuçlarında verim artış/azalışı oluşmaktadır.

$L/D$  değeri analiz edildiğinde ise; Referans Kanat’ta 3,94 olan bu değer, Model-2’de 4,01, Model-11’de 4,04, Model-24’te 4,30, Model-28’de 4,17, Model-29’da 4,80, Model-30’da ise 4,10 olarak gözlemlenmiştir. Referans kanada göre Model-29’da  $L/D$  değerinin 1,22 kat arttığı gözlemlenmiştir.

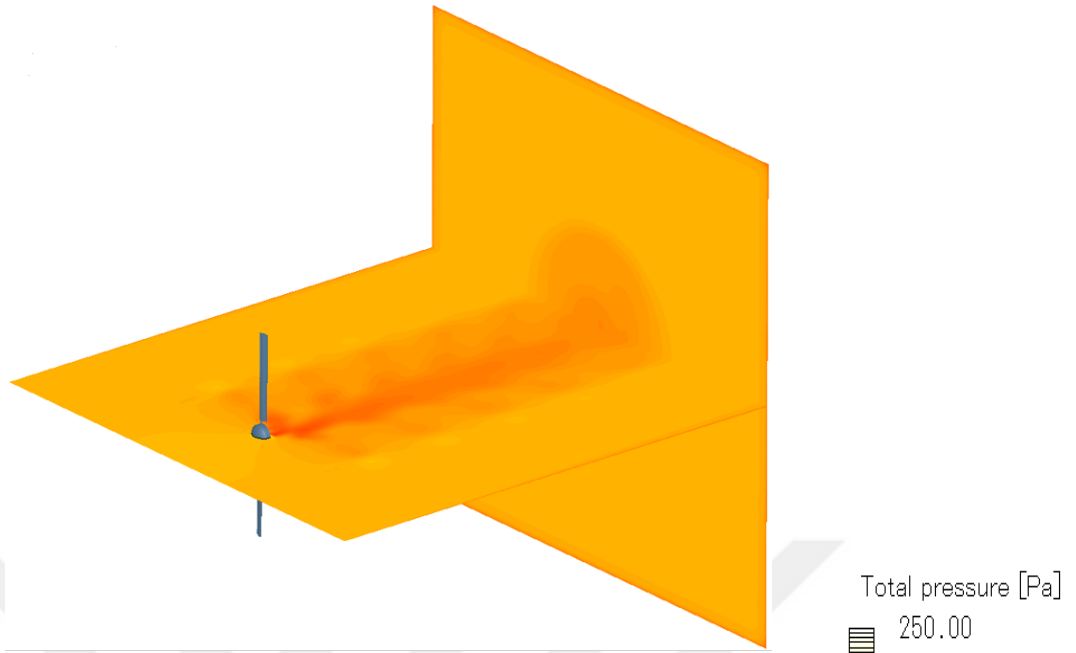
$C^3_L/C^2_D$  oranları ise  $L/D$  değerinde var olan artışla birlikte eşdeğer olacağı aşikardır ancak sayısal olarak değiştiği için bu değer; Referans Kanatta 12,94, Model-2’de 13,21, Model-11’de 13,48, Model-24’te 14,36, Model-28’te 14,88, Model-29’da 18,89, Model-

30' da ise 13,5 olduğu görülmektedir ki Model-29 da bu değerin yaklaşık %46 artabileceği hesaplanmıştır. Yapılan analizlere bağlı olarak sayısal değerler incelendiğinde Model-28, Model-29 ve Model-30 da genel verim aşamasında istikrarlı şekilde arttığı görünüyor. Analiz sonuçlarının ardından Model-29 en fazla verim artırıcı olduğu görülmüş ve buna bağlı tam sistemin döner kanatlı analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına ait veriler Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

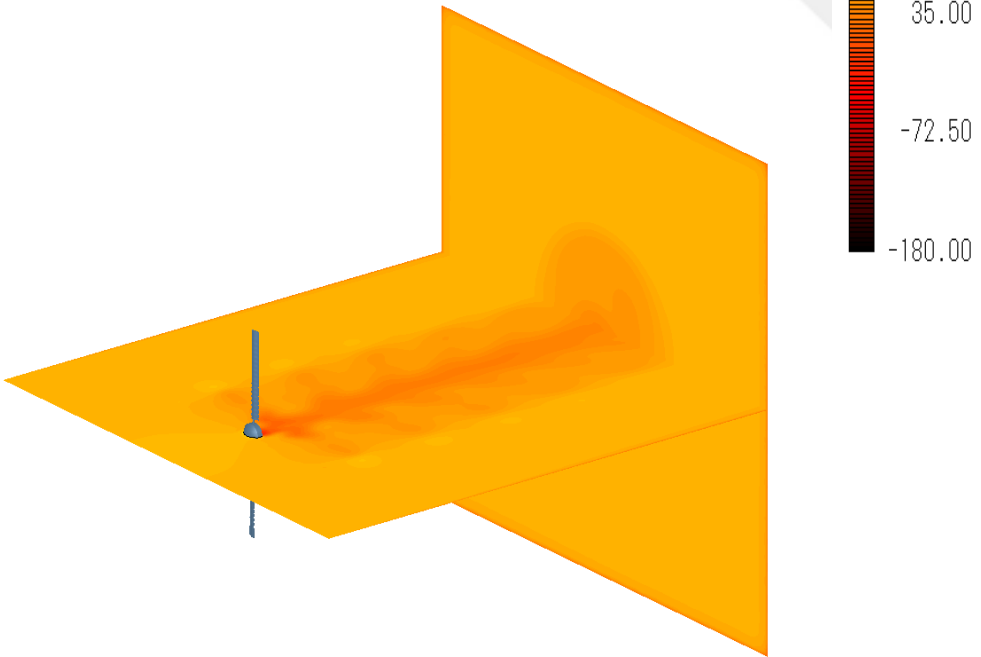
Tablo 5.2. Döner Kanat Analiz Sonuçları

	<b>F<sub>Trust</sub></b> <b>(N)</b>	<b>F<sub>Torque</sub></b> <b>(N)</b>	<b>Yüzey</b> <b>Alanı</b> <b>(m<sup>2</sup>)</b>	<b>L/D</b>		<b>C<sub>L</sub><sup>3</sup>/C<sub>D</sub><sup>2</sup></b>	
Referans Model	1,30 E+03	1,34 E+01	1,09 E+01	97,193		19.276,83	
Model 29	1,19 E+03	6,99 E+00	1,05 E+01	170,073	74,98%	55.912,22	190,05%

Yukarıdaki Tablo 5.2'te yer alan analiz sonuçlarına göre, Model-29'da kaldırma kuvvetinin oluşturulan %5,4 kadar düştüğü ve 1,93 olduğu görülmektedir. Ancak tasarımdan kaynaklı sürüklenme kuvvetinin ise Referans (Base) modele göre yaklaşık %46 iyileşme olduğu ve 1,14E-02'ye düştüğü anlaşılmıştır. Bu sonuçlar neticesinde hesaplanan aerodinamik performans katsayılarında ise, L/D'nin 97,19'dan 170,07'ye, C<sub>L</sub><sup>3</sup>/C<sub>D</sub><sup>2</sup> 'nin ise 19.276,83' ten 55.912,22' ye çıktığı ve yaklaşık bunlarında sırasıyla L/D'de %74 ve C<sub>L</sub><sup>3</sup>/C<sub>D</sub><sup>2</sup> 'de ise 2,9 kat arttığı gözlenmiştir. Bu artışın etkisiyle basınç alanı ve hız alanında ki değişimler aşağıdaki şekillerde verilmektedir.

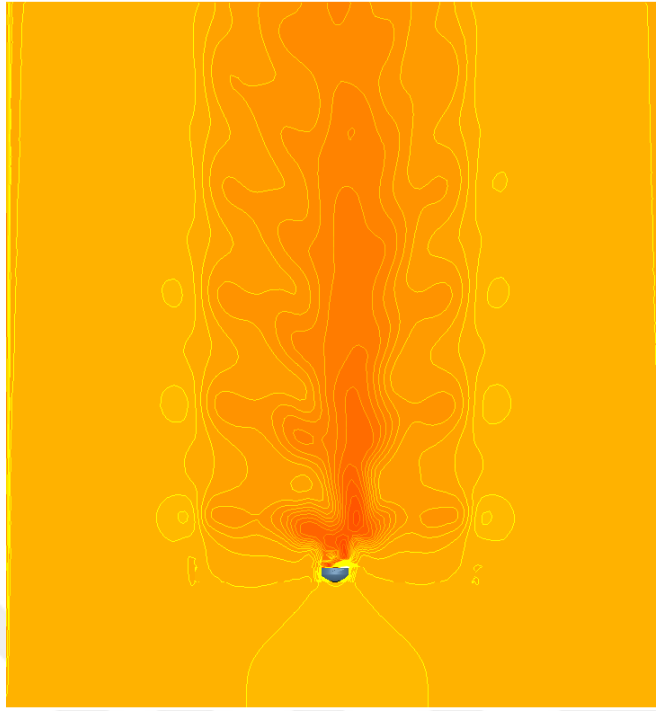


a. Referans Türbin Döner Kanat Simetri Toplam Basınç Dağılımı

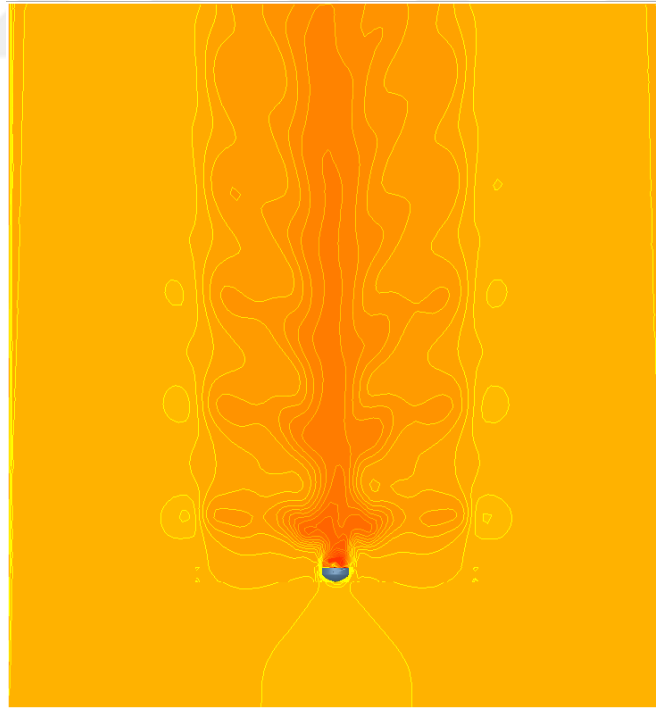


b. M-29 Döner Kanat Simetri Toplam Basınç Dağılımı

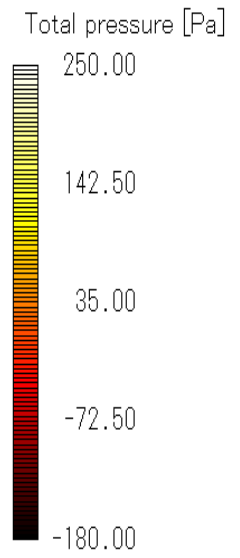
Şekil 5.1. Döner Kanat Simetri Toplam Basınç Dağılımı



a. Referans Türbin Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı



b. M-29 Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı

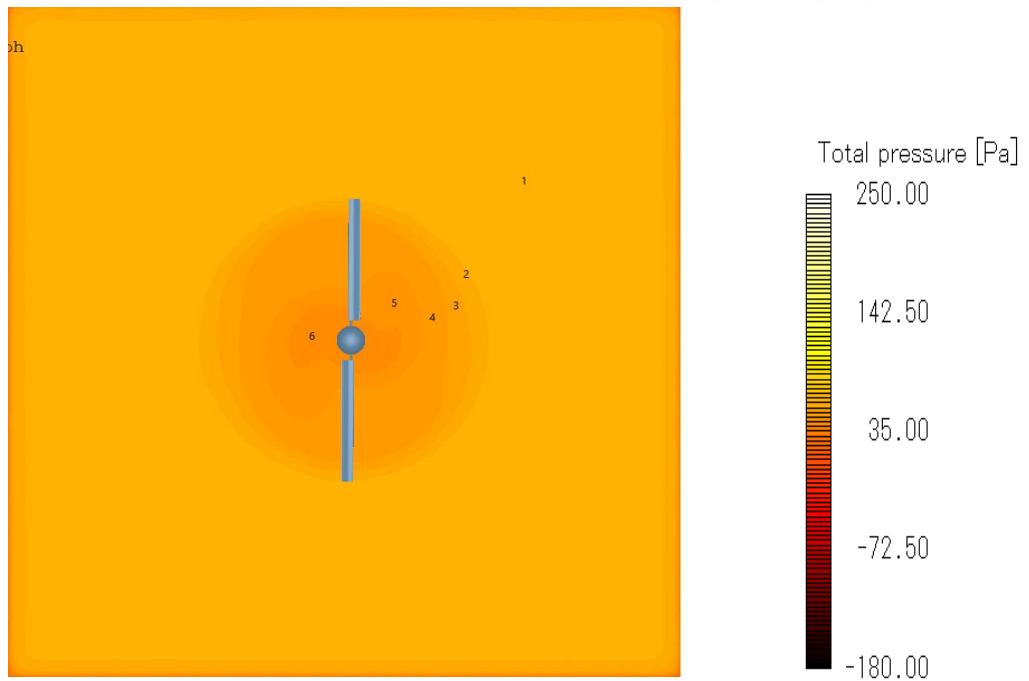


Şekil 5.2. Döner Kanat, Kanat Merkez Bölümünün Art İz Toplam Basınç Dağılımı

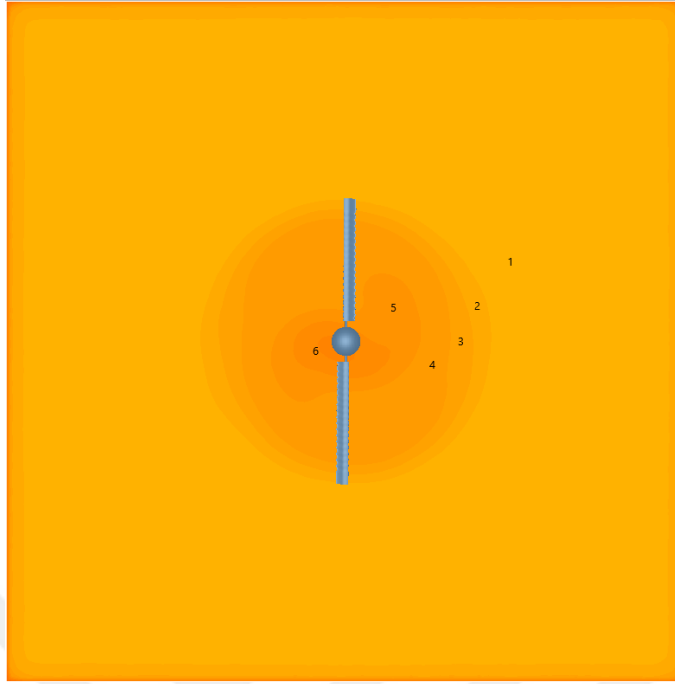
Referans Kanat ve Model-29 modifiyeli kanadın 71.9 8rpm hızda dönüşlerinin ardından 2,5 saniye sonra oluşturdukları akış alanına etkilerinin basınç dağılımı Şekil 5.1'de görülmektedir.

Tablo 5.1' de analiz sonuçlarına göre görüleceği üzere modifiyeli kanat üzerinde sürtünme kuvvetinin azalması kanat arkası akış alanının da düzenli forma ve art iz bölgesinde oluşan etkinin azalmaya başladığı görülmektedir. Özellikle Şekil 5.2.b'den anlaşılacağı üzere Model-29 ile kanat arkasında oluşan türbülans büyüklüğünün küçülmeye başladığı ve etkisinin de ilk 20 metrelik alan içerisinde referans kanat sonuçlarına (Şekil 5.2.a) göre azalmaya başladığı görülmektedir.

Şekil 5.3 içerisinde yer alan Modifiyeli kanat ardında (20 metre gerisinde) oluşan basınç dağılımında, numaralandırılan bölgelerin alanının küçüldüğü özellikle, 6 ile numaralandırılan basınç alanının en az olduğu (etkisinin büyük olduğu) bölgenin küçülmeye başladığı, bu da türbin arkasında oluşacak olan türbülanslı alanın daha erken etkisinin kaybetmesine sebep olacağı anlaşılmaktadır.



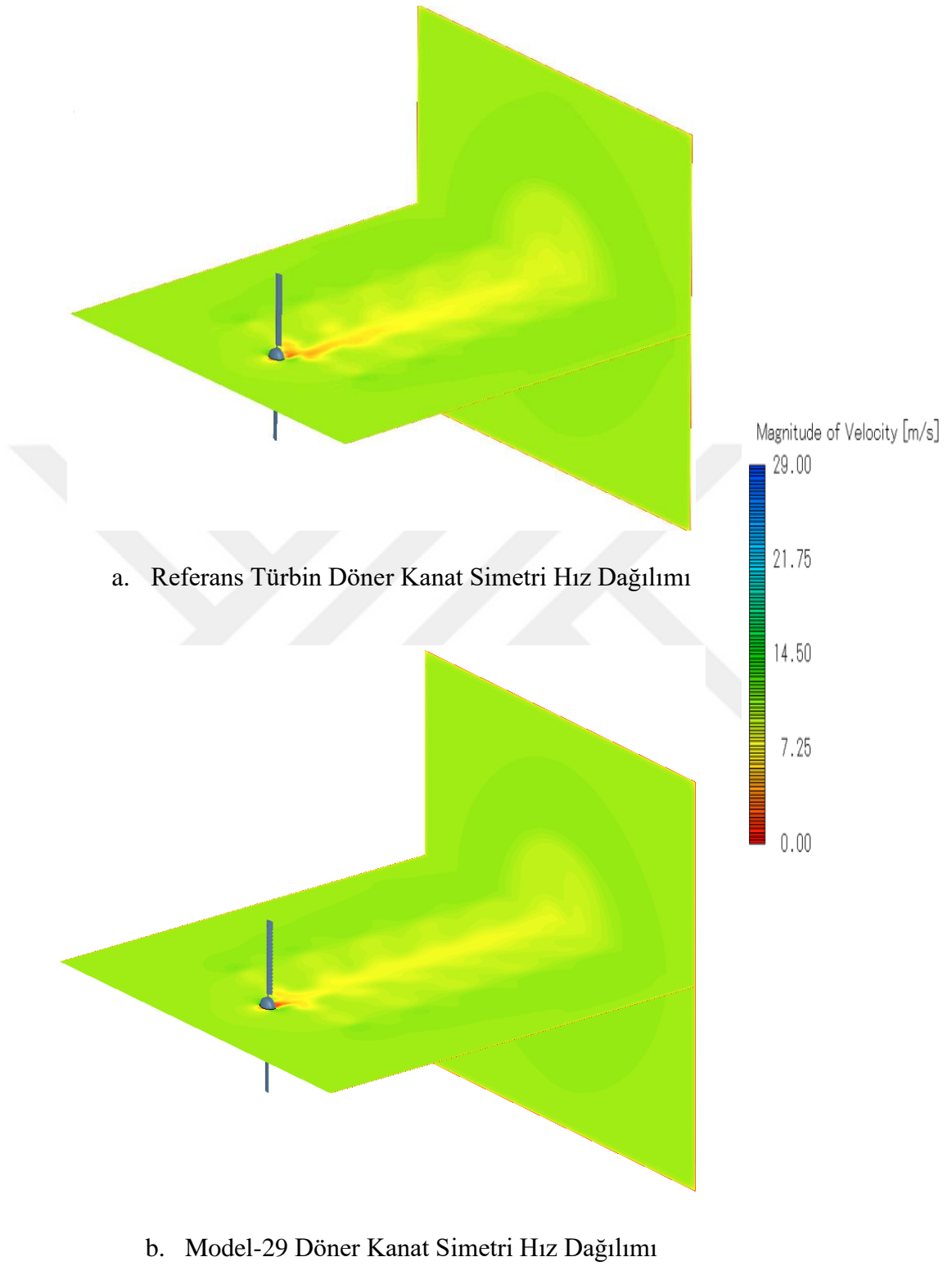
a. Referans Türbin Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı



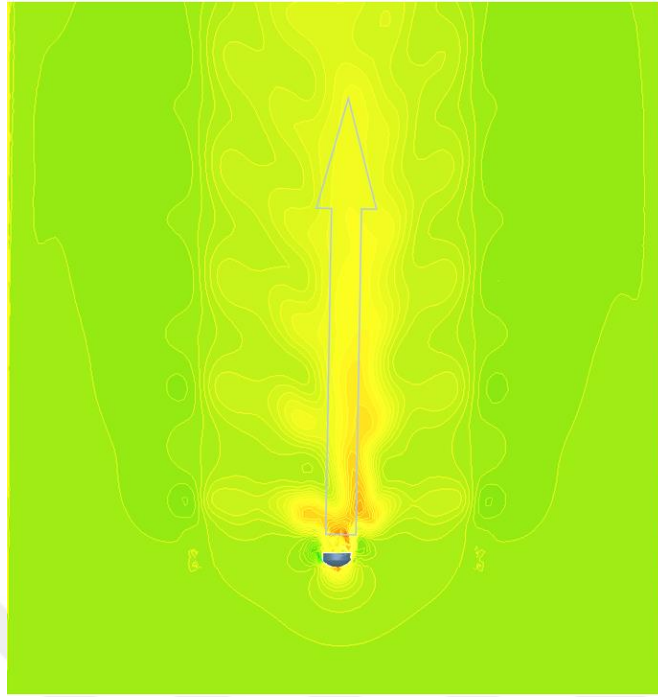
b. M-29 Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı

Şekil 5.3. Döner Kanat Art İz Bölgesi Toplam Basınç Dağılımı – 20 metre

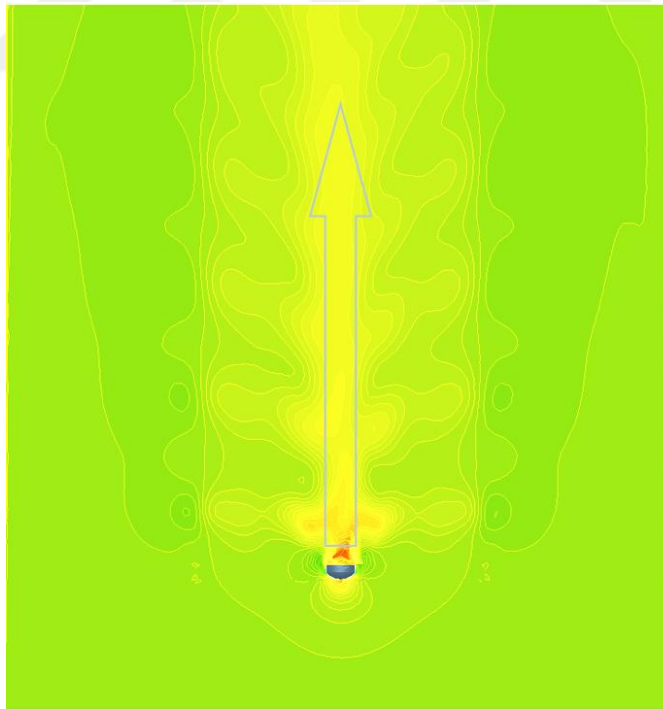
Şekil 5.3'te ki basınç genel dağılımının ardından düşük basınç alanlarında hızın yüksek olacağı aşikardır ki bu Şekil 5.4'te de hız dağılımı görülmektedir. Özellikle akış formunun referans kanat bölgesinde merkez çizgisinden saptığı ve türbülanslı bölgenin türbin merkezinden uzaklaştığı görülmektedir. Bu etkinin modifiyeli kanat tipi ile merkez çizgisi boyunca kaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te akış alanı içerisinde basınç düşüşü ile meydana gelen bölge içerisinde ki hızın artması durumunun da erken form değiştirdiği bu da etkisinin azalmaya başlayacağını göstermektedir.



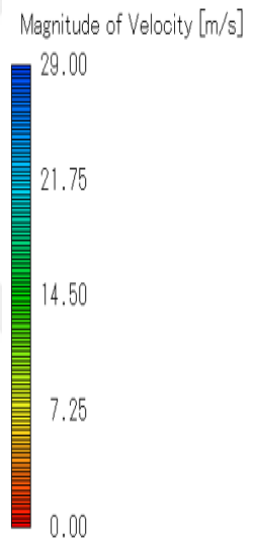
Şekil 5.4. Döner Kanat Simetri Hız Dağılımı



a. Referans Türbin Döner Kanat Hız Dağılımı

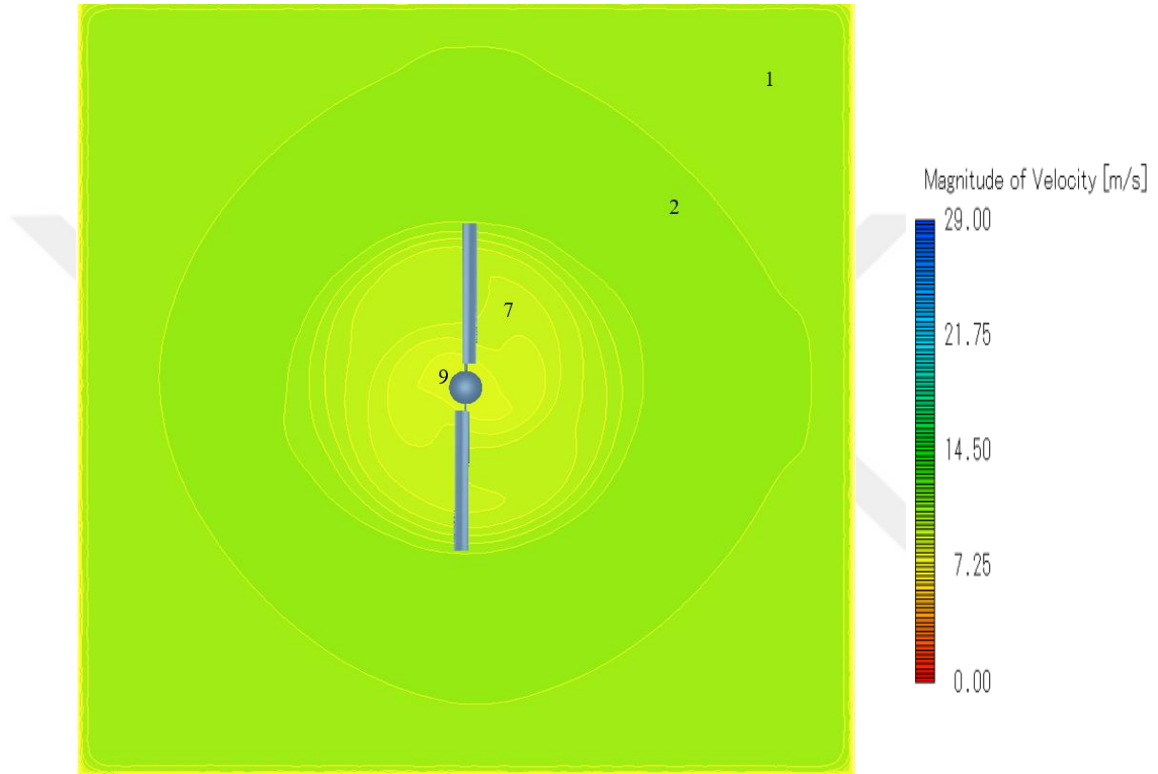


b. M-29 Döner Kanat Toplam Hız Dağılımı

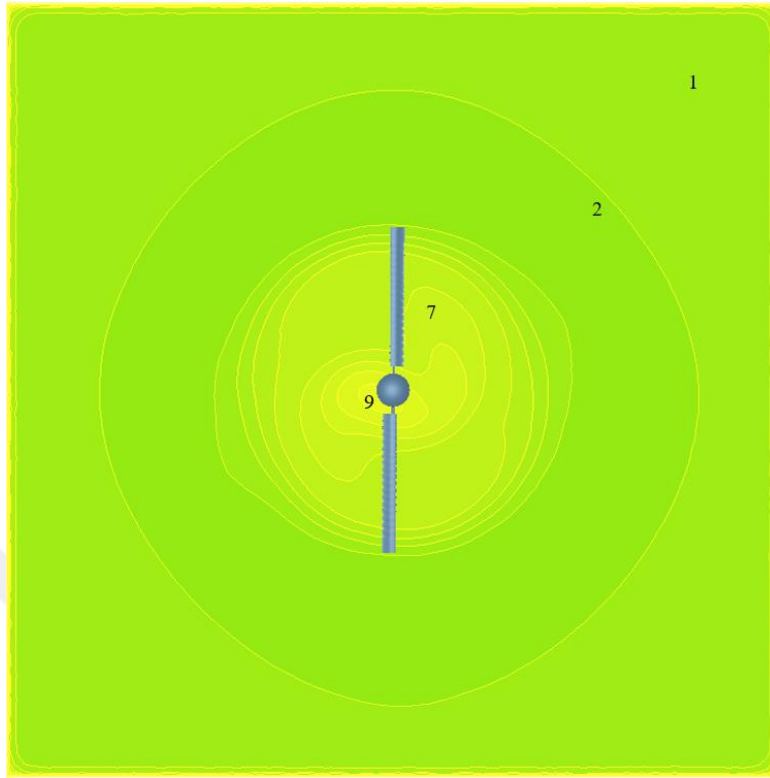


Şekil 5.5. Döner Kanat – Kanat Merkez Bölümün Art İz Hız Dağılımı

Şekil 5.6' dan da görüleceği gibi, türbinin 20 metre arkasında türbülanslı bölgelerin etki alanları görülmektedir ki, Referans kanadın ki merkez çizgisinin dışına çıktığı ve Modifiyeli kanat ile bu etkinin eksildiği ve Şekil 5.6 içerisinde numaralandırılmış bölgelerden, 9'nolu bölgenin (hızın yüksek olduğu bölgenin) de küçüldüğü görülmektedir.



a. Referans Türbin Döner Kanat Hız Dağılımı



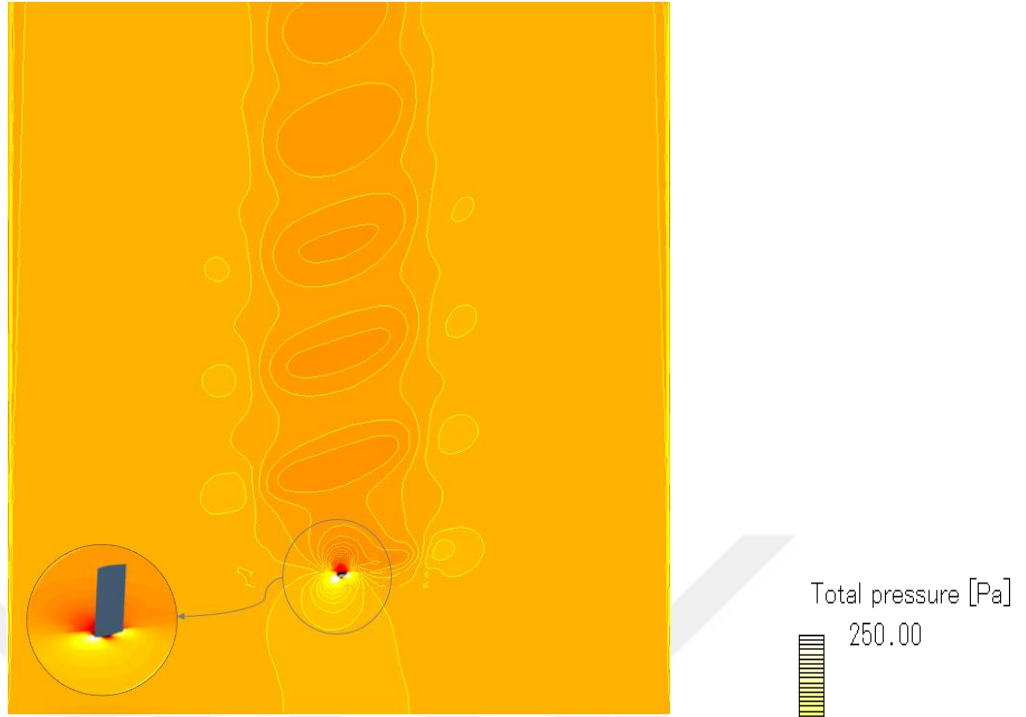
b. M-29 Döner Kanat Toplam Hız Dağılımı

Şekil 5.6. Döner Kanat Art İz Bölgesi Hız Dağılımı – 20 metre

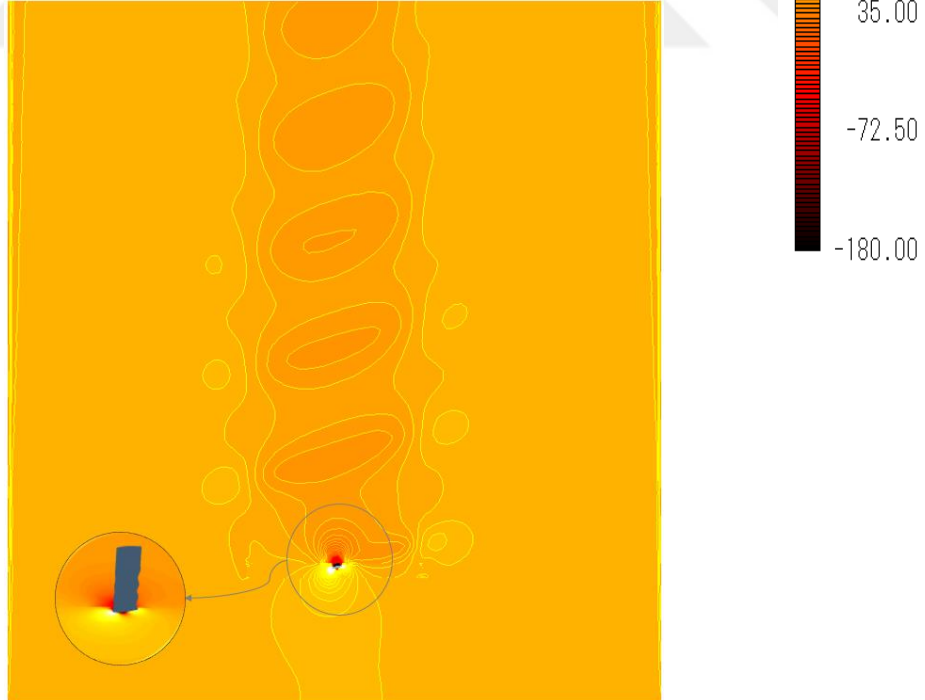
Analizlerde 2,5 saniye sonrası türbin kanatlarının dönmesiyle oluşturdukları art izlerini ve kanat çevresinde akış karakteristiğini görmek için kanatların farklı düzlemlerinde, basınç ve hız dağılımları alınmıştır ki, bu bölgeler;

- Kanadın %25'lik kısmı,
- Kanadın %50'lik kısmı,
- Kanadın %75'lik kısmı

şeklindedir.

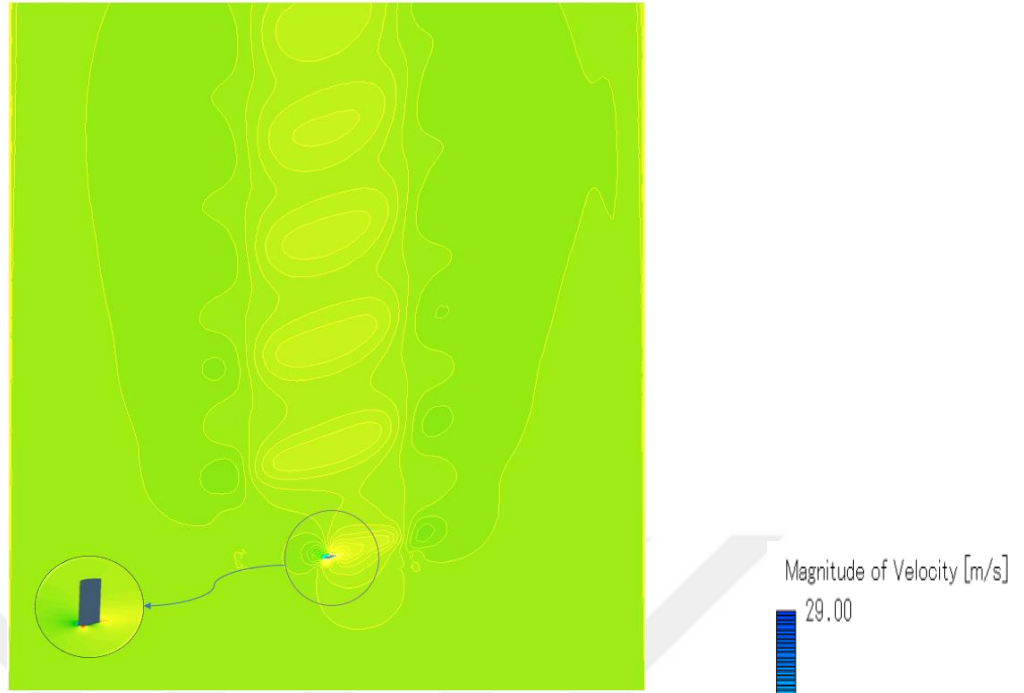


a. Referans Türbin Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı

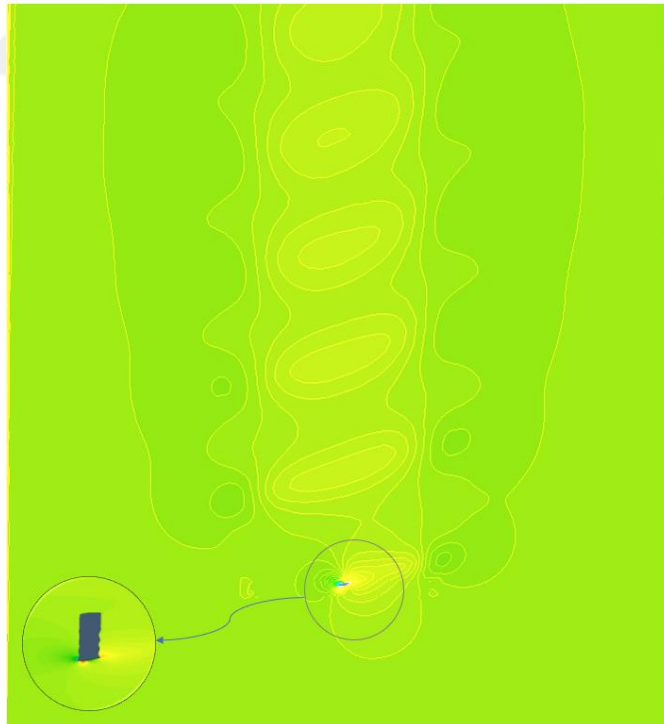


b. M-29 Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı

Şekil 5.7. Döner Kanat – Kanat %75'lik Bölümün Art İz Toplam Basınç Dağılımı



a. Referans Türbin Döner Kanat Hız Dağılımı



b. M-29 Döner Kanat Hız Dağılımı

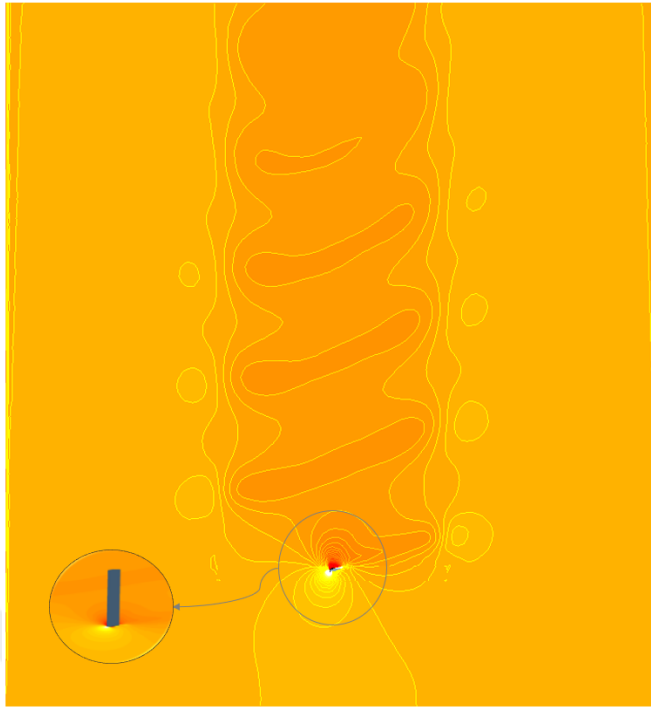
Şekil 5.8. Döner Kanat – Kanat %75'lik Bölümün Art İz Hız Dağılımı

Kanatların hareketi ile birlikte kanatların art iz bölgelerinde oluşturdukları basınç ve hız dağılımlarının, kanadın %75'lik kısmında ki görüntüleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8' de olduğu gibi oluşmaktadır. Şekil 5.7'de referans kanat ve modifiyeli model görüntülerinde işaretlenen alanlardan da anlaşılacağı üzere, modifiyeli kanat ile düşük basınç alanının daha erken yok olmaya başladığı, iz bölgesi (veya gölgeleme etkisinin) azaldığı ve basıncın arttığı gözlenmektedir.

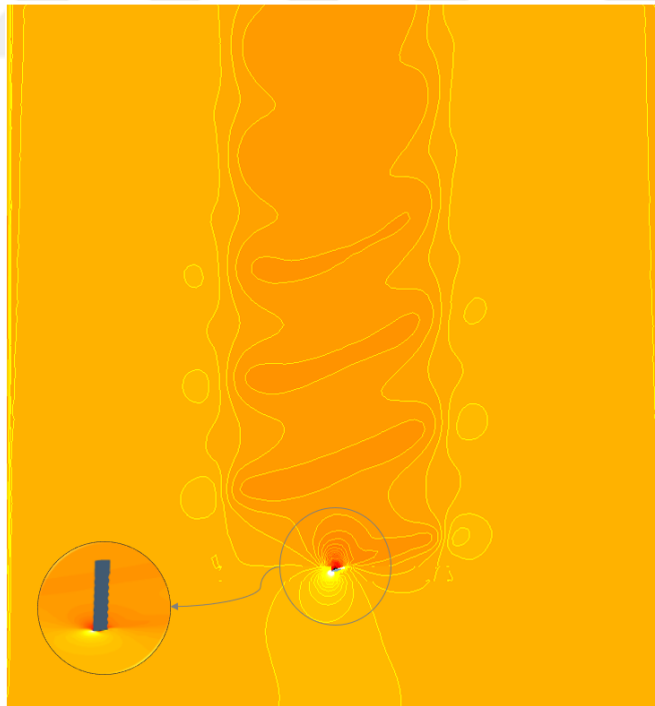
Şekil 5.8'de referans kanat art iz bölgesinde %75'lik kısmın basıncının artmaya başladığı ve hızın düşmeye başladığı alanlar şekillerle gösterilmiştir. Bu hızın azalması, art iz bölgesinde türbin arkası türbülanslı bölgenin daha erken etkisini kaybetmesi yani gölgeleme etkisinin azaldığı anlamına gelecektir. Gölgeleme etkisinin azalması da rüzgar türbinlerinin mikro yerleştirilmesi (micro-siting) esnasında önemli bir avantaj oluşturacaktır.

Model-29 ile birlikte, kanat arkasında oluşan türbülanslı bölgede basıncın arttığı (hızın azaldığı) ve bu basınç alanının da hacminin küçüldüğü kanadın %50'lik kısmında daha net bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Şekil 5.9' da kanadın %50'lik kısmının basınç dağılımı ve 5.10' da kanatların %50'lik kısmının basınç değişimine bağlı akışkan hız dağılımı görülebilmektedir. Şekil 5.9' da görüleceği üzere, referans kanat ardında oluşan düşük basınç hacminin referans kanat içerisinde yüksek basınç alanına geçmeye başladığı şekil içerisinde işaretlenen alanlarda gösterilmektedir.

Özellikle, Şekil 5.10 üzerinde kanadın yarısından alınan düzlemde görüldüğü gibi, referans kanadın ardında oluşan, 10 m/s normal akışkan hızının üzerinde ki bölgenin hacmi, Model-29 ile azaldığı, etki alanının küçüldüğü görünmektedir. Çember içerisine alınan, yaklaşık 8m/s hız alanları, referans kanat arkasında ki hız bölgesinde daha büyük, Model-29 ardında ki alanın daha küçük ve 10 m/s' ye hıza daha yakın olmaya başladığı anlaşılmaktadır. Bu durum akışkanın etki alanından düzgün forma daha çabuk geçeceğini göstermektedir.

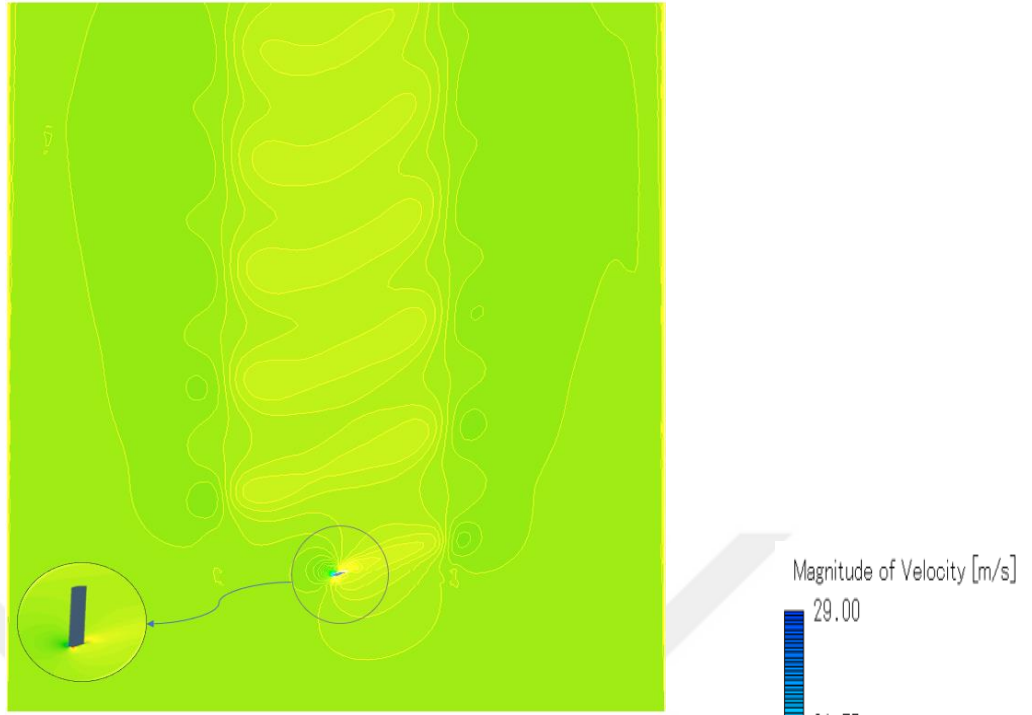


a. Referans Türbin Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı



b. M-29 Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı

Şekil 5.9. Döner Kanat – Kanat %50'lik Bölümün Art İz Toplam Basınç Dağılımı



a. Referans Türbin Döner Kanat Hız Dağılımı

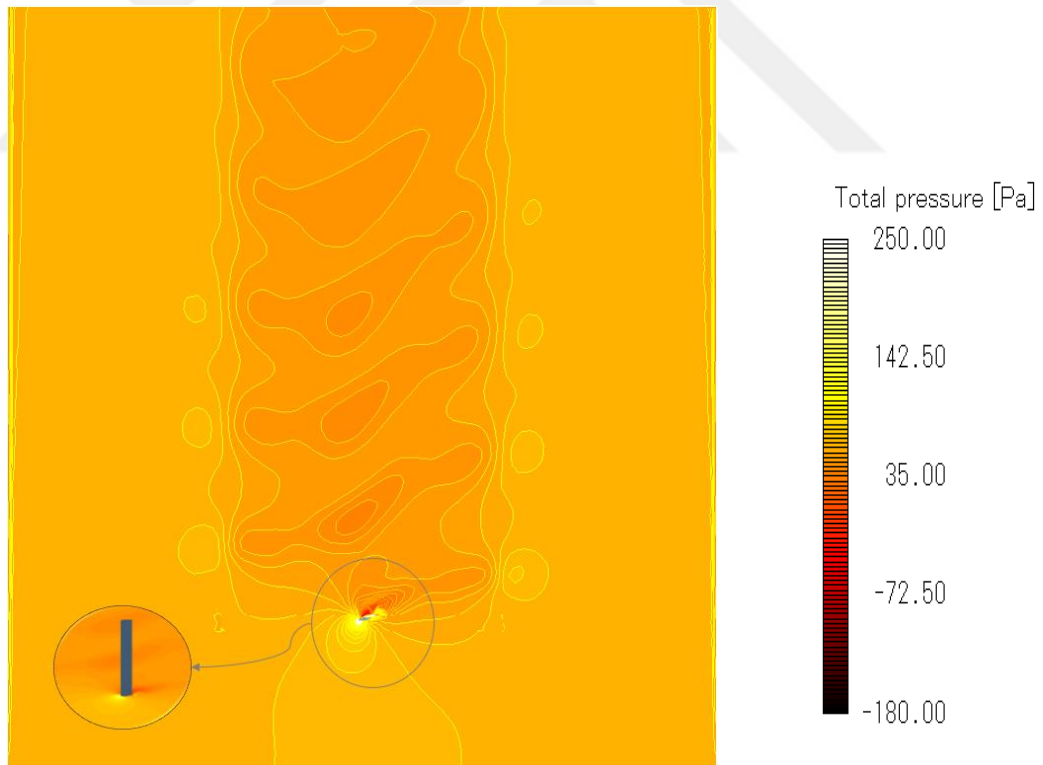


b. M-29 Döner Kanat Hız Dağılımı

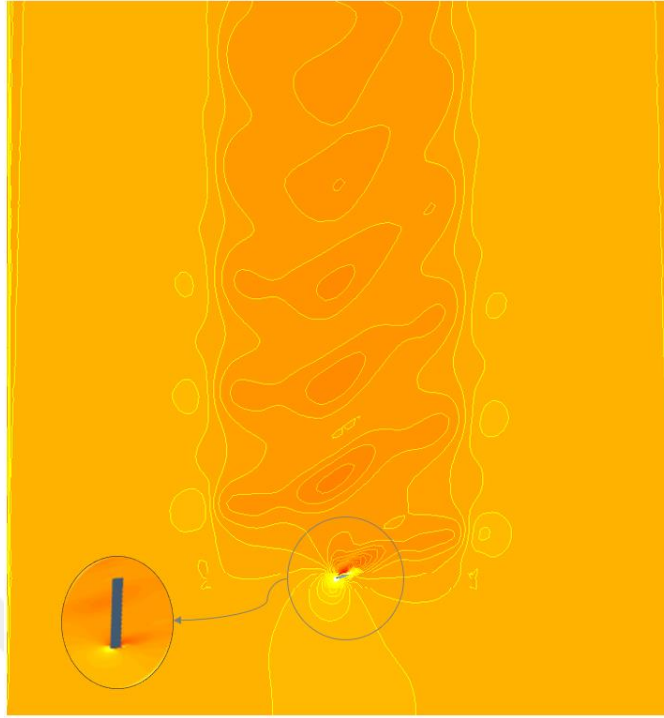
Şekil 5.10. Döner Kanat – Kanat %50'lik Bölümün Art İz Hız Dağılımı

Art iz bölgesinin akış alan düzlemlerinde gösterilmesi modifiyeli kanat formundan kaynaklı akışkan formunu izlemek ve referans kanat art izi ile karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sırasıyla, Şekil 5.11 ve 5.12’de kanat formlarına göre art iz bölgesinde kanatlardan kaynaklı akış formlarının kanatların %25’lik düzlemindeki basınç ve hız dağılımları görülmektedir.

Şekil 5.11 üzerinde ki şekillerde gösterildiği gibi, referans kanat art iz bölgesinde oluşan düşük basınç alanlarının, modifiyeli kanat üzerinde yükselmeye başladığı ve bu alanlarında hacimsel olarak küçüldüğü görülmektedir. Şekil 5.12’de ise basınç dağılımının tam tersi (basıncın düşük olduğu alan hızın yüksek olduğu bölgedir) olan hız dağılımında da bu kısım net şekilde görülmektedir. Model-29 ile birlikte düşük hız bölgesinin hacminin küçülmeye başladığı ve böylece serbest akış hızı olan 9.96m/s ye hıza alanın daha hızlı form değiştirerek geçmeye başladığı görülmektedir.

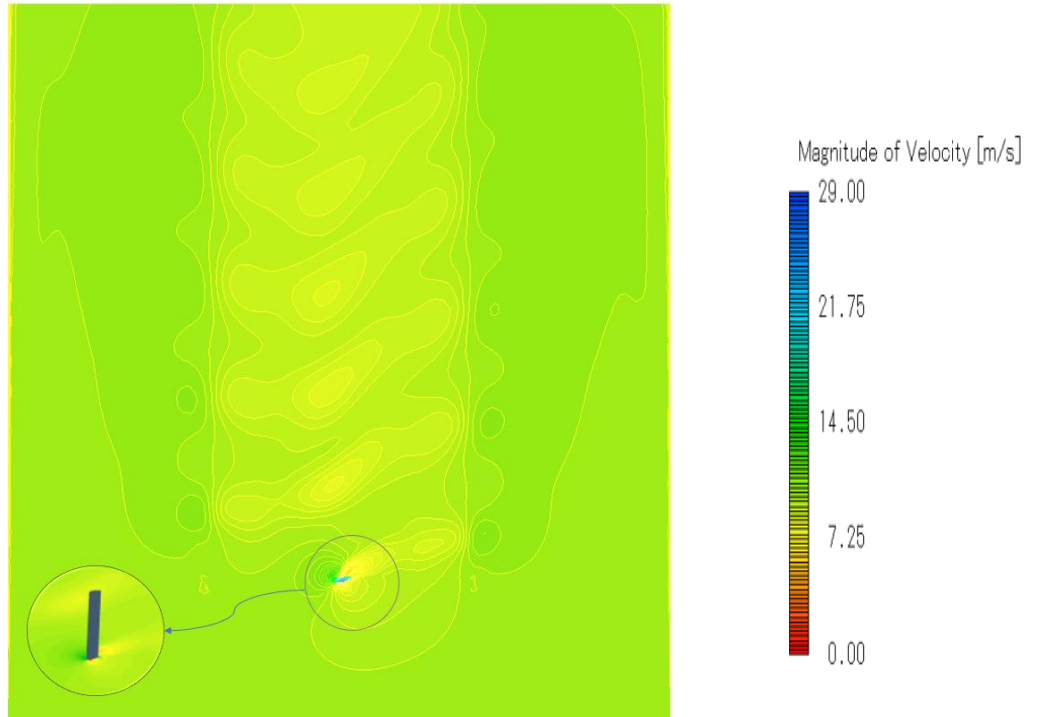


a. Referans Türbin Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı



b. M-29 Döner Kanat Toplam Basınç Dağılımı

Şekil 5.11. Döner Kanat – Kanat %25'lik Bölümün Art İz Toplam Basınç Dağılımı



a. Referans Türbin Döner Kanat Hız Dağılımı



b. M-29 Döner Kanat Hız Dağılımı

Şekil 5.12. Döner Kanat – Kanat %25'lik Bölümün Art İz Hız Dağılımı

### 5.3 İstatistiksel Analiz Sonuçları

Yapılan sayısal analiz sonuçlarına (Tablo 5.1) göre verimliliği göz önünde bulundurulmuş Model-29 modifiyeli kanadı için döner kanat analizi yapılmış ve ardından sonuçları Tablo 5.2' de irdelenmiştir ki bu da bu kısımda ki verim artışını göstermektedir. Ardından modifiyeli kanat dizaynlarının analizleri nasıl etkilediği ve hangi parametresinin en çok etkilediğini gözlemlemek için istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz boyunca Taguchi analizi ve Anova istatistiksel metotları uygulanmıştır.

İlk yapılan Taguchi analizinde girdi parametrelerinde sistemin modifiyesinde kullanılan Tablo 2.2 verileri ele alınmıştır ancak Tablo 2.2'de gösterilen Yerleşim Parametreleri içerisindeki Sx0,6 ve Sx0,7 verileri kullanılmamıştır. Bunun sebebi ise Tablo 5.1 analiz sonuçlarına göre sonuçların göz ardı edilebileceği şeklindedir.

Taguchi analizi sonucunda öncelikle Tablo 5.3' te görünen sinyal ve gürültü yanıt tablosu elde edilmiştir.

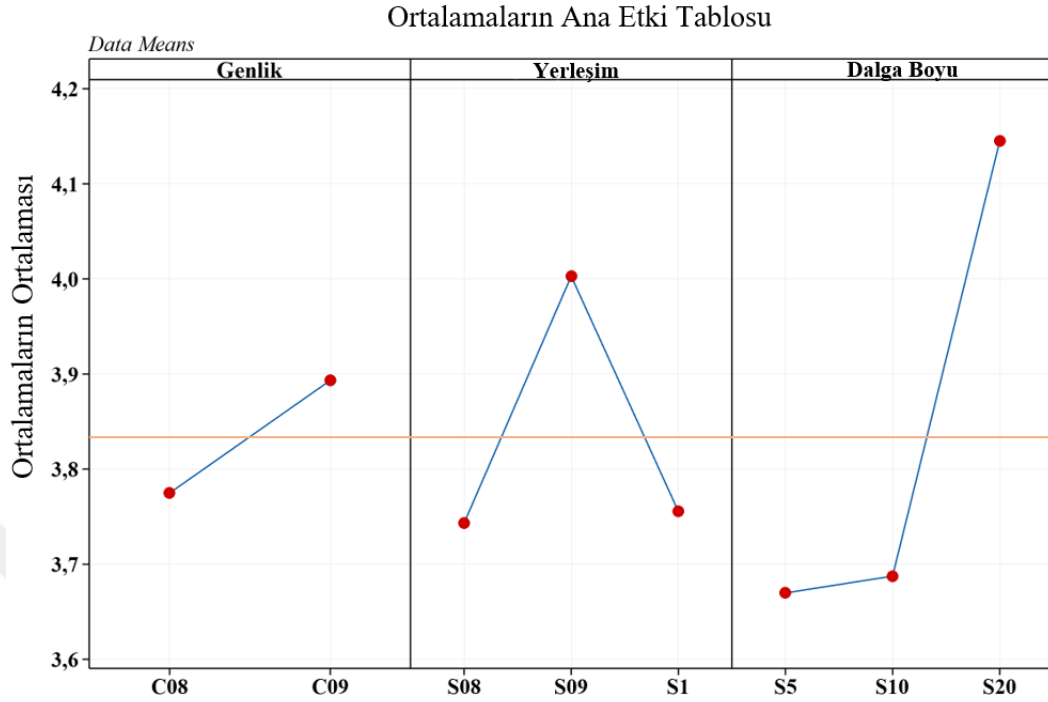
Tablo 5.3. Sinyal Gürültü Oranları için Yanıt Tablosu

Level	Genlik	Yerleşim	Dalga Boyu
1	11,53	11,45	11,29
2	<b>11,77</b>	<b>12,00</b>	11,33
3		11,48	<b>12,32</b>
Rank	3	2	1

Tablo 5.3'e göre dizayn parametresi içerisinde ki en önemli kısmın Dalga boyu olduğu görülmektedir. Ardından yerleşim/konumlandırma parametresinin, en son ise genlik sistem için etkin parametreler olduğu görülmektedir. Tablo 5.3 içerisinde belirtilen ve kırmızı ile gösterilen sayılar ise, bu 3 değişken içerisinde ki hangi level in en etkin olduğu göstermektedir. Level olarak ifade edilen kısım, genlikte; Cx0.8 ve Cx0.9 iken, yerleşimde spanın %80'i, %90' ı ve %100'lük kısımlarını, dalga boyunda ise, spanın 5'e bölünmüş, 10'a bölünmüş ve 20'ye bölünmüş hallerinde ki tasarımları ifade etmektedir.

Hangi genlik, dalga boyu ve yerleşimin en önemli parametre olduğu ve kendi arasında değerlendirilmesi gerektiği için Taguchi analizine ek Anova analizi yapılmış ve etki tablo grafiği Şekil 5.13' te değerlendirilmiştir.

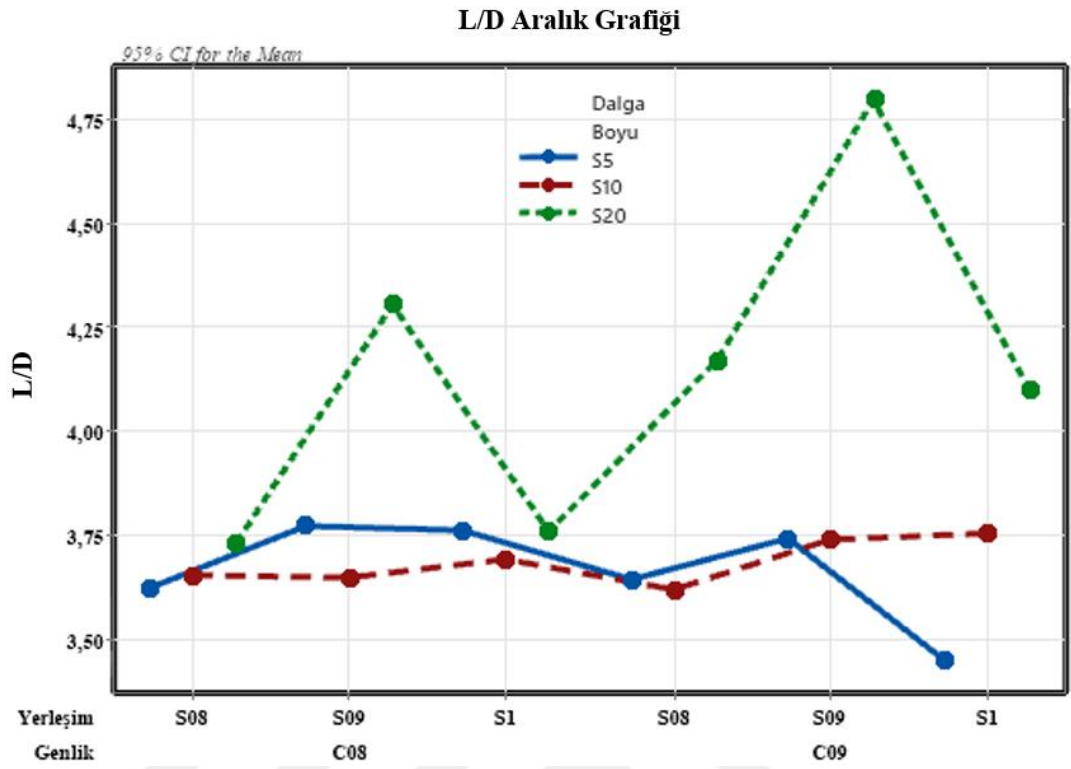
Şekil 5.13'e göre dikkat edilirse şekil içerisinde parametreler arasından bir çizgi geçmektedir ve çizginin üstünde kalan parametre sistem verimi için etkili parametreyi göstermektedir.



Şekil 5.13. Ana Etki Değerlendirme Tablosu

Genlik değerlendirildiğinde, genliğin artırılması sistemin veriminin artırdığını göstermektedir ve kordun %80'lik kısmından daha büyük kadarının girinti ve çıkıntılı olması ve dalgalı yapının %90'lık kısmına yaklaşması sistemde olumlu etki yaratacağı görülmektedir. Yerleşim/ konumlandırma da ise spanın %80'lik kısmına kadar olan dalgalı yapının %90'a çıkarılması sisteme olumlu etki yaratacağı ancak %90'dan %100'lük kısmına artırılmasının sisteme olumsuz etki yaratacağı görülmektedir. Bu tırtıklı yapının kanat spanı boyunca artırılmasının sistem verimini artıracak yerleşim kısmından anlaşılmaktadır ve burada tırtık sıklığının artışının ( $\text{Span} \cdot 20 > \text{Span} \cdot 10 > \text{Span} \cdot 5$ ) sisteme olumlu etki yaratmaya devam edeceği görülmektedir.

Parametrelerin sistem üzerine etkilerinin incelenmesinin ardından, grup analizi gerçekleştirilmiş olup bu da sistem üzerinde L/D aerodinamik performans etkisini ölçek için hangi parametre üzerinde durulması gerektiği için yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analiz ortalamasının %95 doğruluk olması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.14'te görüldüğü üzere spanın 20'ye bölünmesi ile elde edilen kanat yapısının sistem verimini etkileyen en önemli parametre olduğu gruplama analizinde de görülmüştür.



Şekil 5.14. Sistem Grup Parametre Analizi

## 6. BÖLÜM

### TARTIŞMA VE ÖNERİLER

#### 6.1. Giriş

Bu tez çalışmasında NREL Faz II rüzgar türbin kanat modeli baz alınarak, kanat üzerine kambur balina kanat uygulaması için dalga boyu, genlik ve konumları değişken 30 farklı modifiyeli kanat modeli oluşturulmuştur. Bu oluşturulan kanat modelleri ve referans kanatlara deneysel ortam ve gerçekte türbin ve kanatlarının konumlandırılmasına göre sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz boyunca, kanatların hücum açıları 12° ve serbest akış hızı 9.96m/s seçilmiştir. Sayısal analizler Cradle/ Sc-Flow programı ve program içerisinde ki LKE  $k-k_L-w$  sayısal akış modeli kullanılarak yapılmıştır. Tez boyunca yapılan çalışmalar sayısal akışkan türbülans modelinden hariç, sistemin verimliliği üzerine durulduğu için analiz metodu değil de sistem değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçların tartışılması ile, en verimli modifiyeli kanat modeli belirlenmiş, ardından döner kanat analizi gerçekleştirilmiştir. Döner kanat analizlerinde kanatlar 71.98 rpm hızında döndürülmüş ve referans kanat ve modifiyeli kanatlar arasında ki sebep oldukları art iz bölgelerinde ki akış karakteristikleri basınç ve hız dağılımı türünden karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak, verimin artmasına/ azalmasına sebep olan parametreler modifiyeli kanatlar üzerinde istatistiksel analizler yapılarak belirlenmiş ve yorumlanmıştır.

## 6.2. Sonuç

Kambur balina yüzgeçlerinin, kendilerinden hariç diğer yapılara göre akışkan içerisinde iken sürtünmeyi azalttığı, kaldırma kuvvetini artırdığı yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Rüzgar türbin kanatlarına bu kamburlu yapının uygulanmasıyla, türbinlerde kanat performansından kaynaklı sistem üzerinde verim artış/azalışı irdelenmiştir. Öncelikle belirlenen referans kanat tasarımı gerçekleştirilmiş, ardından kanat üzerinde 2 farklı genlik, 3 farklı dalga boyu ve 5 farklı konumlandırma seçilerek 30 adet model oluşturulmuştur. Toplamda oluşan 31 modele akışkan hacmi içerisinde akış analizi gerçekleştirilmiş ve farklı parametrelerin sonuçları etkilediği gözlenmiştir.

Oluşturulan modeller arasında kaldırma katsayısını etkileyen  $F_{Trust}$  değerinin Referans kanat üzerinde en yüksek olduğu, modifiyeli kanatlarda daha az olduğu görülmüştür.

Analiz sonuçlarında elde edilen  $C_L$  ve  $C_D$  değerleri, hem sabit kanatlı modellerde hemde döner kanatlı modellerde 3 boyutlu olarak irdelenmiş olup, Şekil 4.2 de görüldüğü gibi açıl dönüştürmeler yapılarak elde edilmiştir.

Ancak her tasarım modelinin yüzey alanlarının farklı oluşu,  $C_L$  değerinin modifiyeli kanatların, Model-8'de  $8,74E-01$ , Model-10'da  $8,89E-01$ , Model-21'de  $8,42E-01$ , Model-28'de  $8,55E-01$  olduğu gözlemlenmiştir ve Referans kanat ta ise bu değer  $8,34E-01$  olmuştur. Sürüklenme kuvveti olan  $C_D$ 'ye ise  $F_{Torque}$  un etkisi olduğu ve bu etkinin ise modifiyeli kanatlarda daha az olması sürüklenme kuvvetinin azalmasına sebep olmuştur. Bu değer, Model-2'de  $2,04E-01$ , Model-4' te  $2,12E-01$ , Model-5'te  $2,11E-01$ , Model-11'de  $2,04E-01$ , Model-17'de  $2,11E-01$ , Model 20'de  $1,95E-01$ , Model-24'te  $1,80E-01$ , Model-25'te  $2,09E-01$ , Model-28'te  $2,05E-01$ , Model-29'da  $1,71E-01$  ve Model-30'da  $1,96E-01$  olduğu, referans kanatta ise  $2,12E-01$  olduğu görülmüştür.

$C_L$  ve  $C_D$ 'nin hesaplanmasından sonra aerodinamik performans katsayıları hesaplanmıştır. Havacılık için geçerli olan  $L/D$ 'nin Model-2' de  $4,01$ , Model-11'de  $4,04$ , Model-24'te  $4,30$ , Model-28'de  $4,17$ , Model-29'da  $4,80$ , Model-30'da ise  $4,10$  olarak hesaplanmıştır ve bu katsayı Referans kanatta ise,  $3,94$  olduğu gözlenmiştir. Bu durumda, Referans kanada göre Model-29'da  $L/D$  değerinin  $1,22$  kat arttığı gözlenmiştir. Rüzgar türbin tasarımları için geçerli olan,  $C^3/C_d^2$  değerinin ise, Model-2' de  $13,21$ , Model-11'de

13,48, Model-24'te 14,36, Model-28' te 14,88, Model-29'da 18,89, Model-30' da ise 13,5 şeklinde hesaplanmıştır bu da Referans Kanatta 12,94 şeklinde olmuştur. Bu veriler tartışıldığında, Model-29 en fazla verim artırıcı olduğu görülmüştür.

Bu verim artırıcı modelin ardından, sistemin aktif halinin verimini araştırmak için Referans kanat ve Model-29 üzerine döner kanatlar modellenmiş ve sayısal akışkan analizleri gerçekleştirilmiştir.

Döner kanat analizlerine göre, Model-29 ile kaldırma kuvvet katsayısının 1,93 olduğu, referans kanat verisine göre %5,4 kadar düşüşü hesaplanmıştır. Ancak sürtünme katsayısının ise tam tersi olarak, Base kanada göre yaklaşık %46 oranında iyileşme olduğu görülmüştür ve bu değer ise  $1,14E-02$  olmuştur. Bunun ardından hesaplanan aerodinamik performans katsayıları, Model-29 ile, havacılıkta dikkate alınan  $L/D$ 'de %74 ve Rüzgar Türbin tasarımcıları arasında dikkate alınan  $C_L^3/C_D^2$  'de ise 2,9 kat arttığı görülmüştür.

Bu sonuçların ardından, döner kanat art iz bölgelerinin basınç ve hız dağılımları irdelendiğinde, modifiye edilmiş kanadın ardında oluşan basınç farklarının azaldığı, hız oranının arttığı görülmüştür. Ancak bu basınç azaldığı ve hız alanlarının arttığı bölgelerin etki hacimleri azaldığı görülmüştür, bu da türbülanslı bölgenin art iz bölgesinde etkisinin daha hızlı kaybettiği ve serbest akış bölgesinin alana daha erken hakim olmaya başladığını göstermektedir.

Yapılan sayısal analiz çalışmalarının ardından, istatistik analiz yapılmıştır. Bu analizde, kanat tasarımını değiştirirken hangi parametrenin sistem verimini çok etkileyen/az etkileyen olduğunu görmek için kullanılmıştır.

İstatistik analizlerinde kullanılan Taguchi metodu sistem sinyal gürültü oranlarını bulmak için ve toplu gruplandırılmalı analiz için kullanılmıştır. Buna göre dalga boyunun sistemin verimi için en önemli parametre olduğu, yerleşim/ konumlandırma parametresinin 2.en önemli parametre, genliğin ise en az etkili parametre olduğunu görülmüştür. Yapılan Anova analizi ile de, sistem tasarımında kullanılan ölçütlerin hangisinin kanat veriminde daha etkin olduğunu göstermek için kullanılmıştır.

Kanat üzerinde dalgalı yapının, kordun %90'lık kısmına yaklaşması sistemde olumlu etki yaratacağı, konumlandırma da ise spanın %80'lik kısmına kadar olan dalgalı yapının %90'a çıkarılması sisteme olumlu etkisinin olacağı, ancak %90'dan %100'lük kısmına artırılmasının sistem üzerinde negatif etki yaratmasına sebep olacağı görülmektedir. Bu tırtıklı yapının kanat spanı boyunca artırılmasının sistem verimini artıracak dalga boyunda anlaşılmaktadır ve burada tırtık sıklığının artışının ( $\text{Span}^*20 > \text{Span}^*10 > \text{Span}^*5$ ) sisteme olumlu etki yaratmaya devam edeceği anlaşılmıştır.

Son olarak ise, yapılan sayısal çalışmaların sonuçlarına göre, verim artırıcı modellerin türbinlerde uygulanmasıyla, türbinlerin saha montajlarında art arda ve/veya yan yana dizilimlerinin daha sık yapılabileceği anlaşılmaktadır. Bunun sebebinin de verim artırıcı modellerde art iz bölgesinde türbülanslı bölgenin etkili alanın hacminin daha erken kaybolmaya başladığı ve bu mesafenin azaldığı görülmektedir.

### 6.3. Öneriler

Bu çalışmada farklı modeller için sayısal çalışmalar, aynı hücum açısı ve serbest akışta kıyaslanmışlardır. Bulunan sonuçlar istatistik metotlar ile irdelenmiş sistem tasarımı için gerekli parametrelerin az hata ile bulunabilmesi amaçlanmıştır.

Çalışma boyunca sayısal analizler yapıldığı ve hassas sonuçlar almak adına mesh (ağ örgüleri) yapısının sıkı tutulması, analizlerin çözüm süresi uzun (her analiz için en az 2 gün) sürmesine sebep olmuştur. Bu da model sayısının az olmasına ve verimliliklerinin karşılaştırılmasında daha az model üzerinden karşılaştırılmaların yapılmasına sebep olmuştur. Buna bağlı olarak Yüksek kapasiteli bilgisayarlar kullanılıp, farklı yerleşim/konumlandırmalara, farklı dalga boylarına sahip modellerinde analizlere dahil edilip daha hassas aralıkta verim karşılaştırılması yapılabilir. Artırılan modeller ile birlikte yapılacak istatistik analizler sonucunda fonksiyon denklemleri ortaya koyup, bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda analiz yerine hızla matematiksel metotlarla sonuca ulaşılma sağlanabilir.

**Tezden Yapılan Uluslararası Bildiriler ve Hazırlanan Makaleler**

Bodur T.M., Genc M.S. (2021). Numerical Model and Analysis Of The Application Of Tubercle Structure To The Nrel Phase II Turbine Blade. International World Energy Conference. Kayseri/Türkiye

Bildiri için:

[https://www.worldenergyconference.org/\\_files/ugd/614b1f\\_0618ce80cf5c4d558a2e596b2a85659c.pdf](https://www.worldenergyconference.org/_files/ugd/614b1f_0618ce80cf5c4d558a2e596b2a85659c.pdf)



## KAYNAKLAR

1. TMMOB Elektrik Mühendisliği Odası. Türkiye elektrik istatistikleri. (Web sayfası: [https://www.emo.org.tr/ekler/095e69ae7d0338f\\_ek.pdf?tipi=41&tu=u=X&sube=0](https://www.emo.org.tr/ekler/095e69ae7d0338f_ek.pdf?tipi=41&tu=u=X&sube=0)) . (Erişim tarihi: Şubat 2021).
2. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği. Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu. (Web sayfası: <https://tureb.com.tr/yayin/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2021/139>). (Erişim tarihi: Ocak 2021).
3. Chehouri, A., Younes, R., Ilinca, A., Perron, J. 2015. Review of performance optimization techniques applied to wind turbines. **Applied Energy**, **142**:361-388.
4. Cai, X., Zhu, J., Pan, P., & Gu, R. 2012. Structural optimization design of horizontal-axis wind turbine blades using a particle swarm optimization algorithm and finite element method. **Energies**, **5**(11): 4683-4696.
5. Genç, M. S., Karasu, İ., Açikel, H. H. 2012. An experimental study on aerodynamics of NACA2415 aerofoil at low Re numbers. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **39**: 252-264.
6. White, F.M., Akışkanlar mekaniği. Çeviri: Kırkköprü, K., Ayder, E., Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 2004.
7. Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları. Palme Yayıncılık. Ankara, 2013.
8. Schubauer, G. B., & Skramstad, H. K. 1947. Laminar boundary-layer oscillations and stability of laminar flow. **Journal of the Aeronautical Sciences**, **14**(2): 69-78.
9. Genç, M.S., 2009. Kanat profilleri etrafındaki düşük Re sayılı akışın kontrolü ve aerodinamik performansın incelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi, Kayseri.

10. Aydurmaz C., 2015. Naca 0012 kanadın rüzgar tüneline sınır tabaka ve aerodinamik analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 124 s.
11. Öktem O., 2016. Rotorlar üzerindeki akışın hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleriyle aerodinamik analizi. Tobb Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 69 s.
12. Wood D., 2011. Small wind turbines. Green Energy and Technology, Springer, 291 s..
13. Gostelow, J. P., Blunden, A. R., Walker, G. J., 1994. Effects of free-stream turbulence and adverse gradients on boundary layer transition. International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 37th, Cologne, Germany, 14 p.
14. J. P. Hennessey Jr. 1978. A comparison of the weibull and rayleigh distributions for estimating wind power potential. Wind Engineering. 2:156-164.
15. Justus, C.G., Hargraves, W. R., Mikhail A., Graber, D. 1978. Methods for estimating wind speed frequency distributions. **Journal of applied meteorology**. **17(3):350–353**.
16. Lanzafame, R., Messina, M. 2008. Optimal wind turbine design to maximize energy production. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**. **223(2):93–101**.
17. Lanzafame, R., Messina, M. 2010. Horizontal axis wind turbine working at maximum power coefficient continuously. **Renewable Energy**. **35(1):301–306**.
18. Seguro, J. V., Lambert, T. W. 2000. Modern estimation of the parameters of the weibull wind speed distribution for wind energy analysis. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **85(1):75–84**.

19. Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. 2010. Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons. 704 s.
20. Zinger, D. Z., Muljadi, E. 1997. Annualized wind energy improvement using variable speeds. **IEEE Transactions on Industry Applications**, **33**(6):1444–1447.
21. Mathew, S. 2006. Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics. Springer. 252s.
22. Liu, X., Lu, C., Liang, S., Godbole, A., Chen, Y. 2017. Vibration-induced aerodynamic loads on large horizontal axis wind turbine blade. **Applied Energy**. **185**(2): 1109–1119.
23. Kozlov, V. V., Katasonov, M. M., Pavlenko, A. M. 2017. Experimental investigation of localized disturbances in the straight wing boundary layer, generated by finite surface vibrations. AIP Conference Proceedings. Vol.1893.
24. Fish, E. F., Battle, J.M., 1995. Hydrodynamic design of the humpback whale flipper. **Journal of Morphology**, **225**(1):51-60.
25. Fox, R.W., Pritchard P.J., McDonald A.T. 2009. Introduction to fluid mechanics. 7th ed. John Wiley & Sons Inc.
26. Winn, L.K., Winn, H.E. 1985. Wings in the sea: the humpback whale. Hanover University Press of New England.
27. Edel, R.K., Winn, H.E. 1978. Observations on underwater locomotion and flipper movement of the humpback whale *Megaptera novaeangliae*. *Mar. Biol.* 48:279–87.
28. Fish, F.E., Weber, P.W., Murray, M.M., Howle, L.E. 2011. The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology. **Integrative and Comparative Biology**, **51**:203–13.

29. Owen, J. C., Szweczyk, A. A., & Bearman, P. W. 2000. Suppression of Karman vortex shedding. **Physics of Fluids**, **12**(9), S9-S9.
30. Bearman, P. W., & OWen, J. C. 1998. Reduction of bluff-body drag and suppression of vortex shedding by the introduction of wavy separation lines. **Journal of Fluids and Structures**, **12**(1), 123-130.
31. Miklosovic, D. S., Murray, M. M., Howle, L. E., & Fish, F. E. 2004. Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. **Physics of fluids**, **16**(5), L39-L42.
32. Watts, P., Fish, F. E. 2001. The influence of passive, leading edge tubercles on wing performance. Proceedings of Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST), Autonomous Undersea Systems Inst., Lee, New Hampshire.
33. Custodio, D. 2007. The effect of humpback whale-like leading edge protuberances on hydrofoil performance. Worcester Polytechnic Inst. Mechanical Engineering Dept. , M.S. Thesis, Worcester.
34. Shi,W., Atlar, M., Norman, R., Aktas, B., Turkmen, S. 2016. Numerical optimization and experimental validation for a tidal turbine blade with leading-edge tubercles. **Renewable Energy**. **96**(A):42–55.
35. Zhang, R.K., Wu, J.Z. 2012. Aerodynamic characteristics of wind turbine blades with a sinusoidal leading edge. **Wind Energy**, **15**(3):407–424.
36. Ibrahim, I. H., New, T. H. 2015. A numerical study on the effects of leading-edge modifications upon propeller flow characteristics. Proceedings of the 9th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 9:21, Melbourne, Australia.
37. Butt, F. R., Talha, T. 2019. Numerical investigation of the effect of leading-edge tubercles on propeller performance. **Journal of Aircraft**, **56**(3): 1014-1028.

38. Lin, Y. T., Chiu, P. H. 2020. Influence of leading-edge protuberances of fx63 airfoil for horizontal-axis wind turbine on power performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 38, 100675.
39. Shi, W., Atlar, M., Norman, R. 2018. Learning from humpback whales for improving the energy capturing performance of tidal turbine blades. **In *Trends and Challenges in Maritime Energy Management*. Springer, Cham. 479-497.**
40. Domel, A. G., Saadat, M., Weaver, J. C., Haj-Hariri, H., Bertoldi, K., Lauder, G. V. 2018. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance. ***Journal of the Royal Society Interface*, 15(139).**
41. Abate, G., Mavris, D. N. 2018. Performance analysis of different positions of leading edge tubercles on a wind turbine blade. In 2018 Wind energy symposium. 1494
42. Hansen, K. L., Kelso, R. M., Dally, B. B. 2011. Performance variations of leading-edge tubercles for distinct airfoil profiles. ***AIAA journal*, 49(1): 185-194.**
43. Johari, H., Henoch, C., Custodio, D., Levshin, A. 2007. Effects of leading-edge protuberances on airfoil performance. ***AIAA journal*, 45(11): 2634-2642.**
44. Yoon, H. S., Hung, P. A., Jung, J. H., Kim, M. C. 2011. Effect of the wavy leading edge on hydrodynamic characteristics for flow around low aspect ratio wing. ***Computers & Fluids*, 49(1): 276-289.**
45. Kumar, S., Amano, R. S. 2012. Wind turbine blade design and analysis with tubercle technology. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 45042:859-872.
46. Fish, F. E. 2006. Limits of nature and advances of technology: What does biomimetics have to offer to aquatic robots. ***Applied Bionics and Biomechanics*. 3(1): 49-60.**

47. Hansen, K. L. 2012. Effect of leading edge tubercles on airfoil performance. Doktora Tezi. Adelaide Üniversitesi, Makine Mühendisliği. Avustralya.
48. Abate, G. 2019. A numerical investigation into the aerodynamic effects of tubercles in wind turbine blades. Doktora Tezi. Georgia Institute of Technology.
49. Ke, W., Hashem, I., Zhang, W., & Zhu, B. 2022. Influence of leading-edge tubercles on the aerodynamic performance of a horizontal-axis wind turbine: A numerical study. **Energy**, 239, 122186.
50. Voskuijl, M. 2012. Introduction to aeronautical engineering - endurance. Delft University of Technology, Introduction Aerospace Engineering, Flight mechanics, Lecturer slides.
51. Sieradzki, A., Dziubiński, A., Galiński, C. 2016. Performance comparison of the optimized inverted joined wing airplane concept and classical configuration airplanes. **Archive of mechanical engineering**, 63(3).
52. Ramsay, R. F., Hoffman, M. J., & Gregorek, G. M. 1995. Effects of grit roughness and pitch oscillations on the S809 airfoil (No. NREL/TP-442-7817). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
53. Simms, D. A., Hand, M. M., Fingersh, L. J., & Jager, D. W. 1999. Unsteady aerodynamics experiment phases II-IV test configurations and available data campaigns (No. NREL/TP-500-25950). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
54. Schepers, J. G., Brand, A. J., Bruining, A., Graham, J. M. R., Hand, M. M., Infield, D. G., ... Simms, D. A. 1997. Final report of IEA annex XIV: field rotor aerodynamics. Petten, The Netherlands: Energieonderzoek Centrum Nederland.
55. Bodur, T.M., Genç, M.S. 2021. Numerical model and analysis of the application of tubercle structure to the nrel phase II turbine blade. Iwec 2021, International World Energy Conference. Kayseri, Turkey. 28-38.

56. MSC yazılımı, Cradle gerekli detaylar. (Web sayfası: <https://www.mssoftware.com/product/cradle-cfd>), (Erişim tarihi: **Mayıs 2022**).
57. Schlichting, H., Kestin, J. 1961. Boundary layer theory (Vol. 121). New York: McGraw-Hill.
58. Walters, D. K., Lylek, J. H. 2004. A new model for boundary layer transition using a single-point RANS approach. **J. Turbomach.**, **126**(1):193-202.
59. Walters, D. K., Cokljat, D. 2008. A three-equation eddy-viscosity model for Reynolds-averaged Navier–Stokes simulations of transitional flow. **Journal of fluids engineering.** **130**(12).
60. Genç, M. S., Kaynak, Ü., Yapici, H. 2011. Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous blowing and suction. **European Journal of Mechanics- B/Fluids**, **30**(2): 218-235.
61. Genç, M. S., Kaynak, Ü., Lock, G. D. 2009. Flow over an aerofoil without and with a leading-edge slat at a transitional Reynolds number. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, **223**(3):217-231.
62. Canıyılmaz, E., Kutay, F. 2003. Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, **18**(3): 51-63.
63. Ross, P.J., Taguchi techniques for quality engineering, McGraw-Hill, Singapore, 1989.
64. Pınarbaşı, A., 2021. Taguchi metodu nedir. (Web sayfası: <https://www.muhendisbeyinler.net/taguchi-metodu-nedir/>). (Erişim Tarihi: **Temmuz 2022**).

65. Öner, Y., Parametrik olmayan istatistik yöntemler. (Web sayfası: [https://avys.omu.edu.tr > public > 5.HAFTA.pdf](https://avys.omu.edu.tr/public/5.HAFTA.pdf)), (Erişim tarihi: **Ağustos 2022**).
66. Çolak, E., Varyans analizi (Anova). (Web sayfası: [https://eczacilik.anadolu.edu.tr/bolumSayfaları/belgeler/ecz2014%2011\\_20140527094539.pdf](https://eczacilik.anadolu.edu.tr/bolumSayfaları/belgeler/ecz2014%2011_20140527094539.pdf)), (Erişim tarihi: Ağustos 2022).
67. Tek yönlü varyans analizi. (Web sayfası: [https://muweb.mu.edu.tr/Newfiles/84/Content/11\\_TekyonluVaryansAnalizi.pdf](https://muweb.mu.edu.tr/Newfiles/84/Content/11_TekyonluVaryansAnalizi.pdf)), (Erişim tarihi: Ağustos 2022).
68. Rojratsirikul, P., Genc, M. S., Wang, Z., Gursul, I. 2011. Flow-induced vibrations of low aspect ratio rectangular membrane wings. **Journal of Fluids and Structures**, **27**(8): 1296-1309.
69. Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Jager, D. W., Cotrell, J. R., Schreck, S., Larwood, S. M. 2001. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns (No. NREL/TP-500-29955). National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).
70. Butterfield, C. P., Musial, W. P., & Simms, D. A. 1992. Combined experiment phase 1. Final report (No. NREL/TP-257-4655). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States).

## EKLER

## EK-1

EMME YÜZEYİ			BASINÇ YÜZEYİ		
X	Y	Z	X	Y	Z
1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.000020	0.000000
0.996203	0.000487	0.000000	0.000213	-0.001794	0.000000
0.985190	0.002373	0.000000	0.001045	-0.003477	0.000000
0.967844	0.005960	0.000000	0.001208	-0.003724	0.000000
0.945073	0.011024	0.000000	0.002398	-0.005266	0.000000
0.917488	0.017033	0.000000	0.009313	-0.011499	0.000000
0.885293	0.023458	0.000000	0.023230	-0.020399	0.000000
0.848455	0.030280	0.000000	0.042320	-0.030269	0.000000
0.807470	0.037766	0.000000	0.065877	-0.040821	0.000000
0.763042	0.045974	0.000000	0.093426	-0.051923	0.000000
0.715952	0.054872	0.000000	0.124111	-0.063082	0.000000
0.667064	0.064353	0.000000	0.157653	-0.073730	0.000000
0.617331	0.074214	0.000000	0.193738	-0.083567	0.000000
0.567830	0.084095	0.000000	0.231914	-0.092442	0.000000
0.519832	0.093268	0.000000	0.271438	-0.099905	0.000000
0.474243	0.099392	0.000000	0.311968	-0.105281	0.000000
0.428461	0.101760	0.000000	0.353370	-0.108181	0.000000
0.382612	0.101840	0.000000	0.395329	-0.108011	0.000000
0.337260	0.100070	0.000000	0.438273	-0.104552	0.000000
0.292970	0.096703	0.000000	0.481920	-0.097347	0.000000
0.250247	0.091908	0.000000	0.527928	-0.086571	0.000000
0.209576	0.085851	0.000000	0.576211	-0.073979	0.000000
0.171409	0.078687	0.000000	0.626092	-0.060644	0.000000
0.136174	0.070580	0.000000	0.676744	-0.047441	0.000000

0.104263	0.061697	0.000000	0.727211	-0.035100	0.000000
0.076035	0.052224	0.000000	0.776432	-0.024204	0.000000
0.051823	0.042352	0.000000	0.823285	-0.015163	0.000000
0.031910	0.032299	0.000000	0.866630	-0.008204	0.000000
0.016590	0.022290	0.000000	0.905365	-0.003363	0.000000
0.006026	0.012615	0.000000	0.938474	-0.000487	0.000000
0.000658	0.003723	0.000000	0.965086	0.000743	0.000000
0.000204	0.001942	0.000000	0.984478	0.000775	0.000000
			0.996141	0.000290	0.000000
			1.000000	0.000000	0.000000
Ek-1 S809 Kanat Profil Detayı [52]					

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Tuna Murat Bodur  
**Uyruğu:** Türkiye (T.C)

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh.	2016
Lise	Eynesil Lisesi, Eynesil, Giresun	2010

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2021-2022	Kimotek Metal	1 Yıl
2019-2021	MSG Teknoloji	2 Yıl
2017-2019	Mersin Toker Çelik Makina	2.5 Yıl

### BAŞARILAR VE ÖDÜLLER

2016	Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölüm Birinciliği
2016	Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Yüksek Onur Öğrencisi

### YABANCI DİL

İngilizce

## YAYINLAR ve KONFERANSLAR

Ozden M., Genc M.S., Koca K., Bodur T.M. (2022). Flow enhancement using vortex generators over both pressure and suction surfaces of the wind turbine airfoil. Aircraft Engineering and Aerospace Technology. Hakem Aşamasında.

Genc M.S., Demir H., Ozden M., Bodur T.M. (2021). Experimental Analysis of Fluid-Structure Interaction in Flexible Wings at Low Reynolds Number Flows. Aircraft Engineering and Aerospace Technology

T.M. Bodur, K. Koca, M.S. Genc, H.H. Acikel, M. Cagdas. (2018). Identification Of Flow Phenomena Over Naca 4412 Wind Turbine Airfoil At Low Reynolds Numbers And Role Of Laminar Separation Bubble On Flow Evolution. Energy

Bodur T.M., Genc M.S. (2021). Numerical Model and Analysis Of The Application Of Tubercle Structure To The Nrel Phase II Turbine Blade. Iwec 2021, International World Energy Conference / Kayseri, Turkey.

M.S. Genc, K.S. Ozden, T.M. Bodur. (2020). 3D flow simulation of a Horizontal Axis Wind Turbine with a Flat Plate on Pressure Side. 8th European Conference On Renewable Energy Systems. Istanbul/Turkey.

M.S. Genc, T.M. Bodur, K.S. Ozden. (2020). Flow-Induced Mechanical Analysis of a Horizontal Axis Wind Turbine with a Flat Plate on Pressure Side. 8th European Conference On Renewable Energy Systems. Istanbul/Turkey.

T.M.Bodur, M.S. Genc, O. Baturar. (2020). Design Of Small-Scale Wind Turbine\_Part V – Stuctural Analysis In Msc Nastran. Ispec 6 The International Conference On Engineering & Natural Sciences. Şanlıurfa/ Türkiye

O. Baturar, T.M. Bodur, M.S. Genc. (2020). Design Of Small-Scale Wind Turbine\_Part IV- Flow Analysis In Floefd. Ispec 6 The International Conference On Engineering & Natural Sciences. Şanlıurfa/ Türkiye

T.M.Bodur, M.S. Genc, K. Koca. (2016). Elimination Of Tip Vortex Using Air Holes At Wind Turbine Blade”: International Symposium on Sustainable Aviation. İstanbul/ Türkiye

