

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGÂR TÜRBİNİ KANATLARINDA
TÜRBÜLATÖR KULLANIMININ HESAPLAMALI
AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk Ali AYGEN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ünal UYSAL

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR TÜRBİNİ KANATLARINDA TÜRBÜLATÖR
KULLANIMININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ**

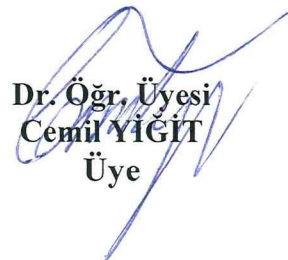
YÜKSEK LİSANS TEZİ

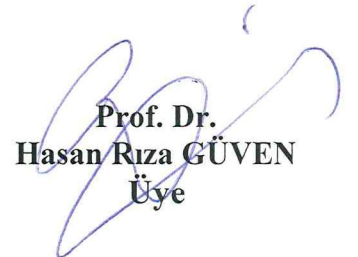
Ufuk Ali AYGEN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 23.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


**Dr. Öğr. Üyesi
Ünal UYSAL
Jüri Başkanı**


**Dr. Öğr. Üyesi
Cemil YIGİT
Üye**


**Prof. Dr.
Hasan Rıza GÜVEN
Üye**

BEYAN

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

Ufuk Ali AYGEN
23.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ünal UYSAL’a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
 BÖLÜM 2.	
RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	3
2.1. Rüzgâr Enerjisi.....	3
2.2. Rüzgâr Türbinleri	4
2.3. Rüzgâr Türbini Türleri.....	4
2.3.1. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri.....	5
2.3.2. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	6
2.4. Rüzgâr Türbini Elemanları.....	5
2.4.1. Kule.....	7
2.4.2. Kanatlar ve rotor.....	7
2.4.3. Kanat döndürme mekanizması (pitch)	7
2.4.4. Fren.....	8
2.4.5. Düşük hızlı şaft.....	8
2.4.6. Dişli kutusu.....	8
2.4.7. Jeneratör.....	8

2.4.8. Kontrol kutusu.....	8
2.4.9. Anemometre ve rüzgâr gülü.....	9
2.4.10. Türbin kafa kısmı.....	9
2.4.11. Yüksek hız şaftı.....	9
2.4.12. Rota mekanizması ve motoru (yaw)	9
2.5. Rüzgâr Türbini Kanat Karakteristiği.....	9

BÖLÜM 3.

RÜZGÂR TÜRBİN TEORİLERİ.....	11
3.1. Rüzgârın Güce Dönüşümü.....	11
3.2. Rüzgâr Türbin Teorileri.....	12
3.2.1. Momentum teorisi.....	12
3.2.1.1. Doğrusal momentum teorisi ve Betz limit.....	12
3.2.1.2. Açısız momentum teorisi.....	17
3.2.2. Kanat elemanı teorisi.....	21
3.2.2.1. Kanat kesit geometrisi.....	24
3.2.2.2. Kanat performans analizi.....	26
3.2.2.3. Güç katsayısının hesabı.....	28
3.2.2.4. Optimum kanat şekli.....	28
3.3. Kanat Seçimi.....	29

BÖLÜM 4.

LİTERATÜR TARAMASI.....	31
-------------------------	----

BÖLÜM 5.

SAYISAL MODEL KANAT TASARIMI.....	37
-----------------------------------	----

BÖLÜM 6.

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ.....	39
6.1. Temel Denklemler.....	39
6.1.1. Kütle korunumu denklemi.....	39
6.1.2. Momentum denklemleri.....	39

6.2. Türbülans Modeli.....	40
6.2.1. Standard k-ε türbülans modeli.....	40
6.2.2. Standard k-ε modeli için taşıma denklemleri.....	40
6.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanım Alanları.....	42
6.4. Akışın Modellenmesi ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	44

BÖLÜM 7.

AKIŞ ANALİZİ MODELLEMESİ.....	46
7.1. ANSYS Fluent İle Modelleme.....	46
7.2. HAD Çözümü İle Elde Edilen Analiz Sonuçları.....	49

BÖLÜM 8.

SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

2D	: 2 Boyutlu
3D	: 3 Boyutlu
A	: Kanat sisteminin süpürme alanı [m^2]
a	: Eksenel indüksiyon faktörü
a'	: Açısal indüksiyon faktörü
B	: Kanat Sayısı
c	: Kanat genişliği
C_d	: Sürüklenme katsayısı
C_l	: Kaldırma katsayısı
C_p	: Güç katsayısı
C_T	: İtme katsayısı
dF_D	: Çoğalan sürüklenme kuvveti
dF_L	: Çoğalan kaldırma kuvveti
dF_N	: Dönme düzlemine etkiyen artan normal kuvvet Pervane çekmesi
dF_T	: Rotor tarafından süpürülen daireye etkiyen artan teğetsel kuvvet Direnç Kuvveti
dr	: Radyal genişlik
e	: Kaldırma kuvvetinin direnç kuvvetine oranı
E_k	: Kinetik Enerji [J]
F_D	: Sürüklenme kuvveti
F_L	: Kaldırma kuvveti
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
m	: Kütleli Debi [kg/s]

NACA	: Ulusal Havacılık Araştırma Birliği National Advisory Committee for Aeronautics
P	: Basınç [Pa]
P'	: Basınç düşümü
P ₀	: Rüzgâr Gücü [W]
P _g	: Güç çıkışı
P _{max}	: Maksimum teorik rüzgâr türbin gücü [W]
P _r	: Rotor gücü
r	: Yarıçap
T	: İtke [Pa]
U	: Hız [m/s]
U(1-a)	: Kanata dik gelen rüzgâr hızı
U _{Rel}	: Göreceli Rüzgâr hızı
V	: Hız [m/s]
V _h	: Hareket eden hava kütesinin hacmi [m ³]
α	: Hücum açısı
θ _p	: Kanat burulma açısı
θ _{p,o}	: Uç kanat kesit açısı
θ _T	: Kanat burulma açısı
λ	: Kanatların uç hız oranları
λ _h	: Rotorda göbek kesitinde lokal hız oranını
ρ	: Hava yoğunluğu [kg/m ³]
φ	: Bağlı rüzgâr hızının geliş açısı
ω	: Rotor açısal hızı [rad/s]
Ω	: Rotorun açısal hızı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir rüzgâr türbini yandan ve önden görünüşü	6
Şekil 3.1. İki boyutlu boru akış sınırı.....	13
Şekil 3.2. Rotor arkasında oluşan hız ve eksenel indüksiyon faktörüne göre değişen güç ve itki katsayıları	16
Şekil 3.3. Rotordan geçen rüzgârın girdap hareketi	18
Şekil 3.4. İki boyutlu boru akış sınırı ve kesit alanı	18
Şekil 3.5. Havanın kanat çapı boyunca teğetsel hareketi.....	19
Şekil 3.6. Uç hız oranına göre güç katsayısı.....	21
Şekil 3.7. Kanat üzerinde değişim gösteren eksenel ve teğetsel indüksiyon faktörleri	21
Şekil 3.8. N adet bölüme ayrılmış kanat yarıçapı	22
Şekil 3.9. Bir pervanenin kanat kesiti	22
Şekil 3.10. Burulan ve burulmayan kanatta itme kuvvetinin dağılımının karşılaştırılması (yarıçap boyunca).....	23
Şekil 3.11. Rüzgâr türbininin çevresel dönüşü ve üzerine dik gelen rüzgâr hızı...	24
Şekil 3.12. Kanat kesit geometrisi ve üzerine gelen kuvvetler	24
Şekil 3.13. Kanat elemanının dairesel halka yapısı.....	27
Şekil 3.14. Bazı Rüzgâr Türbini NACA Kanat Profilleri	30
Şekil 4.1. Artan hücum açılarına göre kanat arkasında oluşan iz bölgesi ve kanattan ayrılmalar.....	32
Şekil 4.2. Tasıma, sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısıyla değişimi.....	33
Şekil 5.1. Airfoil koordinatlarının tasarım programına aktarılması.....	37
Şekil 5.2. Kanat Modelleri.....	38
Şekil 6.1. Kanat profillerinin farklı hücum açılarındaki basınç ve hız dağılımlarının incelendiği sınır koşulları ve kanat profillerine uygulanan çözüm alanı.....	44

Şekil 7.1. Geometri kısmında modelleme.....	46
Şekil 7.2. Mesh ağı görüntüsü.....	47
Şekil 7.3. Akış alanı yüzey isimleri.....	47
Şekil 7.4. Akış modeli alanı tanımlamaları.....	48
Şekil 7.5. Akış değerleri.....	48
Şekil 7.6. Basınç dağılımları (5 m/s, 10 m/s ve 15 m/s hız ve 15 cm türbülator (rip) yüksekliği).....	49
Şekil 7.7. Basınç dağılımları (5 m/s, 10 m/s ve 15 m/s hız ve 25 cm türbülator (rip) yüksekliği).....	50
Şekil 7.8. Hız akım çizgileri ve hız dağılımı (15cm türbülator yüksekliği)	51
Şekil 7.9. Hız akım çizgileri ve hız dağılımı (25cm türbülator yüksekliği)	52
Şekil 7.10. Kanat üstü basınç dağılımları (15cm türbülator yükseklik)	53
Şekil 7.11. Kanat üstü basınç dağılımları (25cm türbülator yükseklik)	54
Şekil 7.12. Kanat üstü hız çizgileri (15cm türbülator yükseklik)	55
Şekil 7.13. Kanat üstü hız çizgileri (25cm türbülator yükseklik)	56
Şekil 7.14. Kanat üzerindeki basınç dağılım grafikleri	57

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Tükenebilirliğine göre enerji türleri	1
Tablo 7.1. Türbin kanatları üzerindeki basınçların yüzdesel değişimi.....	50



ÖZET

Anahtar kelimeler: HAD, Rüzgâr, Rüzgâr Türbini

Aerodinamik kuvvetlerin etki ettiği çalışma alanları ve rüzgâr türbinleri için kanat kesitleri geliştirilmiş olup çeşitli kullanımlar için istenilen özelliğe göre yeni kanat kesitlerine ihtiyaç artmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinden, belirli rüzgâr hızlarında sahip oldukları kaldırma kuvvetine göre elde edilen güç bellidir. Sahip olduğumuz kanat profili yapısında belirli değişiklikler yapılarak aynı hızlarda hatta daha düşük hızlarda daha fazla güç elde edilmesi mümkündür. Böylece rüzgâr türbinlerinin daha verimli olabilmesi için mevcut taşıma kuvvetinden daha fazla taşıma kuvveti elde edilmesi ve mevcut sürüklenme kuvvetinden ise daha az sürüklenme kuvveti elde edilmesi gerekir.

Bu çalışmada, kord uzunluğu 1 metre olan ve 1 metre uzunluğunda kanat modelinin 3 boyutlu tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan kanat üst yüzeyini kord uzunluğu boyunca kanat boyuna 90 derece, 30 derece, 45 derece ve 60 derecelik açılar ile yerleştirilen türbülatorlerin etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları kullanılarak analiz edilmesi sağlanmıştır. Aerodinamik analiz yapılırken sadece tamamen türbülanslı akışlar için geçerli olan k-epsilon modeli kullanılmıştır. ANSYS / Fluent programında 5 metre/saniye, 10 metre/saniye ve 15 metre/saniye hızdaki basınç ve hız dağılımları incelenmiştir.

WINDTURBINE BLADE ANALYSIS WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS USING WINGS TURBULATORS

SUMMARY

Keywords: CFD, Wind, Wind Turbines

Wing sections have been developed for working areas and wind turbines affected by aerodynamic forces and the need for new wing sections is increased according to the desired feature for various uses.

The power obtained from the wind turbines according to the lifting force they have at certain wind speeds is certain. We have made certain changes in the structure of the wing profile is the same speeds even lower speeds, it is possible to get more power. Thus, in order to have more efficient wind turbines more than the existing transport force moving power from the drag force available and is less drag force must be obtained.

In this study, 3-dimensional design of the wing model with a length of 1 meter and a length of 1 meter was made. The upper surface of the wings made the design of the cord along the length of the wing longitudinal 90 degrees, 30 degrees, 45 degrees and 60 degrees angles placed with swirl-effect analysis using computational fluid dynamics programs. Aerodynamic analysis is valid for only fully turbulent flows when k-epsilon model. ANSYS/Fluent program of 5 meters/second, 10 meters/second and 15 meters/second velocity distributions of the pressure and speed.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sistemlerin iş yapma yeteneğine enerji adı verilir. Dünya üzerinde kullanılan enerji kaynaklarından bazıları tükenir ve bir daha işe yaramaz duruma gelir. Enerji talebi her geçen gün artmaktadır. İnsanoğlu enerji talebini karşılaması için yenilenebilir enerji kaynakları aramaya başlamıştır [1].

Artan talep ile beraber fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. Fosil yakıtlar kullanıldıkça çevremizde olumsuz etkiler ortaya çıkmaktadır. Çevremizde oluşan zararlar sonrasında ozon tabakası hasar görmüş ve güneşten gelen zararlı ışınları engelleme işlevini yerine getiremez olmuştur [1].

TÜKENEN ENERJİ	(YENİLENEN) ENERJİ
• Kömür, • Linyit, • Petrol, • Doğalgaz, • Nükleer	• Su (Hidrolik), • Güneş, • Rüzgâr, • Dalga, • Jeotermal, • Biyoenerji, • Gelgit

Tablo 1.1. Tükenebilirliğine göre enerji türleri [2].

Yenilenebilir enerji kaynakları incelendiğinde rüzgar enerjisinin öneminin yüksek olduğu görülmekte olup gelişmiş ülkelerin rüzgar enerjisinden azami derecede faydalanmaya çalıştıkları görülmektedir [3].

Güneşin yaydığı enerjinin; kara, deniz ve atmosfer üzerini eşit ısıtamaması sebebiyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları sonrasında rüzgar oluşmaktadır. Rüzgar, yüksek basınçtan alçak basınca doğru yer değiştiren havanın dünya yüzeyine göre bağlı hareketidir [2].

Havanın hareketini ve rüzgarın oluşmasına sağlayan, rüzgarın hızına etki eden atmosfer içerisinde bulunan kuvvetler; merkezkaç kuvveti, coriolis kuvveti, basınç gradyan kuvveti ve sürtünme kuvvetidir.

Rüzgarların meydana gelmesine faydası olmayan ve rüzgar hızını azaltmaya çalışan kuvvetler sürtünme kuvveti olarak adlandırılır. Sürtünme kuvveti yüzeye yakın yerde en büyüktür ve türbülanslar sayesinde yukarı doğru taşınır. Havaya etki eden kuvvetler sayesinde ortaya çıkan rüzgar enerjisinin bir kısmı faydalı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir [4].

BÖLÜM 2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

2.1. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisinin kaynağı güneştir. Rüzgâr enerjisine dönüşen güneş enerjisi yerel farklılıklar ve eşit olmayan ısınmaya bağlı zamansal ve mahalli değişiklikler gösterir. Rüzgâr hızı yükseklik ile, gücü ise rüzgâr hızının küpüyle orantılı biçimde artar. Topografya rüzgârın hareketinde önemli rol oynar. Dağlar, tepeler ve kayalık alanlar, rüzgâr profillerini etkiler [2].

Çevreye zararı az olan ve ekonomik olarak adlandırılan yenilenebilir enerji kaynakları içinde bulunan rüzgâr enerjisi genel olarak aşağıdaki amaçlarla kullanılabilir:

- Düşük güç gerektiren alanlar,
- Yüksek güç gerektiren alanlar,
- Küçük işletmeler, çiftlikler, evler ve sulama sahalarında.

Rüzgâr enerjisi kullanımının pozitif yönleri;

- Sera gazı etkisi oluşturmaması,
- Temiz enerji kaynağı olması,
- Güvenirliğinin artması,
- Rüzgâr türbini bulunan arazilerin ikili kullanım imkanına sahip olması,

Rüzgâr enerjisinin bazı negatif yönleri de bulunmaktadır. Bunlar;

- Gürültü kirliliğine sahip olması,
- Kuşların yaralanması ve ölmelerine sebep olması,
- TV görüntülerine ve iletişim sistemlerini etkilemesi [5].

2.2. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbini üzerinde bulunan üreteç, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Havanın yoğunluğu az olduğundan, rüzgârdan sağlanacak enerji rüzgârın hızı ile ilişkilidir. Rüzgâr hızı yükseklik ile, gücü hızının küpü ile orantılı biçimde artış gösterir. Özgül rüzgâr gücü, hava akımına dik birim alana düşen güçtür. Topografik şartlara göre yerden 50 m yükseklikte özgül güç, hız 3,5 m/s'den küçük olabilirken 50W/m²'den az olabileceği gibi hızın 11,5 m/s'den büyük değerlere çıkması durumunda 1.800 W/m²'den büyük olabilir. Rüzgâr hızının değişken özelliğe sahip olmasından ötürü, rüzgâr enerjisinin sahip olduğu potansiyelden elde edilecek enerji, yıllık ortalama hız değeri üzerinden hesaplanan enerji miktarından daha fazla çıkmaktadır. Türbinin ürettiği enerji miktarı, rüzgâr hızı dağılımı ile ilişkilidir. Rüzgâr hızı, frekansın dağılmasına göre benzer ortalama rüzgâr hızlarına sahip farklı alanlarda, iki kata çıkabilecek güç yoğunluğu farklılıkları oluşturabilir. Bu farklılık hızın küp ile orantılı olmasından kaynaklanmaktadır [5].

2.3. Rüzgâr Türbini Türleri

Türbinler sahip oldukları dönme eksenine göre düşey eksenli ve yatay eksenli ve olacak şekilde ikiye ayrılırlar.

2.3.1. Düşey (Dikey) eksenli rüzgâr türbinleri

Türbin mili düşey ve rüzgârın geliş yönüne dik olarak konumlanmıştır. Savonius ve Darrieus diye adlandırılan çeşitleri bulunmaktadır. Genellikle deney amaçlı kullanılmaktadırlar ve ticari kullanımları nadirdir. Düşey eksenli türbinler her yönlüdür ve değişen rüzgâr istikametlerinde dönerler. Böylece rüzgârı her bir açıdan karşılarlar.

Düşey eksenli türbinlerin avantajları;

- Türbini rüzgâr yönüne çevirmeye gerek duyulmaz.
- Türbin mili haricindeki tüm parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen yer seviyesinde çıktığından transferi daha kolaydır.

Dezavantajları ise;

- Yer seviyesinde bulunduklarından alt noktalardaki rüzgâr hızları ve verimi düşüktür.
- İlk hareketin bir motor tarafından verilmesi gerekir.
- Yere sabitlenmesi için tellere ihtiyaç duyulmaktadır.
- Türbin mili yataklarının değiştirilmesi için makinenin tamamının yere yatırılması gerekir.

2.3.2. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerin dönme eksenleri rüzgâr yönüne paralel olarak konumlanmıştır. Kanatlarının konumu rüzgâr yönüyle dik açı yapacak şekilde tasarlanmıştır. Ticari amaçla kullanılan türbinler yatay eksenlidir.

Yatay eksenli türbinler dönme hızlarının yavaş ve yüksek hızlarda olmasına göre ve rüzgârı alış yönüne göre önden ve arkadan rüzgârlı türbinler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Yatay eksenli türbinlerin çoğunluğu, rüzgârı ön yüzeyden alacak şekilde dizayn edilir [7].

2.4. Rüzgâr Türbini Elemanları

Rüzgâr türbinleri; kule, jeneratör, dişli kutusu, rüzgâr pervanesi ve elektrik/elektronik elemanlar oluşur.

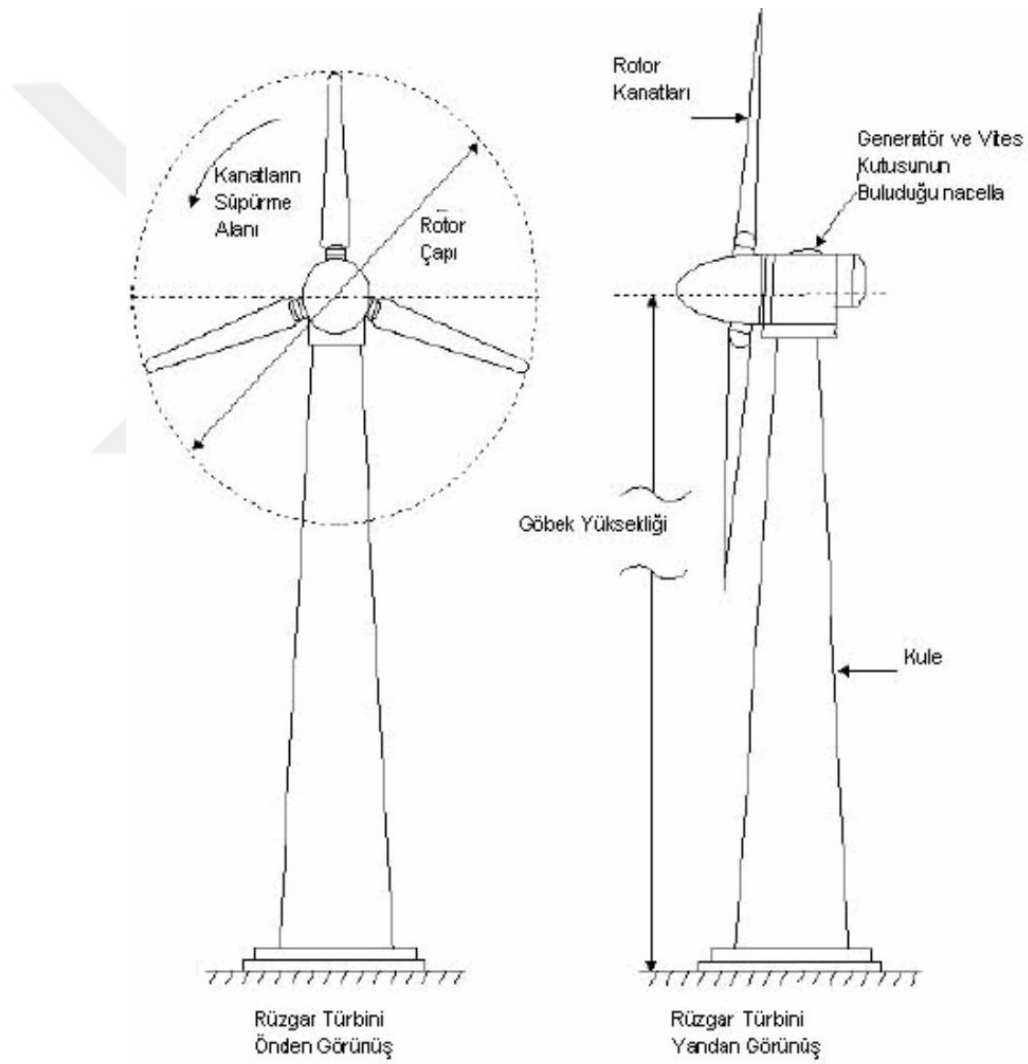
Rüzgâr türbini çevredeki engellerin rüzgârı kesemeyeceği yükseklikte bulunan kule ve bunun üzerine koyulmuş gövde ve rotordan ibarettir. Rüzgârdan elde edilen kinetik enerji rotor sayesinde mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin hareketi hızlandırılarak, gövdede bulunan jeneratöre iletilir. Jeneratör tarafından elde edilen elektrik enerjisi akülerde depolanarak veya direkt olarak alıcılara aktarılarak kullanılır.

Aşağıda belirtilen ifadeler genellikle bütün türbinler için kullanılmaktadır;

- Göbek yüksekliği: Göbeğin yer yüzeyinden yüksekliğini,
- Uç hız oranı: Kanat ucu hızının, rüzgâr hızına oranı,

- Süpürme alanı: Rotor diskinin dönerken taradığı alanı,
- Güç derecesi: Elektriksel kullanımlarda devamlı olarak elde edilen çıkış gücü olarak adlandırılır.

Elektrik üretiminde amacıyla çalıştırılan rüzgâr türbinlerine ait ana parçalar; rotor kanatları, iletim sistemi, fren sistemi, yaw (döndürme) sistemi, jeneratör ve kuledir. Şekil 2.1.'de bu parçalar gösterilmektedir [4].



Şekil 2.1. Rüzgâr Türbinin Yandan ve Önden Görünüşü

2.4.1. Kule

Rüzgâr türbinine ait kule, türbinin kafa kısmını ve rotoru üzerinde bulundurur. Kulenin yüksekte yer alması rüzgâr hızlarının yerden yükseldikçe artmasından ötürü avantajdır. Kuleler tüp ya da kafes biçiminde yapılabilmektedir [3].

2.4.2. Kanatlar ve rotor

Kanatlar rüzgârı tutar ve rüzgârın gücünü rotora iletir. Rotor, üzerinde iletilen güü şaft vasıtasıyla dişliye, oradan da jeneratöre taşıyan en dış birimdir. Rüzgâr türbinlerinde maksimum enerji üretimini elde edebilmek çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler türbin yüksekliği, türbin kanadının sahip olduğu süpürme alanı ve aerodinamik yapısı, havanın yoğunluğu ve rüzgârın hızıdır. En önemli faktörlerden biri rüzgâr türbin kanadının aerodinamik tasarımıdır [1].

Kanat dizaynı, rüzgâr türbininde çok önemlidir. Kanat tasarımı konusunda yoğun çalışmalar yapılmış ve çeşitli kanat profilleri ortaya çıkartılmıştır. Kant profilleri üzerinde teorik çalışmalar yapılan NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) profilleri örnek olarak gösterilebilir [1].

Rotor sabit bir mile takılır. Geleneksel türbinlerle kıyaslama yapıldığında, dişli sistemlerde gerek duyulan birçok yataklama noktasına karşın, sistemde iki adet yavaşça dönen rulmanlı yatak yer almaktadır [1].

2.4.3. Kanat döndürme mekanizması (pitch)

Kanat döndürme mekanizmasına sahip türbinlerin kanatları, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmemişlerdir. Bu sistem ile bütün hızlarda kullanılarak elde edilen enerjinin yükseltilmesi sağlanabilir veya sistemde aşınmayı azaltma amacı için sadece nominal hızın üzerinde güç kontrolü için kullanılabilir [1].

2.4.4. Fren

Rüzgâr sonucu ortaya çıkan enerjinin, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Bu yüzden yüksek rüzgâr hızlarında meydana çıkacak kuvvetler yüksek olacağı görülür ki bu kuvvetleri kontrol altına alabilmek için fren sistemi kullanılması gerekmektedir. Fırtınalı havalarda rüzgâra karşı gelebilmek, hatta tesisten yararlanılmayacaksa tamamen durdurmak gerekir. Mekanik fren, dişli kutusu içerisinde bulunan bir diskten oluşmaktadır [1].

2.4.5. Düşük hızlı şaft

Türbinin rotor bağlantı noktası yüksekliğinden dişli kutusuna bağlanmasını sağlar ve aerodinamik frenleri işletebilecek hidrolik sistemleri borulara bağlar [1].

2.4.6. Dişli kutusu

Sol tarafında bulunan düşük hızlı şaft ile sağ tarafında bulunan yüksek hızlı şaft ile rotordan elde edilen gücün jeneratöre aktarılması görevi görülmektedir. Rotor tarafından elde edilen yavaş dönme hızı ve yüksek tork, dişli kutusuyla jeneratör için kullanılan yüksek hız, düşük tork gücüne çevrilir [1].

2.4.7. Jeneratör

Türbinlerde elde edilen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için gerekli olan parçadır. Rüzgâr türbinleri senkron veya asenkron çalışabilecek şekilde tasarlanırlar [7].

2.4.8. Kontrol kutusu

Kontrol kutusu, türbine etki eden şartları sürekli olarak izler ve rota mekanizmasını (yaw) kontrol eden bir bilgisayara sahiptir. Bir arıza durumunda türbinin çalışmasını otomatik olarak durdurur ve operatöre çağrı mesajı gönderir [1].

2.4.9. Anemometre ve rüzgâr gülü

Rüzgârın hızı ve yönünü ölçmek amacıyla anemometre ve rüzgâr gülü kullanılır. Rüzgâr gülünden tarafından gönderilen sinyaller, türbine ait elektronik kontrolcü tarafından alınarak, yaw yardımıyla rüzgâra karşı türbini konumlandırmak amacıyla kullanılır [3].

2.4.10. Türbin kafa kısmı

Türbinin dişli kutusu ve jeneratör dahil diğer ana parçalarını içine alan kısım [1].

2.4.11. Yüksek hız şaftı

Elektrik jeneratörünü çalıştırılması görevini yürütür ve acil bir mekanik disk freni ile birliktedir [1].

2.4.12. Rota mekanizması ve motoru (yaw)

Yaw, rüzgârgülünü tarafından iletilen sinyaller ışığında rüzgâr yönünü belirleyen elektronik kontrolcü tarafından yönetilir. Rüzgârın yönü değiştiği anda rota mekanizması devreye girerek kanatların en uygun konuma gelmesini sağlar [3].

2.5. Rüzgâr Türbini Kanat Karakteristiği

Türbinlerin çalışma prensibinin anlaşılabilmesi için sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin tanımlamasının iyi yapılması gerekmektedir. Sürüklenme kuvveti, kanat üzerinde akış yönünde meydana gelen kuvvet olup minimum sürüklenme kuvveti hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir.

Kaldırma kuvveti, akış yönüne dik olarak meydana gelen kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Hava akış hızının artması sonucu basınç düşer ve hava akış hızı azalması sonucunda basınç artar ve bu olay Bernoulli etkisi olarak tanımlanır. Kaldırma kuvvetleri cisim üzerinde emme veya çekme meydana getirir [8].

Kanat profilleri üzerinde oluşan sürükleme ve kaldırma kuvvetlerine ait özellikler, rüzgâr tünellerinde yapılan testlerle belirlenmekte olup testlerde farklı hücum açılarında birimsiz büyüklükler olan sürükleme katsayısı (C_d) ve kaldırma katsayısı (C_l) tespit edilir. Aerodinamik kuvvetler (Kaldırma ve Sürüklenme) havanın akış hızına, kanadın boyutuna, hava yoğunluğuna ve hücum açısına göre değişim gösterir. Birimsiz büyüklük olan sürüklenme ve kaldırma katsayıları vasıtasıyla trbın için uygun kanat yapısı belirlenir [8].

Kanatlar, trbınlerde meydana gelen mekanik gücün arttırılması amacıyla kullanılan elemanlar olup kanadın kiriş uzunluğu aerodinamik performans üzerine etkisi bulunmaktadır. Kanat seçimi için önemli etkenlerden biri Reynolds sayısı olup en uygun hücum açısını (α) bulmak performans belirlemesi için gereklidir [9].

BÖLÜM 3. RÜZGÂR TÜRBİN TEORİLERİ

3.1. Rüzgârın Güce Dönüşümü

Bir cismin konumu nedeniyle sahip olduğu enerjiye potansiyel enerji, hareketi sebebiyle sahip olduğu enerjiye ise kinetik enerji adı verilir. Hareket halinde bulunan her cismin bir kinetik enerjisi vardır.

V hızı ile hareket eden hava kütlesinin hacmi V_h , yoğunluğu ρ ile gösterilirse hava için kinetik enerji eşitliği;

$$E_k = \frac{1}{2} \rho V_h V^2 \quad (3.1)$$

Hareket halindeki hava kütlesi, rüzgâr türbininin A süpürme alanındaki kanat sistemine düşey yönde çarptığı zaman, çarpan havanın kinetik enerjisinin bir kısmı frenlenerek rüzgâr türbininin dönmesini sağlar. Kanatların süpürme alanına çarpan havanın debisi $A \cdot V$ ise, birim zamanda yapacağı iş yani rüzgâr gücü denklem 3.2' deki gibidir.

$$P_0 = \frac{\rho}{2} V A V^2 = \frac{\rho}{2} A V^3 \quad (3.2)$$

Süpürme alanına çarpan rüzgâr hızının V , birim zamanda yapacağı basınç p ve iş fonksiyonları da dikkate alındığında maksimum teorik rüzgâr türbin gücü denklem 3.3 elde edilir.

$$P_{max} = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} A V^3 \quad (3.3)$$

Burada;

P_{max} : Maksimum teorik rüzgâr türbin gücü, [kW]

ρ : Hava yoğunluğu, [m^3/kg]

A: Kanat sisteminin süpürme alanı, [m²]

V: Rüzgâr hızı, [m/s]

Türbine ait teorik gücün maksimum olduğu an, sisteme etkiyen V rüzgâr hızının, sistem tarafından engellenip arka kısma geçen, V_2 rüzgâr hızına ile arasındaki oran $1/3$ 'tür. Maksimum dinamik güç aerodinamik faktörlerden ötürü türbin gücünden fazla olmaktadır.

3.2. Rüzgâr Türbin Teorileri

Türbinlerin tasarımı amacıyla geliştirilen teoriler güç tahmini için önemlidir. İdeal disk teorisi (doğrusal momentum teorisi) geliştirilen ilk teoriler arasındadır. Bu teori; koşulların ideal olduğu düşünülmüş olup sonsuz sayıda kanata sahip ve sıfır kalınlıkta bir rotor bulunmaktadır [10, 11, 12]. Kanat elemanı momentum teorisi; ideal disk teorisi ile kanat elemanı teorisinin birleşimidir [11]. Şu anda geçerliliği olan bir teoridir. Kanat elemanı teorisi sayesinde kanatlara ait şekiller tanımlanarak kanattaki diferansiyel (eğrisel) kısmın analizleri yapılabilir.

İyileştirilmiş pervane teorileri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Doğrusal ve Açısal momentum teorisi
- Kanat eleman teorisi

3.2.1. Momentum teorisi

Momentum teorisi doğrusal ve açısal momentum teorisi olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır.

3.2.1.1. Doğrusal momentum teorisi ve Betz limit

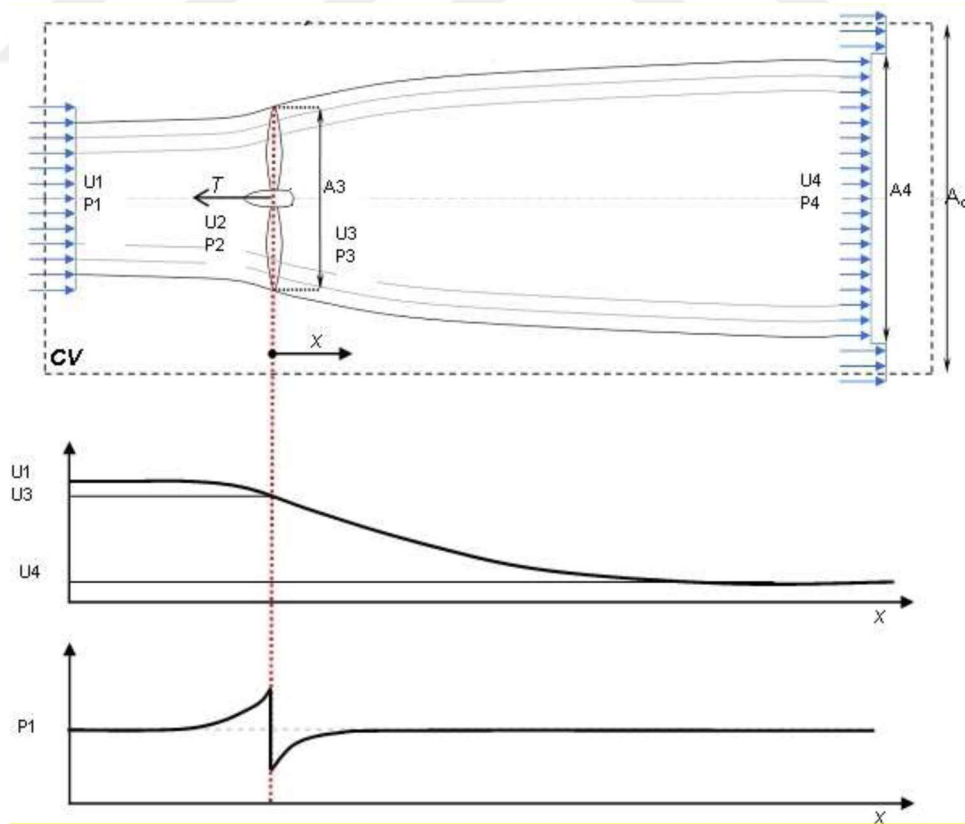
Rüzgâr türbini boyutları aerodinamik yapı ile doğrudan ilişkili olup sistem ne kadar uygun olursa olsun rüzgârdan elde edilebilecek enerjinin bir üst limiti bulunmaktadır. Betz tarafından 1920 'lerde belirlenen bu limite Betz limiti denilmektedir [12, 13, 14, 15]. Betz, söz konusu teoriyi hesaplarken Şekil 3.1.'deki hareketli diske etki eden hava

akımları için enerjinin korunumu kanunlarını kullanmıştır. İdeal çalışma şartlarında rotor, serbest şekilde akan rüzgârın ancak 3 'te 2 'sinden faydalanabilmekte fakat pratikte istenilen ideal şartlar elde edilemeyeceğinden bu limite ulaşılması zordur.

Maksimum güç aşağıdaki etkenlere bağlı olarak düşüş gösterebilir;

- Rotor arkasında oluşan çıkış akısı (vorteks)
- Sıfır olmayan aerodinamik sürüklenme
- Kanatların sonlu sayısı,

Hava akımı, U_1 hızı ile havanın girdiği ve U_4 hızı ile çıktığı bir akım tüpü olarak düşünülmektedir. Diskin tam önünde basınç P_2 değerine yükselir ve hemen arkasında P_3 değerine düşer ve daha ileride atmosfer basıncına eşitlenir. Bu teoride bir boyutlu akıştan ve buna ek olarak sadece eksenel akıştan bahsedilmiştir ve beş adet kabul yapılmıştır; kararlı akış, homojen, sıkıştırılamaz, sürtünme yok, itki rotor alanına düzgün dağılmıştır.



Şekil 3.1. İki boyutlu boru akış sınırı

İdeal bir türbin rotorunun gücünü ve rüzgârın rotor üzerine itki etkisini basit modelle açıklayacak olursak;

İtki, momentum oranındaki değişime eşittir;

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (3.4)$$

Akım tüpü boyunca kütleli debi;

$$\dot{m} = (\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 \quad (3.5)$$

Lineer momentumun korunumundan, 1 boyutlu, sıkıştırılamaz ve daimî akış için itme kuvveti;

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (3.6)$$

Böylece rotor arkasındaki hızın, rotor önündeki hızdan küçük olduğunu görebiliriz.

Rotor pervanesinin her iki tarafında da iş yapılmadığı için, Bernoulli denklemi rotorun her iki tarafı içinde yazılabilir. Şekil 3.1. dikkate alınarak 1-2 ve 3-4 noktaları arasında Bernoulli denklemi yazılırsa,

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (3.7)$$

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (3.8)$$

elde edilir.

İtke kuvveti, diskin iki yönünde ortaya çıkan net kuvvetlerin toplamı şeklinde tanımlanabilir;

$$T = A_2(P_2 - P_3) \quad (3.9)$$

(P_1 ve P_4) basınçlarının eşit olduğu ve (U_2 ve U_3) hızlarının da eşit olduğunu varsayarsak taşınırsa;

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho(U_1^2 - U_4^2) \quad (3.10)$$

elde edilir.

(3.7), (3.8) ve (3.9) denklemlerinden;

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (3.11)$$

elde edilir.

(3.6) ve (3.11) denklemlerini kullanarak rotor pervanesindeki hız;

$$\begin{aligned} \dot{m}(U_1 - U_4) &= \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2) \\ \rho A U_2 (U_1 - U_4) &= \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2) \\ U_2 &= \frac{U_1 - U_4}{U_1} \end{aligned} \quad (3.12)$$

elde edilir. Yani; rotor pervanesindeki hız, giriş ve çıkış hızlarının ortalamasına eşittir. Eğer serbest akış ve rotor pervanesine bağlı olarak rüzgâr hızındaki orantısal düşüş olarak bir eksenel indüksiyon faktörü “a” tanımlanırsa [16];

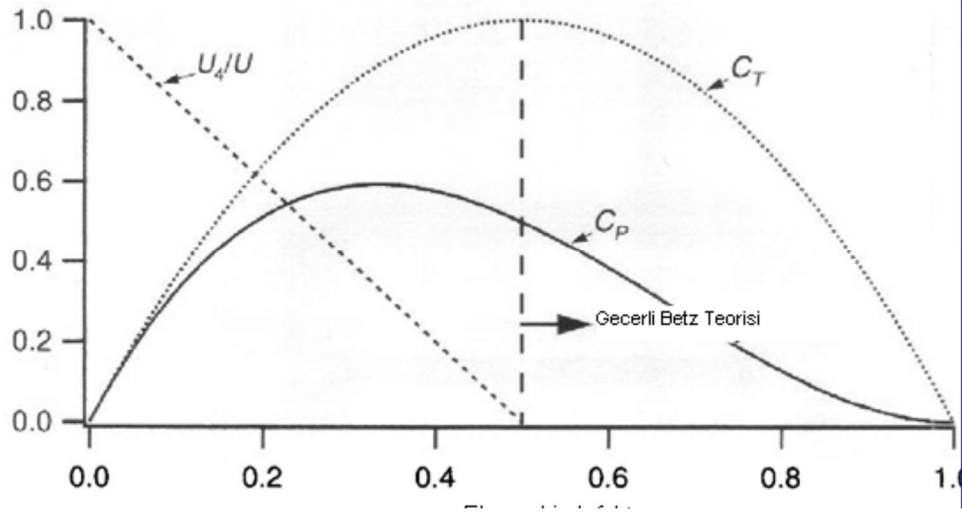
$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (3.13)$$

$$U_2 = U_1 (1 - a) \quad (3.14)$$

$$U_4 = U_1 (1 - 2a) \quad (3.15)$$

elde edilir.

“a” sıfırdan fazla olduğunda, rotor arkasında rüzgarın hızı azalır. Eğer $a > 0,5$ olursa; rotor arkasındaki rüzgârın hızı sıfıra doğru düşer ve güç katsayısı bu değerden sonra düşüşe baslar.



Şekil 3.2. Rotor arkasında oluşan hız ve eksenel indüksiyon faktörüne göre güç ve itki katsayıları [16]

Güç çıkışı, P_g , itme kuvveti ile rotor pervanesindeki hızın çarpımına eşit olacaktır;

$$P_g = T U_2$$

$$P_g = \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2) U_2 \quad (3.16)$$

elde edilir.

Rotor gücü;

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2 \quad (3.17)$$

olarak elde edilir.

Güç çıkışı ile güç sabiti arasındaki ilişki [16];

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (3.18)$$

Denklem eşitliklerinden, güç katsayısı C_p ;

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (3.19)$$

elde edilir.

C_p 'nin maksimum değeri; (3.19) denkleminin a 'ya göre türevi alınıp, sıfıra eşitlendiğinde bulunabilir;

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) \quad (3.20)$$

Burada maksimum güç çıkışı $a=1/3$ değerinde olur ve $(C_p)_{\max}=16/27$

Elde edilen değer, ideal ortam şartlarının oluşması durumunda, rüzgârdan alınabilecek enerji miktarının teorik olarak en üst sınırındır.

(3.11), (3.14) ve (3.15) denklemlerinden itki kuvveti;

$$T = \frac{1}{2} \rho A U_1^2 4a(1 - a) \quad (3.21)$$

elde edilir.

Güç katsayısı gibi itki katsayısı da benzer şekilde tanımlanır [16];

$$C_T = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (3.22)$$

İtki katsayısı C_T ;

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3.23)$$

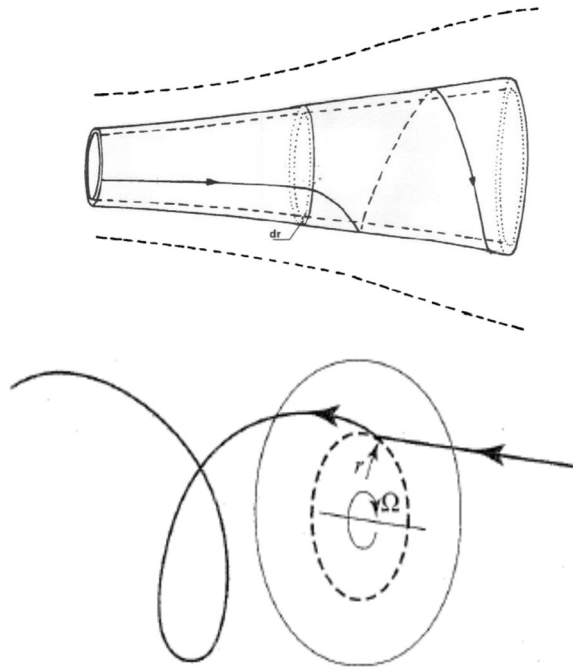
olarak ifade edilir.

$a=0.5$ iken $C_T=1$ maksimum değerine eşit olur ve rotor arkasındaki hız sıfırlanır.

Maksimum güç çıkışında ($a=1/3$), $C_T=8/9=0.89$

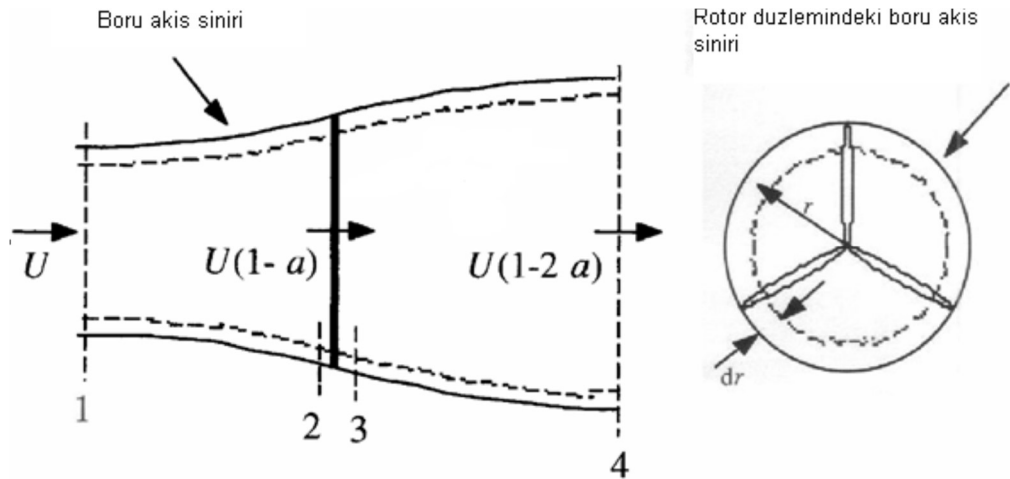
3.2.1.2. Açısal momentum teorisi

Pervaneye dik gelen rüzgâr akısı, rotordan geçerken rotora bir etki olarak tork uygular ve rotorda tepki olarak rüzgâra tork uygular. Böylece hava akısı ile birlikte türbin rotoru Şekil 3.3.'deki gibi dönmeye baslar ve açısal momentum elde edilir.



Şekil 3.3. Rotordan geçen rüzgârın girdap hareketi [16]

Teğetsel hız, tüm radyal pozisyonlarda aynı değildir ve buna bağlı olarak aksel hız da aynı değildir. Bu iki hız bileşenindeki değişkenliği incelemek için rotor pervanesi, Şekil 3.4.’deki gibi yarıçapı r olan ve radyal genişliği dr olan dairesel bir halka gibi düşünülmüştür.

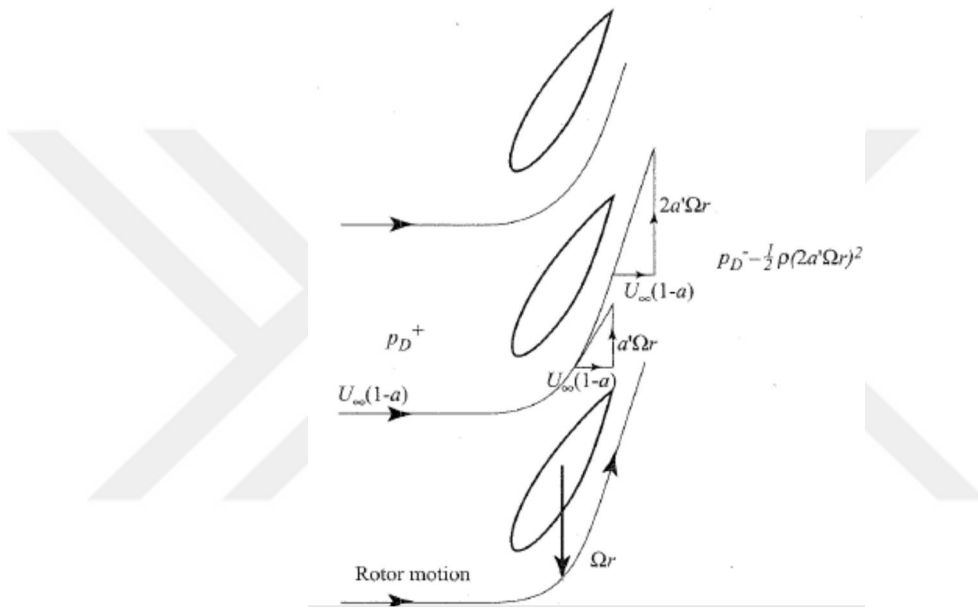


Şekil 3.4. İki boyutlu boru akış sınırı ve kesit alanı [16]

Şekil 3.5.’de havanın, kanat çapı boyunca teğetsel hareketi gösterilmiştir. Teğetsel hızdaki değişim olarak bir teğetsel indüksiyon faktörü tanımlanır ve a' ile gösterilir.

Yukarı akış yönünde teğetsel hız sıfırdır. Fakat aşağı akış yönünde kanadın en uç bölgesindeki teğetsel hız $2\Omega r$ 'dir. Diskin orta noktasında, dönme düzleminde r kadar uzaktaki noktada teğetsel hız Ωr olarak elde edilir.

Teğetsel yöndeki akış hızı, kanatlar arasına sıkıştığında hızlanır, buna zıt olarak kanatlardan rahatça ayrıldığında etkisi azalır.



Şekil 3.5. Havanın kanat çapı boyunca teğetsel hareketi

Akışın açısal hızını ω , rotorun açısal hızını da Ω olduğunu varsayarsak;

P' , basınç düşümünü bulmak için; kanatların açısal hızıyla (Ω) ilgili giren ve çıkan akışlarla ilgili Bernoulli denklemi yazılabilir.

Kanatlara bağlı havanın açısal hızı ($\Omega + \omega$).

Eksenel hız sabitken rotorun ön ve arkasındaki basınç farkı [16];

$$P' = \rho \left(\Omega + \frac{\omega}{2} \right)^2 + \omega r^2 \quad (3.24)$$

Açısal indüksiyon faktörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir [16];

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3.25)$$

güç katsayısı;

$$C_p = \left[\frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (3.26)$$

olarak ifade edilir.

Güç üretiminin maksimum olması için $a'=1-a$ teriminin maksimum olması gerekir. a' terimi $a'=1-a$ terimine türetilip, a ya göre türevi alınarak sıfıra eşitlenirse her dairesel eleman için teğetsel indüksiyon faktörü;

$$a' = \frac{(1-3a)}{4a-1} \quad (3.27)$$

olarak ifade edilir.

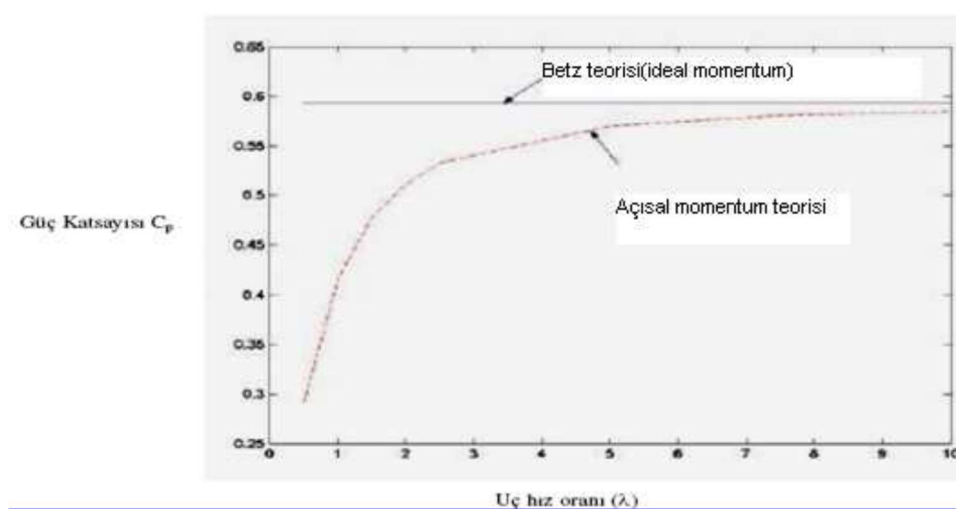
Eğer (3.26) denklemi a ya göre türevi alınırsa maksimum güç üretimi için $d\lambda_r$ ve da arasındaki ilişki elde edilir;

Buna göre güç katsayısı;

$$C_{p,max} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{(1-a)(1-2a)(1-4a)}{1-3a} \right] da \quad (3.28)$$

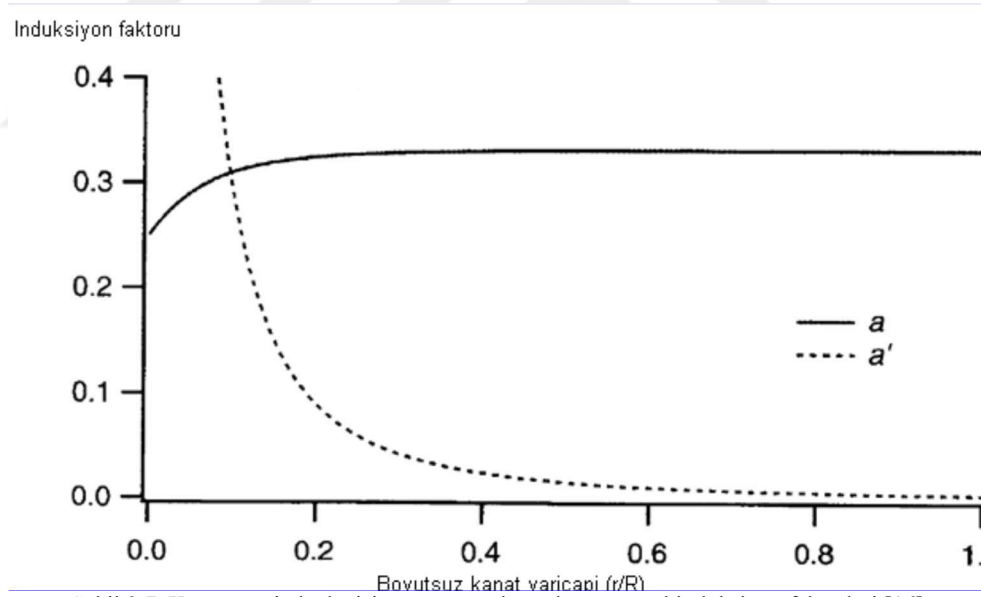
bulunur. Bu denkleme göre $\lambda_r=0$ 'daki indüksiyon faktörü (a_1 (alt limit)) ve $\lambda_r=\lambda$ 'daki indüksiyon faktörü (a_2 (üst limit)) olarak tanımlanmaktadır.

İdeal momentum teorisi ve açısal momentum teorisi sonuçları Şekil 3.6.'da verilmiştir. Grafikte incelendiğinde uç hız oranı yükseldikçe, maksimum güç katsayısının yükseldiği görülmektedir [16].



Şekil 3.6. Uç hız oranına göre güç katsayısı

Kanat üzerinde değişim gösteren eksenel ve teğetsel indüksiyon faktörleri Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kanat üzerinde değişim gösteren eksenel ve teğetsel indüksiyon faktörleri [16]

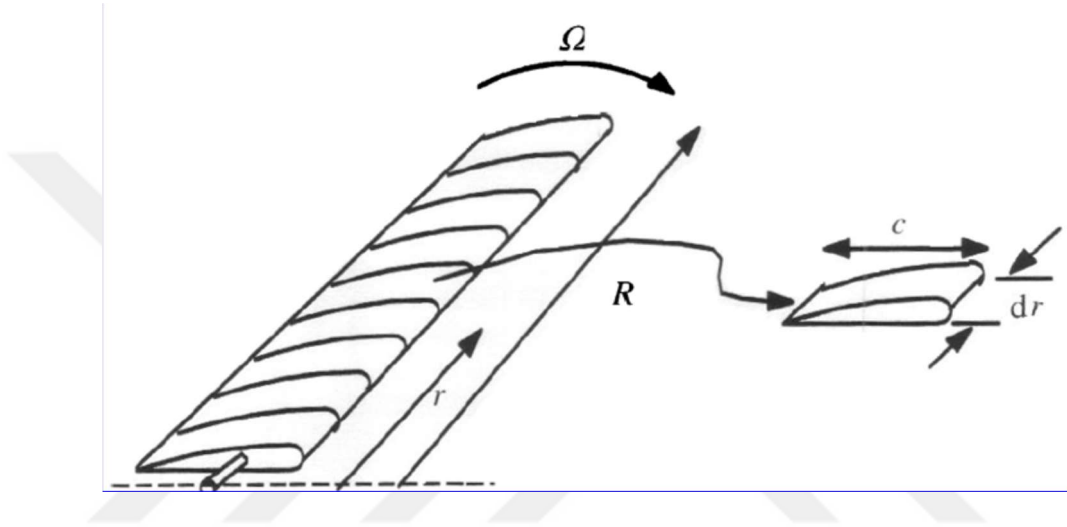
3.2.2. Kanat elemanı teorisi:

Momentum teorisinden farklı olarak; kanat elemanı üzerine gelen kuvvetlerin analizi yapılarak, kaldırma kuvveti ve sürükleme kuvveti katsayılarının, teğetsel ve normal

kuvvetlerin ve ayrıca kanat elemanının hücum açısı, bağıl rüzgâr açısı ve kanat elemanı burulma açıları hakkında bilgilerin elde edildiği teoridir.

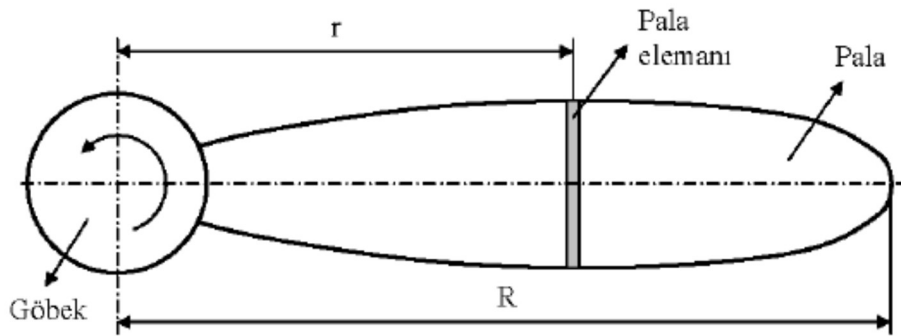
Kabuller:

- Bu analiz için, kanat Şekil 3.8.'deki gibi N elemana veya bölüme ayrılmıştır varsayımı yapılmıştır.
- Elemanlar arasında aerodinamik etkileşim söz konusu değildir.



Şekil 3.8. N adet bölüme ayrılmış kanat yarıçapı [16]

Kanat elemanı teorisi kanat palasının kanat kökünden uç kısmına kadar sonsuz sayıda profillere (ince genişliklere sahip kanat kesit biçimlerine) bölünebileceğini kabul etmektedir. Şekil 3.9.'da pervanenin dönme merkezine “r” uzaklıktaki bir kanat elemanını gösterilmektedir [17].

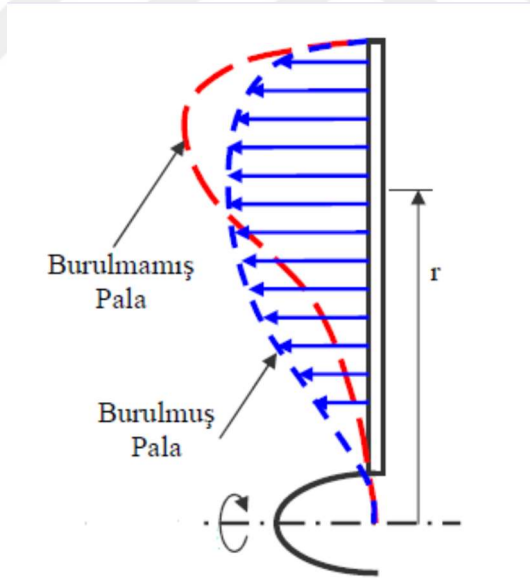


Şekil 3.9. Bir pervanenin kanat kesiti [17]

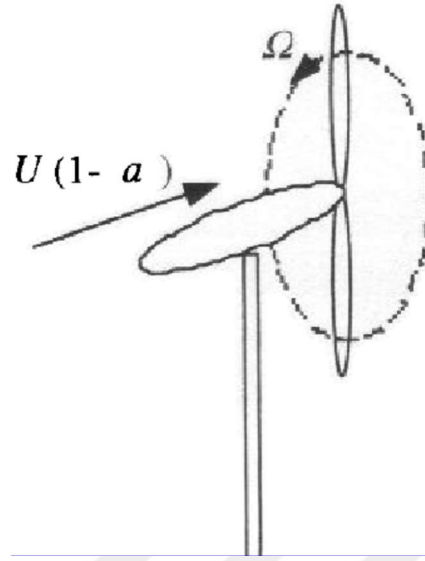
Pervanede aerodinamik kuvvet üreten kanat aslında burulmuş bir yapıya sahiptir. Burulmuş olması ve aynı zamanda uca doğru incelmesinin sebebi; kanat boyunca düzgün dağılmış bir itme kuvvetini oluşturmak ve güç eldesinde herhangi bir düşüşe neden olmamaktır. Kanat üzerinden akan hava akımı uç kısımlarda en yüksek hıza ulaşmaktadır. Şekil 3.10.'da burulmuş ve burulmamış kanatta itme kuvvetinin karşılaştırması görülmektedir. Kökten uca doğru burulmuş olan kanat üzerine etkiyen itki kuvveti düzgün dağılmış iken burulmamış olan kanat üzerine etkiyen itki kuvveti düzgün dağılmamıştır.

Rüzgârın bağıl hızı; Şekil 3.11.'de görülen rotora dik gelen doğal rüzgâr hızı ve kanadın dönmesinden kaynaklanan rüzgâr hızının vektörel toplamına eşittir ve dönen kanatlar üzerinde aerodinamik kuvvetlerin oluşmasına da katkıda bulunur.

$$U_{rel}^2 = [U(1 - a)]^2 + [\Omega x r(1 + a')]^2 \quad (3.29)$$



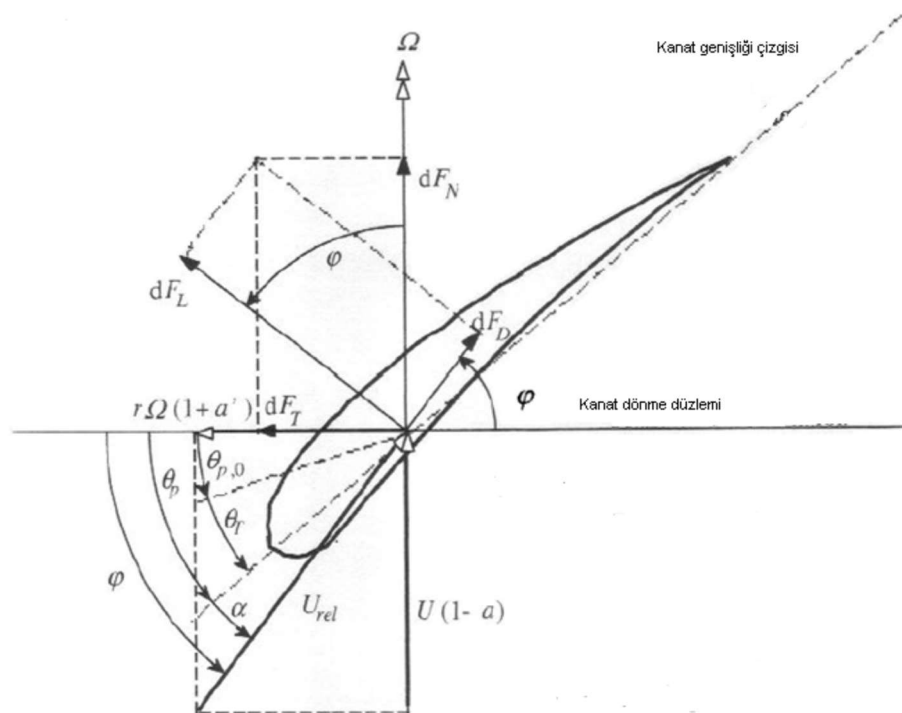
Şekil 3.10. Burulan ve Burulmayan kanatta itme kuvvetinin dağılımının karşılaştırılması (yarıçap boyunca) [17]



Şekil 3.11. Rüzgâr türbininin çevresel dönüşü ve üzerine dik gelen rüzgâr hızı [16]

3.2.2.1. Kanat kesit geometrisi

Şekil 3.12.'de bir kanat kesitine (elemanına) etki eden hızlar ve kuvvetler tanımlanmıştır.



Şekil 3.12. Kanat kesit geometrisi ve üzerine gelen kuvvetler [16]

U(1-a): kanata dik gelen rüzgâr hızı

U_{Rel}: göreceli rüzgârın hızı

θ_p: kanat burulma açısı

α: hücum açısı (kanat genişliği çizgisiyle göreceli rüzgâr hızı arasındaki açı)

φ=θ_p+ α: bağıl rüzgâr hızının geliş açısı

θ_{p,o}: uç kanat açısı

θ_T= θ_p – θ_{p,o}: kanat burulma açısı

dF_L: çoğalan kaldırma kuvveti

dF_D: çoğalan sürüklenme kuvveti

dF_N: dönme düzlemine etkiyen artan normal kuvvet (itkiye katkısı olur)

dF_T: rotor tarafından süpürülen daireye etkiyen artan teğetsel kuvvet (tork üretir)

Çeşitli sayısal akışkan programlarıyla veya kanat profilinin C_L- α grafiğinden de hücum açısı (α) elde edildikten sonra φ=θ_p+ α formülünden kanat kesit burulma açısı (θ_p) elde edilir ve göbekten uca kadar elde edilen bu açılardan kanadın en uç kesitindeki burulma açısına uç kanat kesiti burulma açısı (θ_{p,o}) denir. Daha sonra θ_T= θ_p – θ_{p,o} formülü ile de kanat burulma açısı (θ_T) elde edilir.

Şekil 3.12. dikkate alınarak kanat kesit geometrisine gelen bağıl rüzgâr hızı ve bu bağıl rüzgâr hızının geliş açısı elde edilmektedir.

$$\tan\varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r x(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (3.30)$$

$$U_{ref} = U(1 - a)/\sin\varphi \quad (3.31)$$

dF_L ve dF_D kanat kesiti üzerine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini göstermektedir.

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_{Rel}^2 c dr \quad (3.32)$$

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{Rel}^2 c dr \quad (3.33)$$

Böylece kanat elemanları teorisi iki eşitlik vermektedir. Bu eşitlikler itki kuvvet (Thrust) ve teğetsel kuvvet (tork) denklemleri olarak adlandırılır.

İlk önce, dizayn uç hız oranı (λ) ve bu uç hız oranına göre kanat sayısı (B) ve bu kanatların yarıçapları R belirlenir. Seçilen kanat profilinin bilinen, hücum açısına (α) göre C_L/C_D oranları vardır ve bu oranlardan C_L/C_D 'nin maksimum olduğu durumdaki hücum açısı seçilir. Böylece C_D katsayısının sıfıra yakın bir değer olduğu kabulü ile $C_D=0$ alınır.

$\lambda_r = \lambda(r/R)$ olduğunu göz önüne alındığında, her r noktasında bağıl rüzgâr açısı ve kanat genişliği c ;

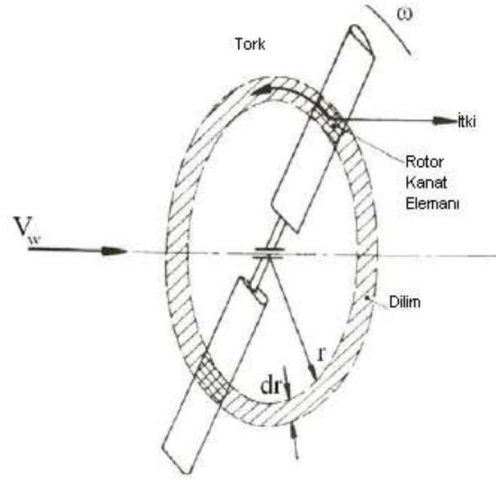
$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \quad (3.34)$$

$$c = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3BC_L \lambda_r} \quad (3.35)$$

elde edilir. Bu eşitlikler, her kanat kesitinde Betz limit değerine uygun olan kanat genişliğini ve kanat burulma dağılımını verir.

3.2.2.2. Kanat performans analizi

Kanat elemanı-momentum teorisinin ana varsayımı; kanat elemanı üzerine etkiyen kuvvetlerin sadece, eleman tarafından süpürülen halkadan geçen havanın momentumundaki değişiminden sorumlu olduğudur (Şekil 3.13.). Bu teori, kanat üzerindeki kuvvetleri ve indüksiyon faktörleri (a , a') belirlemek için hem eksenel hem de açısal moment dengesini kullanır. Bu sebepten, kanat elemanı-momentum teorisinde hem momentum teorisinden hem de kanat elemanı teorisinden elde edilen eksenel kuvvetler (itki) ve açısal kuvvetler (tork) birlikte incelenmiştir. Bu teori, rüzgâr türbini kanat tasarımlarında en çok kullanılan metottur.



Şekil 3.13. Kanat elemanın dairesel halka yapısı

Yukarıda momentum teorisinden elde edilen tork değeri ile kanat elemanı teorisinden elde edilen tork değeri birbirine eşitlendiğinde denklem (3.36) elde edilir;

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L}{(4\lambda_r \sin\varphi)} \quad (3.36)$$

Yukarıda momentum teorisinden elde edilen itke değeri ile kanat elemanı teorisinden elde edilen itke değeri birbirine eşitlendiğinde denklem (3.37) elde edilir;

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_L \cos\varphi}{(4\sin^2\varphi)} \quad (3.37)$$

Aşağıda daha önce kanat elemanı teorisinde kullanılan denklemler ile elde edilen bağlı rüzgâr geliş açısı denklemlerinden (3.38) ve (3.39) denklemleri gibi kullanışlı bağıntılar elde edilir;

$$C_L = 4\sin\varphi \frac{(\cos\varphi - \lambda_r \sin\varphi)}{\sigma'(\sin\varphi + \lambda_r \cos\varphi)} \quad (3.38)$$

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{\sigma' C_L}{(4\cos\varphi)} \quad (3.39)$$

Ayrıca, (3.38) ve (3.39) denklemlerinden türetilen bazı kullanışlı denklemler aşağıda görülmektedir;

$$\frac{a}{a'} = \frac{\lambda_r}{\tan\varphi} \quad (3.40)$$

$$a = 1/[1 + \frac{4\sin^2\varphi}{\sigma' C_L \cos\varphi}] \quad (3.41)$$

$$a' = 1/[\frac{4\cos}{\sigma' C_L} - 1] \quad (3.42)$$

3.2.2.3. Güç katsayısının hesabı

Kanadın her kesiti için a , a' ve C_L/C_D değerleri bulunduğundan sonra rotorun toplam güç katsayısı;

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} \lambda_r^3 a' (1 - a) \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cot\varphi \right] d\lambda_r \quad (3.43)$$

denkleminde hesaplanır. Burada λ_h , rotorda göbek kesitinde lokal hız oranını ifade etmektedir. Bu denklem aynı zamanda;

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} \sin^2\varphi (\cos\varphi - \lambda_r \sin\varphi) (\sin\varphi + \lambda_r \cos\varphi) \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cot\varphi \right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (3.44)$$

formunda da yazılabilir.

Bu denklemler genellikle sayısal olarak çözülebilir.

3.2.2.4. Optimum kanat şekli

Bu optimizasyonda dalga rotasyonu dikkate alınmaktadır, ancak sürüklenme yok ($C_D=0$) ve uç kaybı $F=1$ olarak alınmaktadır.

Bu sonuçlar, ideal (doğrusal) kanat teorisi (dalga rotasyonu olmayan) sonuçlarıyla mukayese edilebilir;

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \quad (3.45)$$

$$C = \frac{8\pi r \sin\varphi}{3BC_L \lambda_r} \quad (3.46)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, C_L/C_D oranının maksimum olduğu α değeri seçilir.

Kanat dayanıklılık oranı tanım olarak; kanatlar alanının kanat tarama (süpürme) alanına oranı olarak verilir.

$$\sigma = \frac{1}{\pi R^2} \int_{r_h}^R c dr \quad (3.47)$$

Eğer rotor N adet kanata sahip ise dayanıklılık oranı;

$$\sigma \cong \frac{B}{N\pi} [\sum_{i=1}^N C_i / R] \quad (3.48)$$

denklemleriyle hesaplanabilir. [17].

3.3. Kanat Seçimi

Kanat rüzgâr türbinleri için önemli olup kanat yapısı türbin tarafından kazanılacak maksimum gücü etkilemektedir. Farklı kanat dizaynları üzerinde çalışmalar yapılmış olup en iyi kanat yapısının bulunması için hesaplamalar devam etmektedir. Kanat tasarımlarının ana amacı rüzgâr türbinlerinden sağlanacak gücü maksimum seviyede tutabilmek adına optimizasyon yapmaktır [13, 18].

Denklem 3.49' de sürüklenme katsayısı denklemi, denklem 3.50'de kaldırma katsayısı denklemi ifade edilmiştir.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (3.49)$$

F_D : Sürüklenme kuvveti (N)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

V : Hava hızı (m/s)

A : Kanat Alanı (m^2)

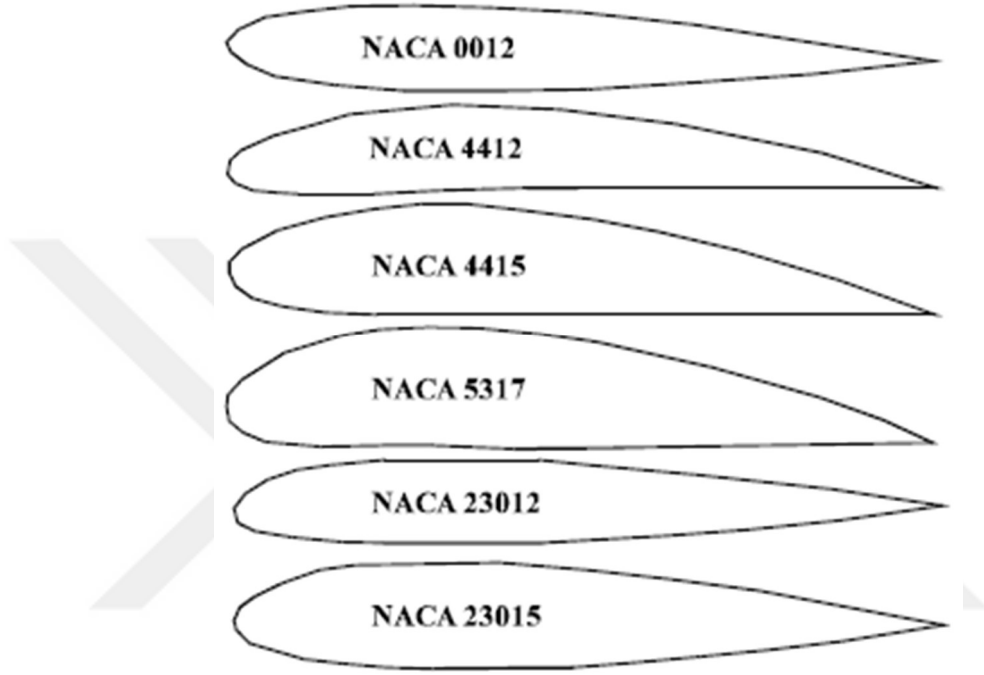
Kaldırma katsayısı;

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (3.50)$$

F_L : Kaldırma kuvveti (N)

Kaldırma ve sürüklenme katsayıları farklı hücum açıları ve farklı rüzgâr hızlarında rüzgâr tünelleri içerisinde hesaplanmaktadır.

Şekil 3.13.'de rüzgâr türbinlerinde kullanılan bazı NACA kanat profil şekilleri verilmektedir. [19]



Şekil 3.14. Bazı Rüzgâr Türbini NACA Kanat Profilleri

Yüksek λ 'lı türbinlerde C_L/C_D oranının büyük olması sebebiyle kullanılan kanat profil tipi genellikle NACA 4415'dir.

BÖLÜM 4. LİTERATÜR TARAMASI

Rüzgâr türbinlerinden, belirli rüzgâr hızlarında sahip oldukları kaldırma kuvvetine göre elde edilen güç bellidir. Sahip olduğumuz kanat profili yapısında belirli değişiklikler yapılarak aynı hızlarda hatta daha düşük hızlarda fazla güç elde edilmesi mümkündür. Böylece rüzgâr türbinlerinin daha verimli olabilmesi için mevcut tasıma kuvvetinden daha fazla tasıma kuvveti elde edilmesi ve mevcut sürüklenme kuvvetinden ise daha az sürüklenme kuvveti elde edilmesi gerekir. Yüksek C_L/C_D oranlı cihazların düşük oranlı olanlara göre daha etkin olduğu görülmektedir. Gerekli şartlar sağlandığında aynı hızlarda veya daha düşük hızlarda daha iyi sonuç elde edilip üretilen güç yükseltilebilir.

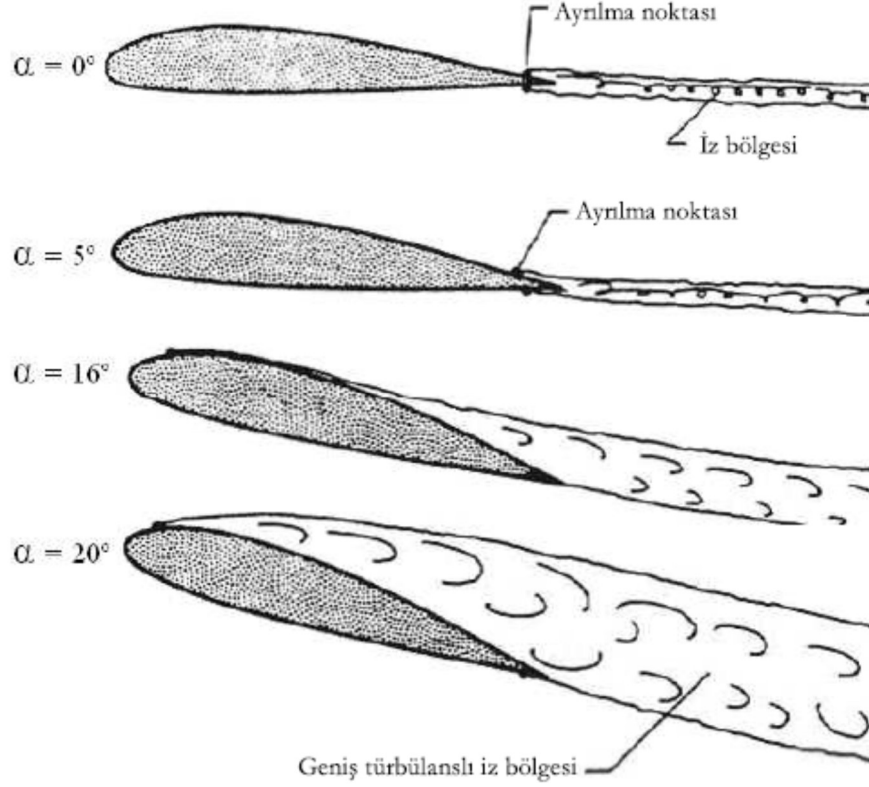
Tasıma kuvvetini arttırmak;

- Hücüm açısı artması,
- Yüksek tasıma aygıtları,
- Kanat profilinin kamburluğu,
- Aktif akış kontrol sistemleri kullanılabilir

İki nokta arasındaki basınç değişimi arttıkça, basınç gradyanı o ölçüde büyük olur. Hücüm açısı arttırıldıkça ters basınç gradyanlarının etkisi ile ayrılma noktası, hücüm kenarına yaklaşır ve hıza ve diğer parametrelere bağlı olarak klasik profiller için yaklaşık 12-160'lik hücüm açısına geldiğinde akım ayrılması başlangıcı olur. Artan hücüm açılarına göre kanat arkasında oluşan iz bölgesi ve kanattan ayrılmalar Şekil 4.1.'de görülmektedir.

S809 kanat profiline ait tasıma katsayısı, C_L ve sürüklenme katsayısı, C_D 'nin hücüm açısı ile değişim grafikleri Şekil 4.2.'de verilmiştir. Bu şekilde tasıma katsayısının tutunma kaybı açısı değerine kadar artış gösterdiği ve sonrasında aşağı yönlü hareket

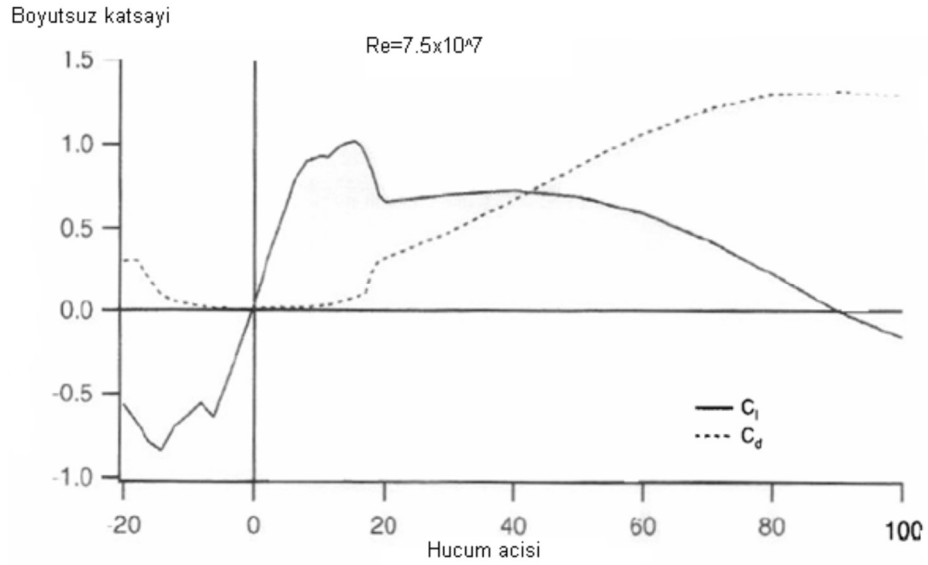
ettiği izlenmektedir. Hücüm açısının artması sonucunda ayrılma noktasının hücüm kenarına yaklaşması sebebiyle sürükleme katsayısının yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.1. Artan hücüm açılarına göre kanat arkasında oluşan iz bölgesi ve kanattan ayrılmalar

Kanat profilleri tasarlanırken C_L/C_D oranının en yüksek olduğu zamandaki hücüm açısı seçilmesine dikkat edilir [19].

Türbin kanatları için airfoil (kanat kesit) dizaynı rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesinde yüksek öneme sahip olup optimum airfoil seçimlerinin enerji üretim maliyetlerini azalttığı yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür.



Şekil 4.2. Tasıma, sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısıyla değişimi

Kullanılmakta olan NACA serisi kanat profilleri, savaş uçaklarına ait kanatlar için hesaplanmıştır. Kanat kesitlerinin geometrik tasarımları için iki metot kullanılmaktadır: Birinci yöntem, mevcut kesitlerin geometrisi üzerinde değişiklikler yapmak [20]. İkinci metotsa; istenilen aerodinamik performansı oluşturan basınç katsayı dağılımlarının belirlenmesi ve sonrada bu dağılımı veren geometriyi oluşturmak.

Kanat profilleri dizaynları ve bu profillerin aerodinamik hesaplamaları üzerine yapılan ulusal ve uluslararası birçok çalışma vardır. Suzuki ve diğerleri [21], NACA 63012 kanat profili geometrisine ait hücum kenarını alt yüzeye doğru esneterek elde edilen yeni kanat kesiti için laminar sürüklenme kuvvetinin azaldığını, analitik ve sayısal analizleriyle göstermişlerdir.

Hartwanger [22], NREL S 809 kanat kesitinin HAD analizini, XFOIL ve ANSYS CFX programlarını ile iki boyutta yapmıştır. Mauciere [23], kanat profillerindeki geometri farklılıklarının aerodinamik etkilerini araştırtmış olup yapılan çalışmada Matlab ve XFOIL programı kullanılarak farklı geometrilerdeki kanat profillerinin kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır. Sonuçlar incelenerek en iyi sonucu veren geometriyi bulma stratejileri üretilmiştir.

Kanat profillerinin HAD ile yapılan analizlerinde sürekli kullanılan kanat kesitleri seçilmiş olup bu çalışmalarda; mach ve reynolds sayılarının etkisi, farklı türbülans modelleri, ek kaldırma kuvveti oluşturan flap, slat ve slot gibi yardımcı geometrilerin etkileri üzerine yapılmıştır. Çınar ve Önen [24] yaptıkları çalışmada, flaplı kesitlerin flapsız olanlara göre daha düşük hücum açılarında daha yüksek kaldırma kuvvetinin elde edildiği ortaya çıkmıştır.

Cardoş ve Dumitrescu [25], Yatay Eksenli Türbinlerde rotor dönme hızının, rüzgâr hızının, kanat kesit geometrisinin ve kesit yüzey sürtünmesinin kanat kesitlerindeki sınır tabaka ayrılmalarına etkilerini incelemişlerdir.

Shankar, Sarada ve Rudresh [26], Fluent programı ile NACA 64-618 kanat kesit geometrisine ait 2D ve 3D olarak HAD analizini yapmışlar olup k-epsilon türbülans modeli ile stall durumunda, 2D ile deneysel verilere yakın değerleri elde edememişlerken, 3D ile elde etmişlerdir.

Kogaki ve diğerleri [27], rüzgâr türbinlerinde kanat kesiti performansı üzerinde etkisi bulunan vorteks üreticileri üzerine incelemeler yapmışlardır. NACA 4412 kesitinin aerodinamik analizi Saraf, Nazar, Singh tarafından [28] Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile k-omega ve k-epsilon türbülans modelleri seçilerek çözülmüş ve düşük hücum açılarında k-omega ile deney sonuçlarına daha yakın değerler elde edildiği gözlenmiştir.

Kumarappa, Madhukeshwara, Ravi, [29], Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile NACA 4412 kanat kesitine ait kaldırma katsayıları ve sürüklenme katsayılarının analizlerini yapmış olup çalışmada; kanat kesiti üzerinde oluşan akışın laminardan türbülansa geçişini görmek adına k-omega SST transition türbülans modeli ve Spalat Allmaras ile elde ettikleri değerleri rüzgâr tünel deney sonuçları [30] ile karşılaştırmışlardır. Yapılan eşleştirmeler sonucunda her iki türbülans modelinde bulunan sonuçların deneysel değerlerle uyumlu olduğunu saptamışlardır.

Kanat kesit geometrilerinin istenilen aerodinamik özelliklerde tasarımı veya standart kanat kesit geometrilerinin modifiye edilmesi sonucunda yeni kesitlerin elde edilmesi stratejileri üzerine olan çalışmalar daha az sayıdadır. Yeni kanat tasarımı için yapılan uluslararası çalışmalarda çeşitli teknikler [31] kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen edilen tekniklere [31, 32] değinilmeden, standart iki kanat kesit geometrisinde yapılan modifikasyonlar ile yeni geometriler elde edilmiş ve elde edilen yeni kesitlerin aerodinamik analizleri paket programlar ile yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlar orijinallerinin aynı şartlarda elde edilen sonuçları ile karşılaştırılmıştır [33].

Vorteks üreticiler kanat profili veya gövde havaya göre harekete geçtiğinde. Airfoil yüzeyi ile temas halinde yavaş hareket eden sınır tabakasının ayrılmasıyla vorteks oluşturur ve aerodinamik durdurma(stall) böylece kanatların etkinliğini artırır. (Flaplar, kanatçıklar gibi)

Dalgalı kanat kesiti adı altında yapılan patent, geliştirilmiş kaldırma / sürüklenme oranını elde etmek ve daha yüksek saldırı açılarında performansı arttırmak için havanın yeni şekli kullanmaktadır. Kanadın üst ve alt taraflarındaki kanallar aracılığıyla hava akışını koordine etmek için geleneksel bir kanat şeklini değiştiren üç boyutlu bir Dalga deseni vardır. Bu buluşun kendine has şekillendirilmiş kanat profili, bir Rüzgâr türbini kanadı da dahil olmak üzere birçok kullanıma sahip olabilir. Bu buluş etkili atak açısını ve kaldırma / sürüklenme oranını iyileştirerek daha etkili bir cihaz sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sessiz bir hava akışı sağlar, böylece konvansiyonel cihazlara nurezon gürültüsünü büyük ölçüde azaltır [34].

Aynı zamanda farklı bir patent başvurusunda rüzgâr türbini kanadında vorteks jeneratörlerinin yenilenmesi adıyla rüzgâr türbini kanadının emme tarafındaki bir ayırma hattının veya bir veya daha fazla ayırma noktasının belirlenmesini ve rüzgâr türbini kanadının emme tarafında en az bir vorteks jeneratörü içeren bir birinci girdap paneli içeren bir veya daha fazla girdap panelinin monte edilmesini içermektedir [35].

Yapılan araştırmalarda türbin kanadı üzerine türbülatorlerin (riplerin) konulmadığı ve bu türbülatorlerin etkisinin incelenmediği tespit edilmiştir. Bu çalışmada danışmanım

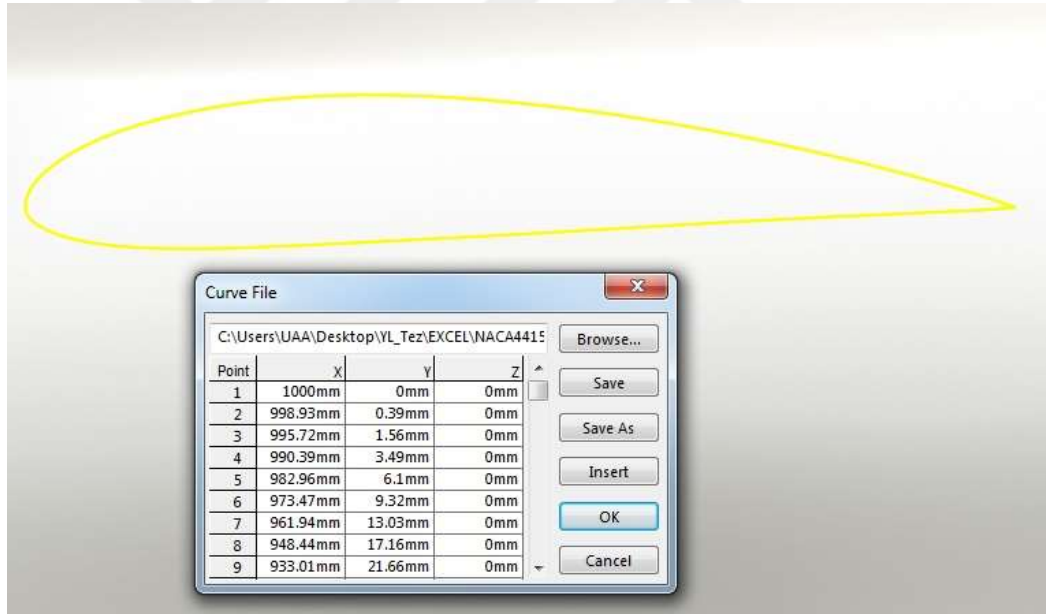
tarafından başvurusu yapılan 09.12.2017 tarih ve 2017/13391 nolu Rüzgar Türbin Kanatları üzerinde Türbülâtör Kullanımı konulu faydalı modelin teorik olarak analizi yapılmıştır.



BÖLÜM 5. SAYISAL MODEL KANAT TASARIMI

Rüzgar türbini kanadına ait kesit geometrinin modellemesi 3 Boyutlu tasarım programı vasıtasıyla tasarlanmıştır. Tasarım esnasında seçilen boyutlar rüzgar türbini kanadının kesit geometrisinin prototip ölçüleridir.

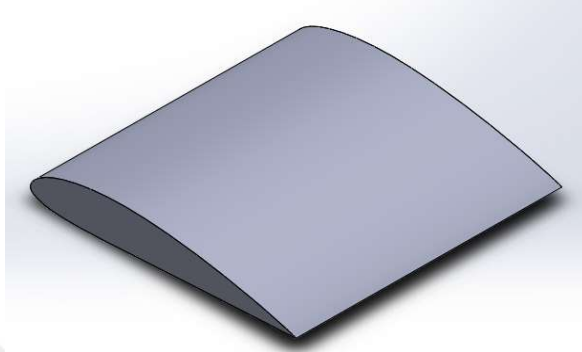
Tasarımımızda NACA 4415 modelini seçtik. Damla şeklinin tasarım programına aktarılması için birim uzunluktaki damla modeline ait koordinatlar kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Airfoil koordinatlarının tasarım programına aktarılması

Chord uzunluğu 1 metre olacak şekilde airfoil veritabanından alınan model koordinatları tasarım programına Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi aktarılmış olup girilen koordinatlara göre kanat profili ortaya çıkmıştır.

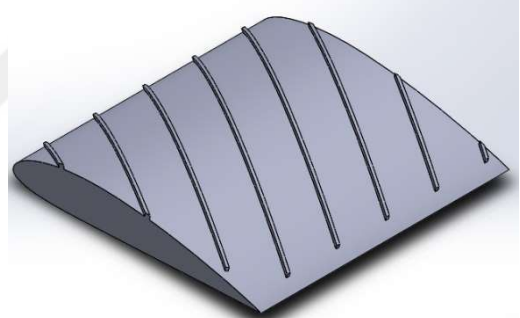
Rüzgar türbini kanadı kanat kesit geometrisine göre kanat kökü ile ucu arası 1 metre uzunluğunda oluşturulmuştur. Kanat üzerine 30 derecelik, 45 derecelik, 60 derecelik ve 90 derecelik olacak şekilde türbülötörler (rip) konumlandırılmıştır. (Şekil 5.2.) Türbülötörlerin yükseklikleri 15 cm ve 25 cm olacak şekilde tasarım yapılmıştır.



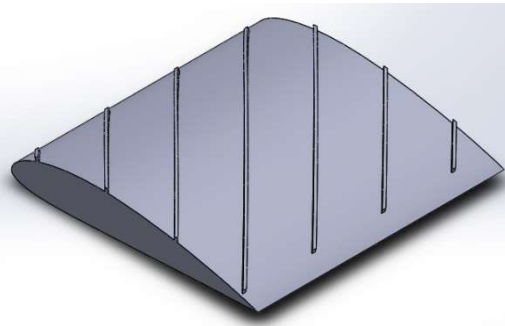
a- Kanat modeli (T0)



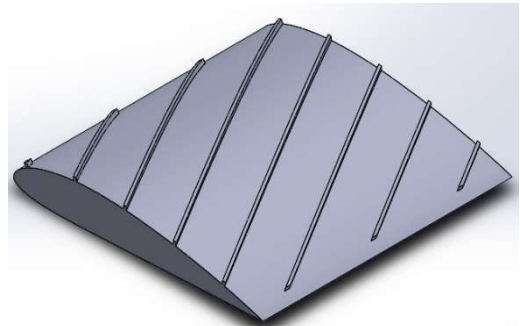
b- 90 Derece kanat modeli (T1)



c- 30 Derece kanat modeli (T2)



d- 45 Derece kanat modeli (T3)



e- 60 Derece kanat modeli (T4)

Şekil 5.2. Kanat modelleri

BÖLÜM 6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Bu bölümde, hava aracı elevatör ve rudderlarında yaygın olarak kullanılan NACA 4415 kanat profilinin; sonlu hacimler yöntemini kullanan bir HAD programı olan ANSYS FLUENT ile modellemesi yapılmış ve profilin karakteristik özelliklerinin program yardımıyla tespitine çalışılmıştır.

6.1. Temel Denklemler

Sayısal akışkanlar dinamiği, bir formdan diğer bir forma geçiş esnasında akış dinamiğinin korunum denklemlerini kullanır. Simülasyonda kullanılan matematiksel model; süreklilik, momentum, enerji ve skaler değişkenler için tasınım denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır [36].

6.1.1. Kütlenin Korunumu Denklemi

Kütlenin korunumu denklemi şu şekildedir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (6.1)$$

Bu denklem kütle korunumu denkleminin esas formu olup sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar için de geçerlidir.

6.1.2. Momentum Denklemleri

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + F \quad (6.2)$$

Gerilme tensörü şu şekilde tanımlanabilir;

$$(\bar{\tau}) = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \cdot I] \quad (6.3)$$

6.2. Türbülans Modeli

Problemlerin yapısının çok değişiklik göstermesi nedeniyle her problem için uygun tek bir türbülans modeli bulunmamaktadır. Türbülans modeli seçiminde, akışın fiziksel durumu, istenilen doğruluk seviyesi, model için gerekli olan değerlerin hesaplanabilirliği ve simülasyon için gereken zaman dikkate alınmaktadır. En uygun model tercihi yapmak için yukarıda belirtilen özelliklerin ve kullanılacak modelin sınırlamalarının göz önüne alınması gerekmektedir.

6.2.1. Standard k-ε türbülans modeli

Türbülans modelin basit biçimi olan bu modelde iki farklı transport denklemi vardır. Standart k-ε model, türbülans kinetik enerjisi ve dağılımı nedeniyle transport denklemlerine dayanan yarı-deneyssel bir modeldir. Standart k-ε modelinin performansını arttırmak için yeni modeller geliştirilmiştir. Fluent programı bu modellerde RNG k- ε model ve realizable k- ε modellerini kullanmaktadır. K-ε modelinin türetilmesinde, akış tamamen türbülanslı kabul edilir ve moleküler viskozitenin etkileri önemsizdir. Bu nedenle standart k-ε modeli sadece tamamen türbülanslı akışlar için geçerlidir.

6.2.2. Standard k-ε modeli için taşıma denklemleri

Türbülans kinetik enerji ve onun dağılım oranı (k-ε), aşağıdaki transport denklemiyle hesaplanmıştır [36]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{1\varepsilon G_b}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Bu denklemlerde, G_k ortalama hesaplanmış olan hız granyentlerinden dolayı türbülans kinetik enerjinin üretimini gösterir, G_b kaldırma kuvvetinden dolayı türbülans kinetik enerji üretimidir. Y_M tüm dağılım oranına sıkıştırılabilir türbülanslı akışta azalıp artma

etkisini gösterir. Sabit değerler $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 'dır. K ve ε için türbülans Prandtl sayısı sırasıyla σ_k ve σ_ε 'dır. Türbülans viskozitesi μ_t , denklem (6.5)' ten hesaplanır [36].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.5)$$

Burada C_μ bir sabiti göstermektedir. Model sabitleri $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_k ve σ_ε tipik değerleri aşağıda verilmiştir:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad C_{3\varepsilon} = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Bulunan değerler türbülanslı akışta hava ve su ile yapılan deneylerden elde edilmiştir. Model sabitlerin bu değerleri standart olmasına rağmen her biri geniş çapta kabul edilebilir, onlar gerekirse sayısal akışkan dinamiği programında değiştirilebilir. G_k terimi türbülans kinetik enerji üretimini gösterir. Bu terim standart, RNG ve realizable k- ε modelleri için hemen hemen aynı olarak modellenmiştir. K için bu terim şöyle tanımlanır:

$$G_k = -\rho \overline{u_1 u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6.6)$$

G_k değeri Boussines hipotezi ile aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (6.7)$$

Burada S ortalama gerilme oranıdır:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (6.8)$$

Yüksek Reynolds sayısı kullanıldığı zaman denklem' (3.10) da μ_t 'nin yerine μ_{eff} kullanılır. Kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans üretimi G_b aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (6.9)$$

Burada Pr_t enerji için türbülans Prandtl sayısıdır ve g_i i yönündeki yerçekimi ivmesidir. Standart k- ε modeli için Pr_t değeri 0,85'dir. Termal yayılma katsayısı, β , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (6.10)$$

Denklem (6.10) ideal gazlar için denk. (6.11)' e indirgenir. [37]

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (6.11)$$

Türbülanslı akışlar laminar akışlara oranla oldukça zor incelenmektedir. Türbülansın etkisini görmek adına bu tarz problemler için farklı modeller türetilmiştir. Bu modeller, FLUENTTM HAD programında bulunan;

- RNG (Renormalization Group) k-epsilon,
- Spalart-Allmaras, k- ϵ ,
- SST (Shear-Stress Transport) k-epsilon,'dır [38].

En çok kullanılan model “standart k-epsilon modeli” olup “k” türbülansın kinetik enerjisini, “epsilon” ise türbülansın yayılımını tanımlar. *Realizable k- ϵ türbülans* modeli düşük Re sayılarında kullanılmak üzere geliştirilmiş olduğundan çalışmamızda bu modeli tercih ettik [39].

6.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanım Alanları

Akışkanlar dinamiği bilimi, sıvılar için hidrodinamik, gazlar için aerodinamik olarak adlandırılır. Teorik, deneysel ve sayısal çalışmalar halinde bulunan akışkanın çevresi ile olan etkileşimini inceler. Teorik çalışmalar çok kısıtlı durumlar için yapılabildiğinden günümüzde büyük ölçüde terkedilmiş ve yerini sayısal çalışmalara bırakmıştır. Deneysel çalışmalar ise hesaplanan sonuçların test edilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. 1950’li yıllardan beri büyük bir hızla gelişen bilgisayar teknolojisi ve bellek kapasitelerindeki artış, akışkanlar dinamiği problemlerinin sayısal olarak çözümlenmesini daha kolay hale getirmiştir. Sayısal yöntemlerin kullanılması ile analitik olarak çözülemeyen akışkanlar dinamiği denklemleri, sayısal çözüm teknikleri kullanılarak çözülmekte ve çeşitli durumlar için detaylı incelemeler yapılmasına imkân sağlamaktadır. Akışkanlar dinamiği problemlerinin bilgisayar yardımıyla sayısal yöntemlerle çözülmesi konusu “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

(HAD)” şeklinde adlandırılan yeni bir alanın ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Literatürde İngilizce CFD (Computational Fluid Dynamics) şeklinde adlandırılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği akışkan bir nesnenin dinamiği üzerine çalışmamıza imkân sağlayan hesaplama teknolojisidir.

Tasarım ve geliştirme zamanının kısalması, deneysel model testlerinde oluşturulamayan akış koşullarının benzeşiminin kolayca yapılabilmesi, daha detaylı anlaşılır bilgi vermesi, daha az enerji tüketiminin ortaya çıkması günümüzde akışkanlar dinamiği çalışmalarında HAD kullanımının oldukça yaygın hale gelmesini ve deneysel ve teorik çalışmaların önüne geçmesini sağlamıştır. Akışkan ile etkileşim halinde olan her mühendislik problemi büyük ölçüde HAD kapsamına girmektedir. HAD kullanılarak sadece akışkanın davranışına öngörülenin yanında ısı transferi, kütle transferi, faz değişimi (donma, buharlaşma), kimyasal reaksiyonlar (yanma), mekanik hareketler (zorlanmış dönmeler), katı yapılarıyla ilgili deformasyon incelenebilir.

Herhangi bir HAD analizi genel olarak sırasıyla aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

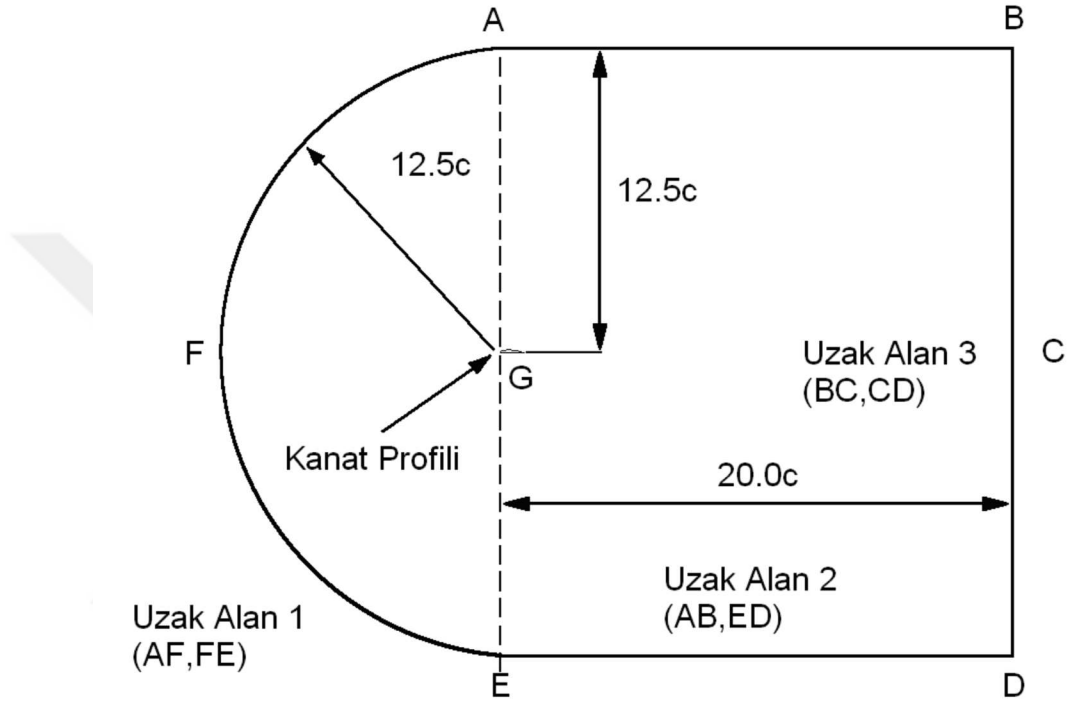
- Katı model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması
- Sınır şartlarının ve çözüm ayarlarının tanımlanması
- Elde edilen sonuçların yorumlanması

Sisteme dışarıdan dahil edilen bir geometri veya sistem içerisinde tasarlanan bir geometri HAD prosesinin başlangıcıdır. Bir HAD analizinin yapılabilmesi için akış hacminin sonlu sayıda ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. İki boyutlu sayısal çözüm alanında bu hücreler, alan; üç boyutlu çözüm alanında ise hacim olmaktadır. İki veya üç boyutlu çerçeve içerisine bir ağ tasarlanır. Sayısal ağ oluşturma işlemi, sonucunda oluşan modele de çözüm ağı veya sayısal model adı verilir.

Sayısal ağ tabakası ortaya çıktıktan sonra sınır şartlarının tanımlanmasına ve çözüm ayarları yapılır ve çözüm işlemine başlanır. Hesaplama sonuçlandığında, HAD çözümü incelenen alanda oluşan tüm basınçları ve hızları içerir.

6.4. Akışın Modellenmesi ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

HAD ile analize başlamadan önce türbin kanadının konumlandırılacağı hava hacmi tasarlanır. Bu tasarım Şekil 6.1.'deki gibi yapılabilir. G noktasına kanat kesit modeli konumlandırılır.



Şekil 6.1. Kanat profillerinin farklı hücum açılarındaki basınç ve hız dağılımlarının incelendiği sınır koşulları ve kanat profillerine uygulanan çözüm alanı

Çözüm ağının oluşturulması esnasında profillerin verter uzunluğu 1 birim (c) olarak seçilmiş 3 farklı uzak alan belirlenerek profilin iz bölgesinde 20c, hücum kenarı uzak alanı 12,5c, alt ve üst yüzey taraflarında tanımlanan uzak alanlar da yine 12,5c uzaklık alınarak seçilmiştir. Literatürde birçok çalışmada uzak alan uzaklıkları bu şekilde seçilmiş olup daha kısa uzaklıkların seçilmesinin özellikle iz bölgesinin net bir biçimde hesaplanmasında sorunlar yaratabildiği için bunlardan daha kısa uzaklıklar nadir olarak seçilmektedir.

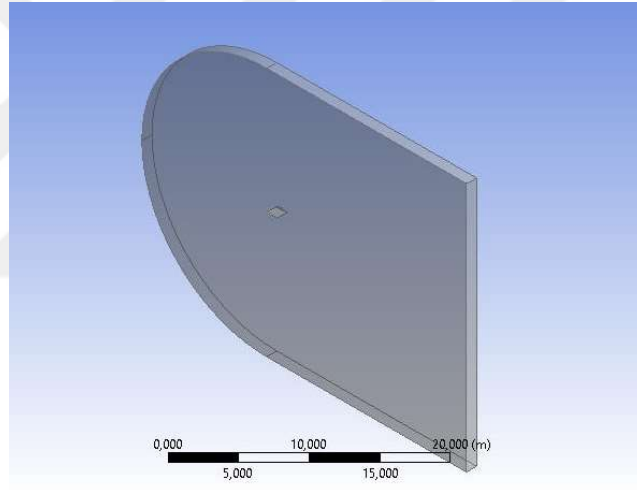
Hız girişi ve basınç çıkısı şeklinde tanımlanan uzak alanların oluşturulmasından sonra sıra çözüm ağıının oluşturulmasına gelir. Çözüm ağı oluşturulurken dikkat edilecek husus özellikle profilin alt ve üst yüzeyleri ile artçıl iz bölgesinin çözüm ağını oluştururken hücresel hassasiyetin daha fazla olması için bu alanlarda daha sık bir çözüm ağı uygulaması yapılır [40].

Kanat profiline ait sınır şartları olarak; alt ve üst yüzeylerin duvar olarak, girişin; hız girişi ve çıkış, basınç değeri alınmıştır. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hesaplarının yapılabilmesi adına, serbest ortamda ikinci-mertebe geriye-farklar (second order upwind) ayırıklaştırması seçilmiş olup Coupled çözüm algoritması ile analiz işlemi yapılmıştır. Coupled basınca dayalı çözüm yapmakta olup daha hızlı yakınsama ile çözüme gider [39].

BÖLÜM 7. AKIŞ ANALİZİ MODELLEMESİ

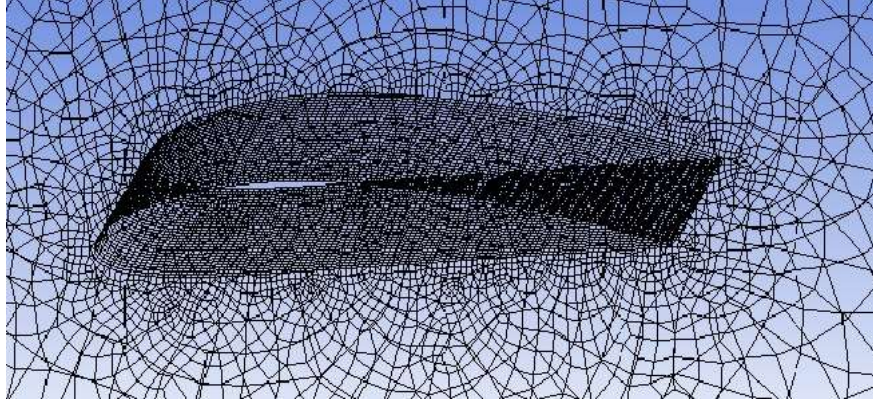
7.1. ANSYS Fluent İle Modelleme

ANSYS Fluent programında öncelikle akış alanı ve kanat modellerine ait 3 boyutlu çizimleri programın geometri kısmına eklenmiştir. Geometri alanında kanat modeli akış alanı içerisinde boşaltma işlemi “boolean” komutu ile yapılmıştır. (Şekil 7.1.)

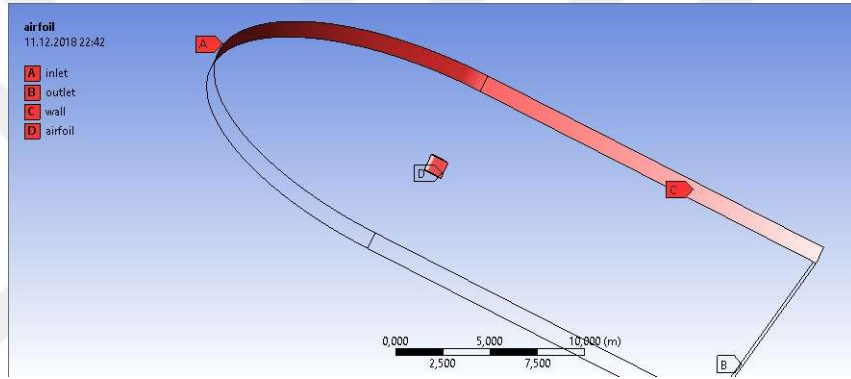


Şekil 7.1. Geometri kısmında modelleme

Geometri kısmında akış yüzeyi belirlenen kısım çözümleme öncesinde hesaplama ağlarının oluşturulması ve alan tanımlamalarının yapılması amacıyla mesh kısmında düzenlemeler yapılır. (Şekil 7.2. ve Şekil 7.3.)



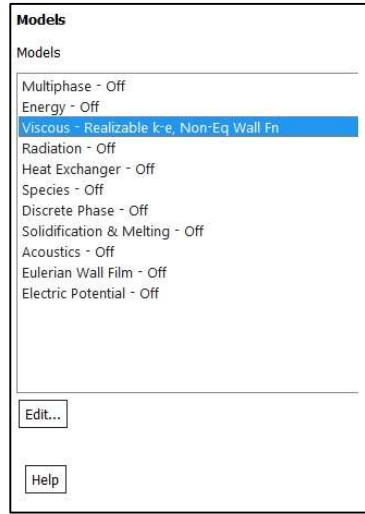
Şekil 7.2. Mesh ağı görüntüsü



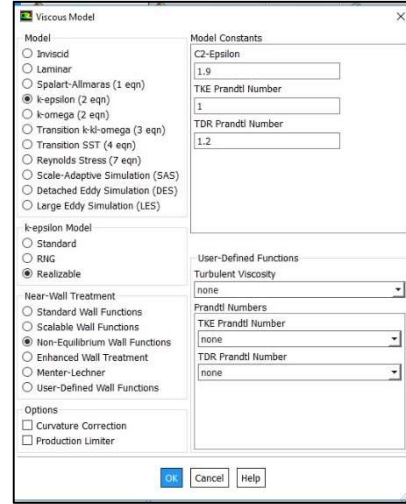
Şekil 7.3. Akış alanı yüzey isimleri

Yüzey ağı ve alan isimlerinin belirlenmesinden sonra hesaplama işlemi öncesinde çözüm yöntemi ve sabit değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Model olarak viskoz, k-epsilon model seçilmiştir. (Şekil 7.4.'a, b),

Yapılan çalışmada mesh eleman sayısı yaklaşık 270.000 – 280.000 ve 55.000 – 60.000 düğüm aralığında mesh ağı oluşmuştur.



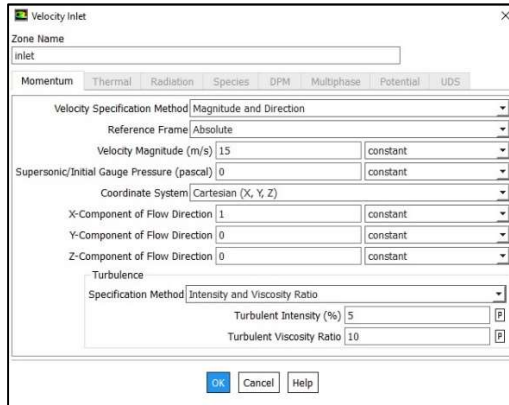
a- Akış modeli seçimi



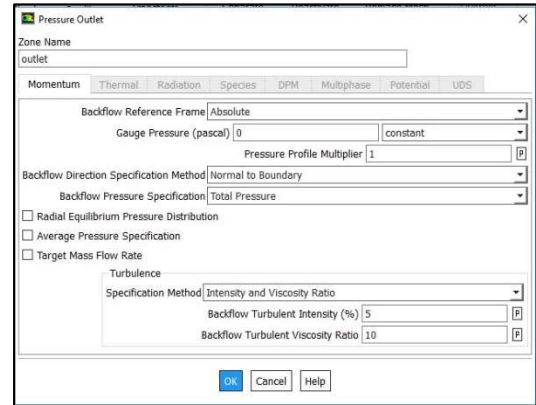
b- Akış modeli seçim alanı

Şekil 7.4. Akış modeli alanı tanımlamaları

Akış modeli belirlendikten sonra akış ile ilgili akış giriş hızı (V : 5 m/s – V :10 m/s – V : 15m/s) ve çıkış basıncı (P : 0 Pa) belirlenmiştir. (Şekil 7.5.)



a- Giriş hızı bilgileri



b- Çıkış basıncı bilgileri

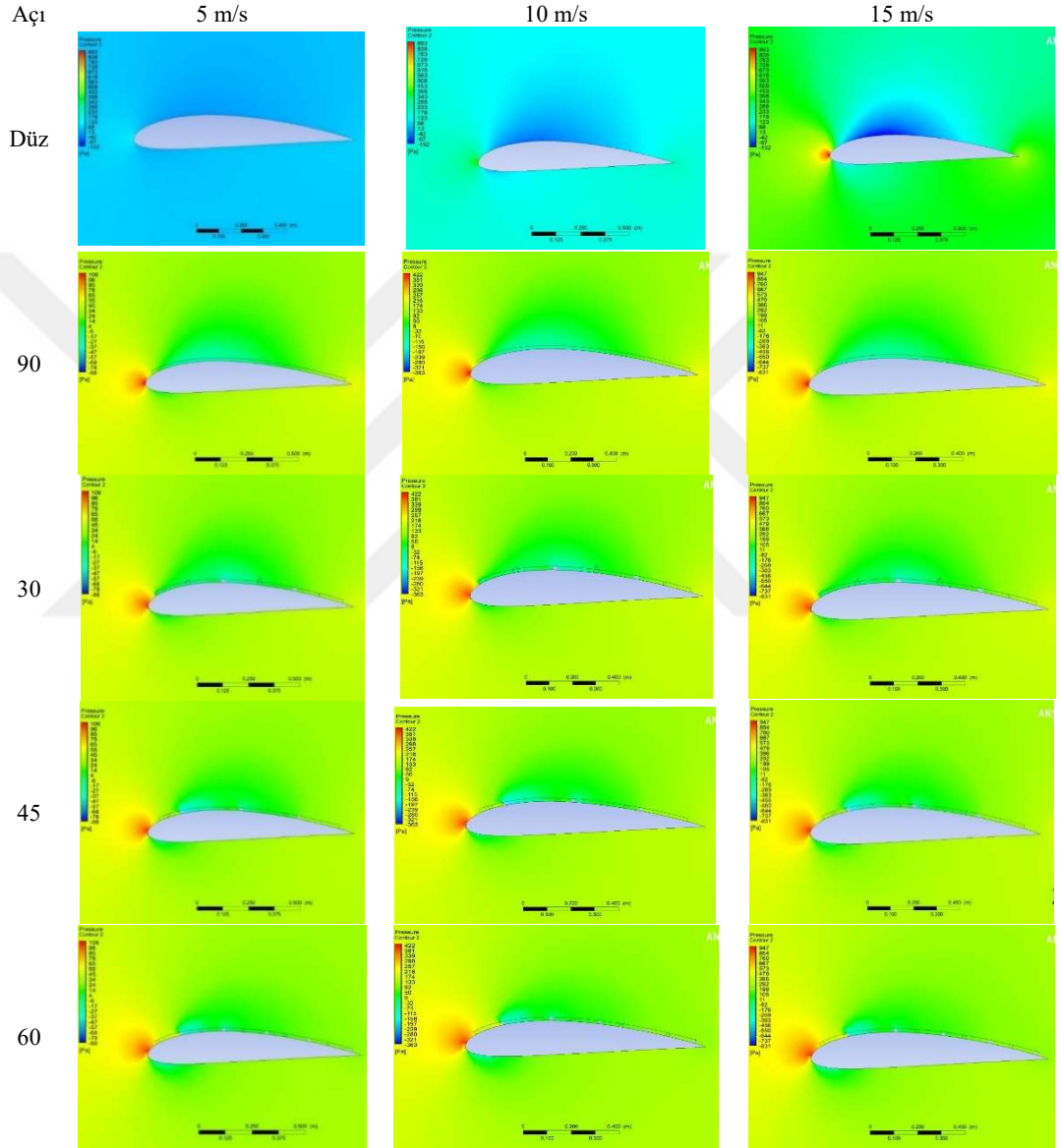
Şekil 7.5. Akış değerleri

Başlangıç değerlerinin girilmesi sonrasında çözümlemenin başlaması için referans değerlemesi yapılarak çözümleme işlemi başlatılır.

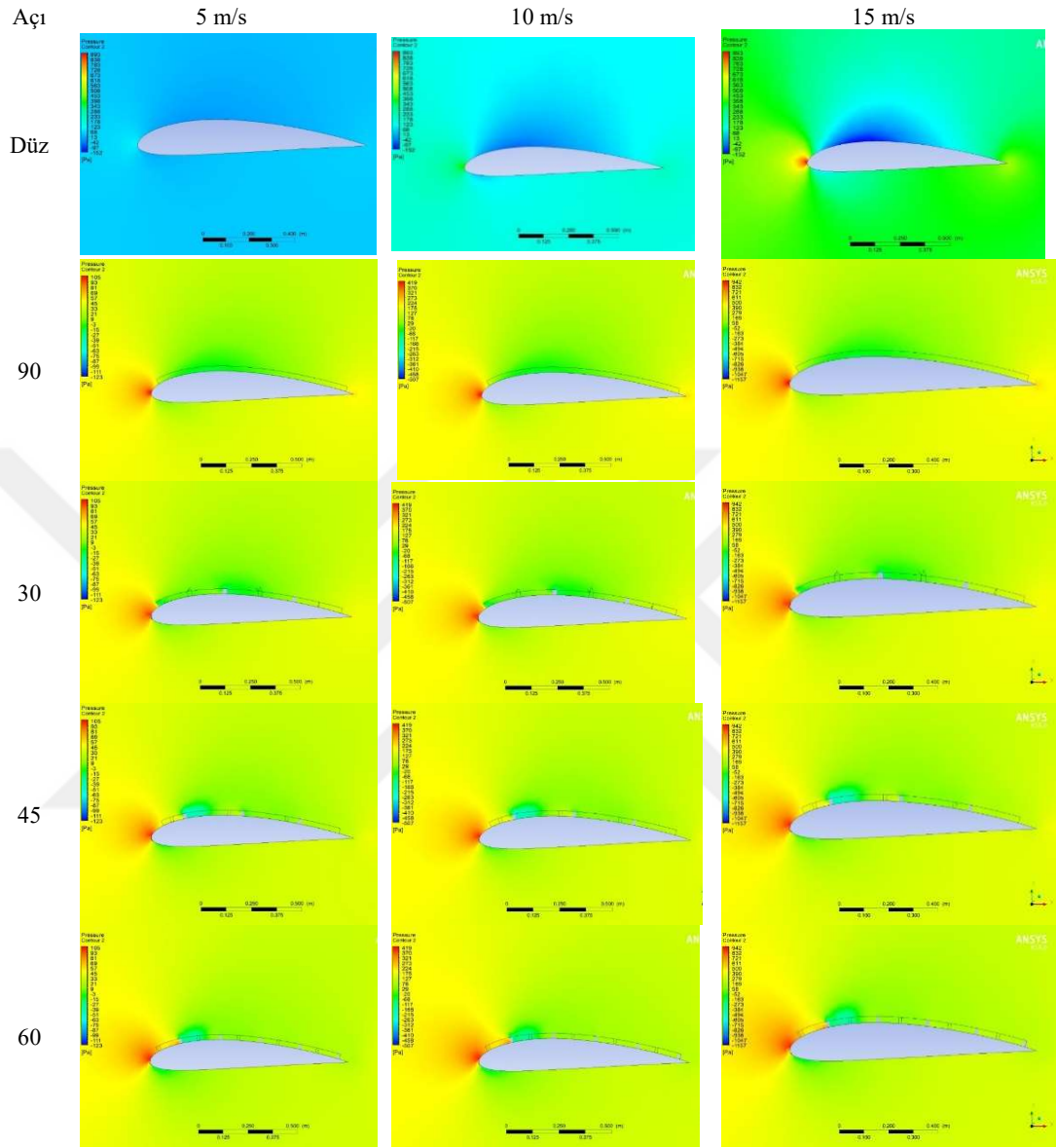
Akışkan olarak $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğunda, viskozitesi $\mu = 1.7894\text{E-}05 \text{ kg/ms}$ değerlerine sahip ideal hava kullanılmıştır.

7.2. HAD Çözümü İle Elde Edilen Analiz Sonuçları

Yapılan çözümleme sonucunda kanat üzerinde oluşan hız dağılımları ve basınç dağılımları Şekil 7.6. ve Şekil 7.7. 'de görülmektedir.



Şekil 7.6. Basınç dağılımları (5 m/s , 10 m/s ve 15 m/s hız ve 15 cm türbülör (rip) yüksekliği)

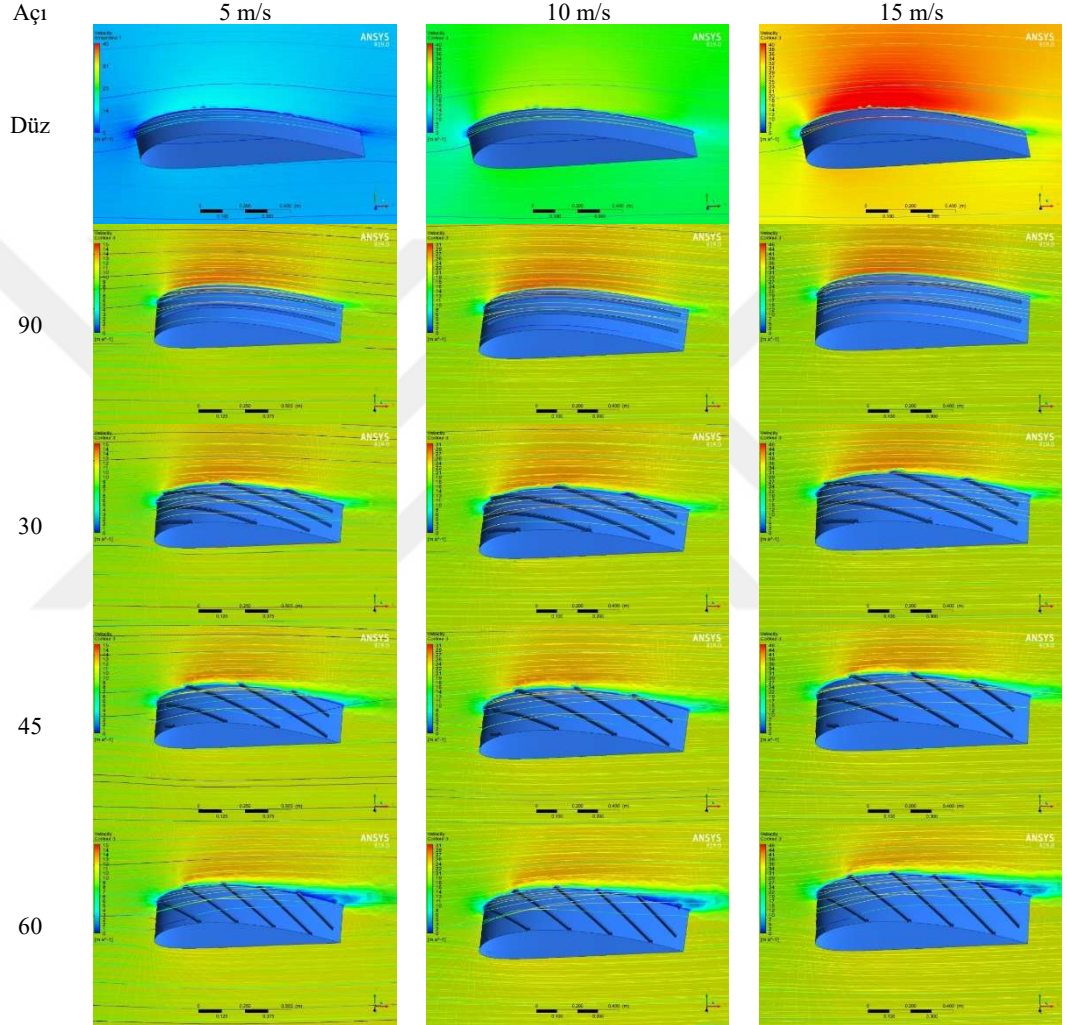


Şekil 7.7. Basınç dağılımları (5 m/s , 10 m/s ve 15 m/s hız ve 25 cm türbülötör (rip) yüksekliği)

Tablo 7.1. Türbin kanatları üzerindeki basınçların yüzdesel değişimi

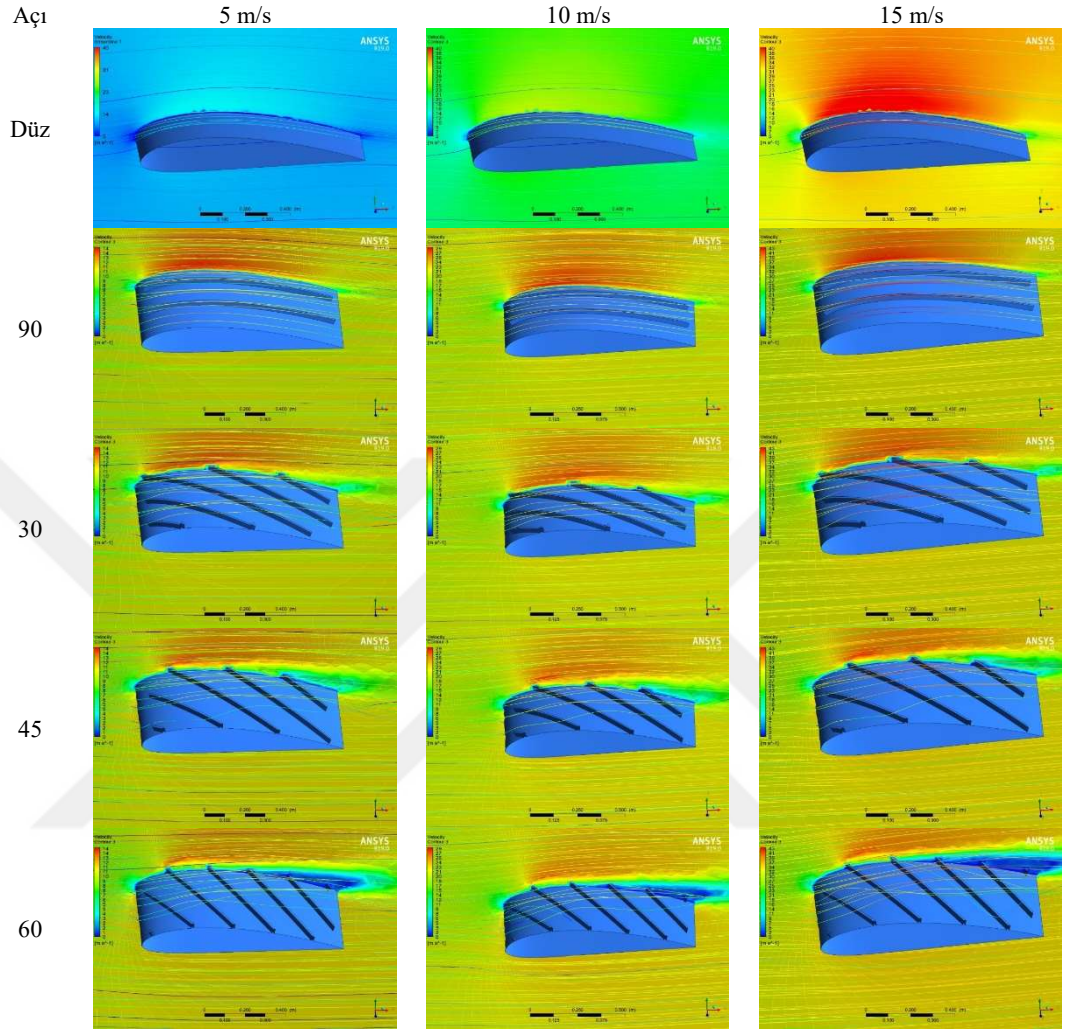
Türbülötör Açısı	Türbülötör Yüksekliği (15 cm)			Türbülötör Yüksekliği (25 cm)		
	5 m/s	10 m/s	15 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s
90	%15	%14	%13	%17	%14	%13
30	%96	%93	%92	%117	%113	%110
45	%145	%141	%138	%187	%183	%181
60	%164	%165	%161	%242	%228	%239

Kanat üst yüzeyinde alınan bir noktaya göre 5 m/s, 10 m/s ve 15 m/s hızlarda 15 cm ve 25 cm yükseklikte farklı açılarda yerleştirilen Türbülatorlerin düz kanat profiline göre üst yüzeyde oluşan basınç artışları Şekil 7.6 ve Şekil 7.7 'de görülmektedir.



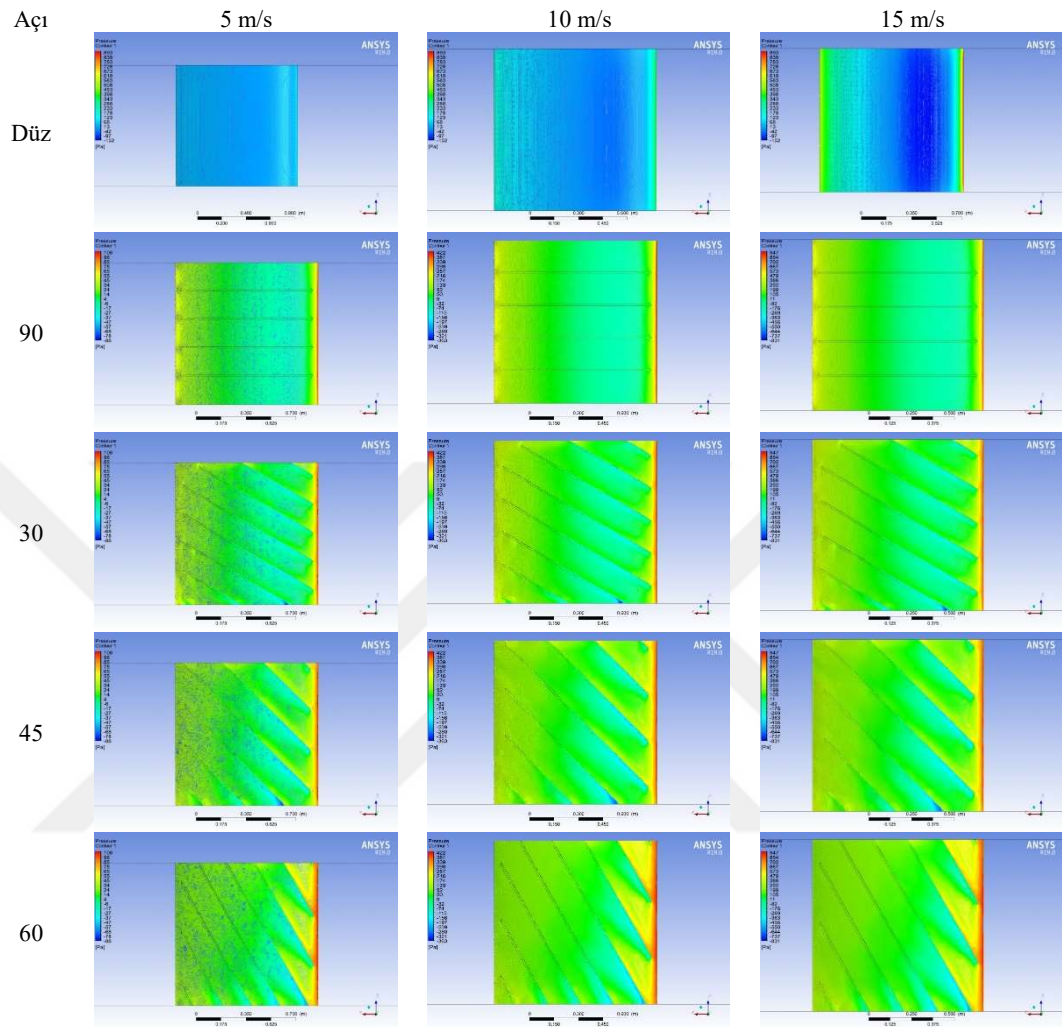
Şekil 7.8. Hız akım çizgileri ve hız dağılımı (15cm türbülator yüksekliği)

Kanatlar üzerinde oluşan basınç dağılımları incelendiğinde alt yüzey ile üst yüzey arasındaki basınç farkının oluşması kanatlar üzerindeki kaldırma kuvvetinin ve sürüklenme kuvvetinin oluşmasını sağlamaktadır.

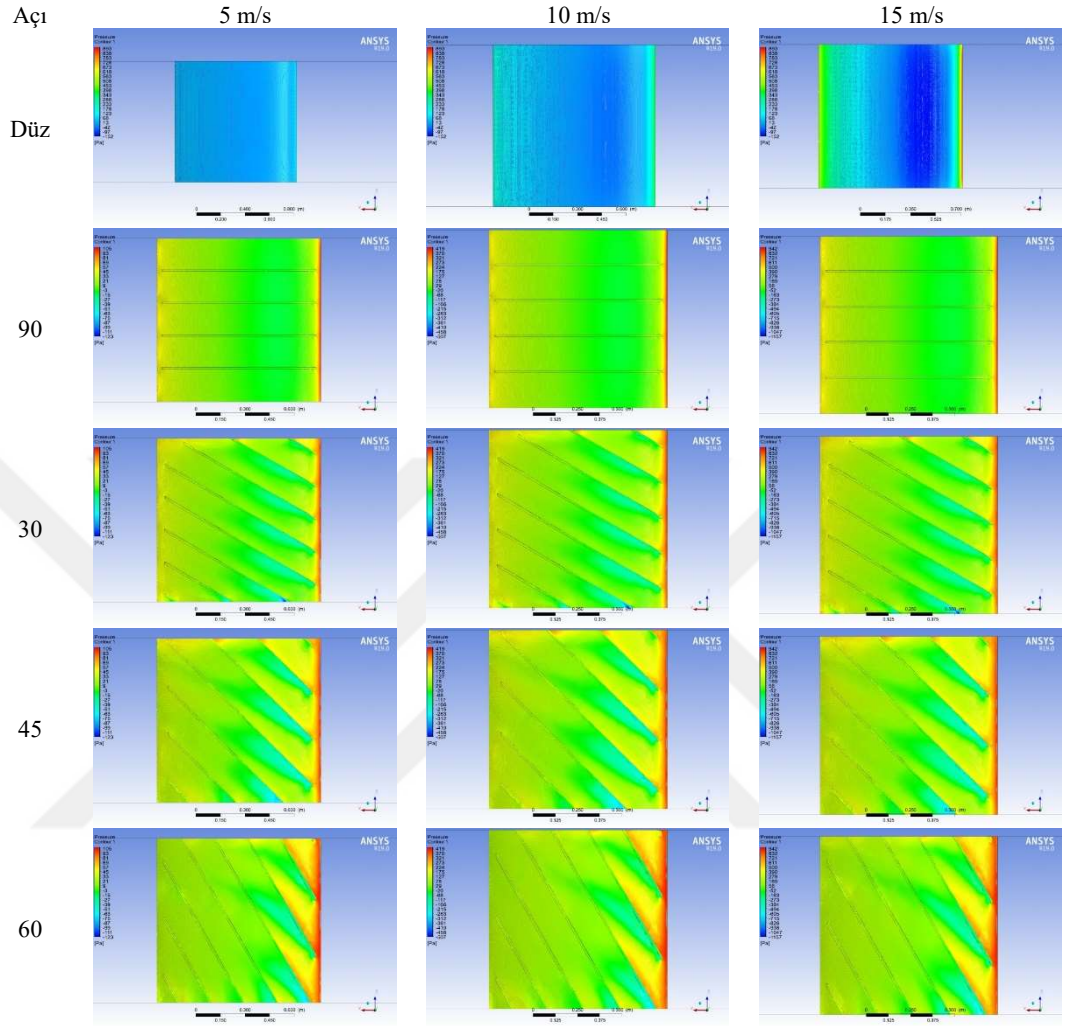


Şekil 7.9. Hız akım çizgileri ve hız dağılımı (25cm türbülör yüksekliği)

Aerodinamik açıdan optimum tasarımlar için alt yüzey ile üst yüzeyde oluşan basınç oranın maksimum değerlerde seçilmesi fayda sağlayacaktır. Şekil 7.6. Basınç sonuçları incelendiğinde P_{maks} / P_{min} oranlarının Düz<90<30<45<60 derece şeklinde olup ortaya çıkan basınç farkının türbülörlerin konumlandırılmalarına göre değişiklik gösterdiği görülmektedir.

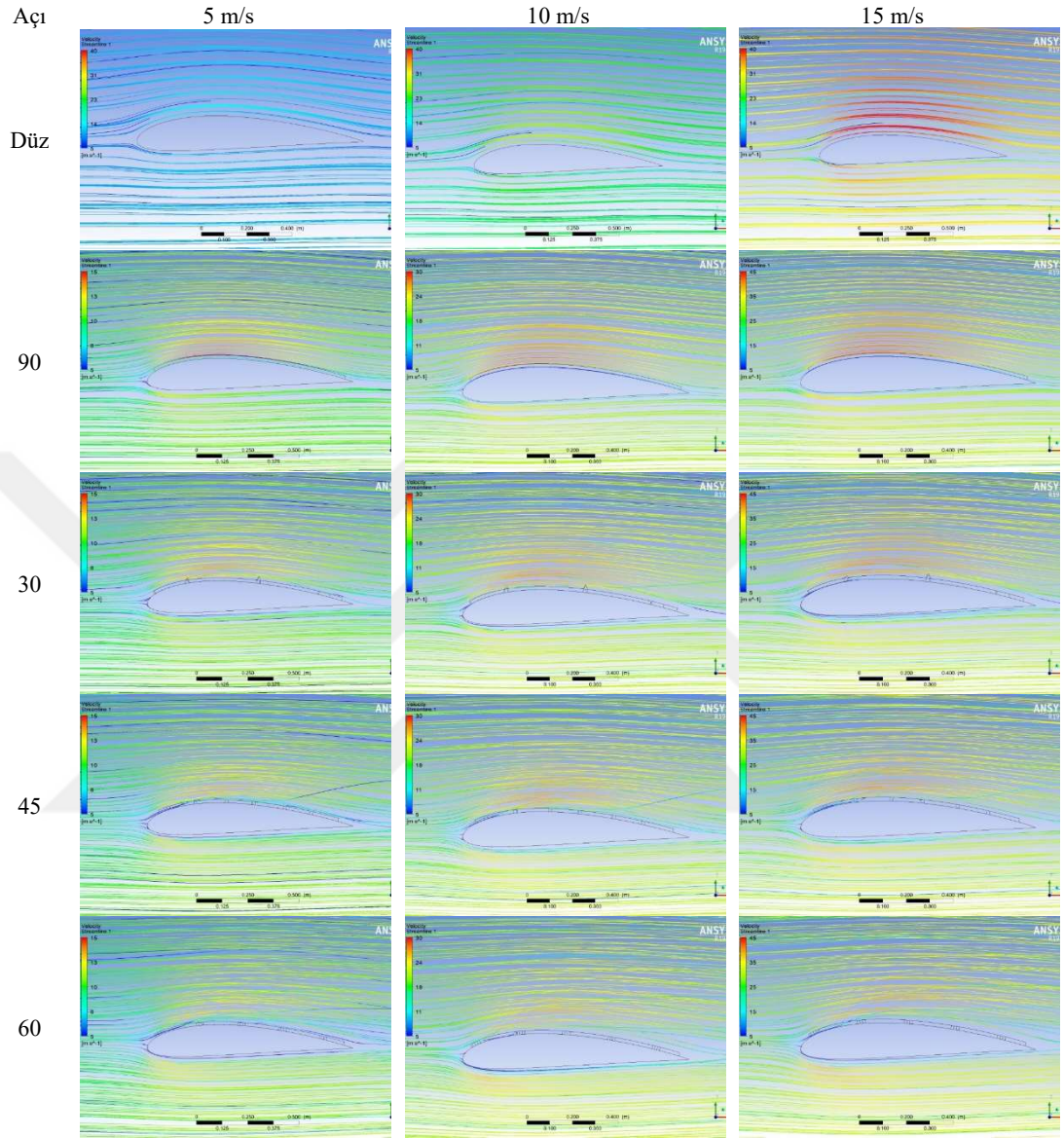


Şekil 7.10. Kanat üstü basınç dağılımları (15cm türbülator yükseklik)

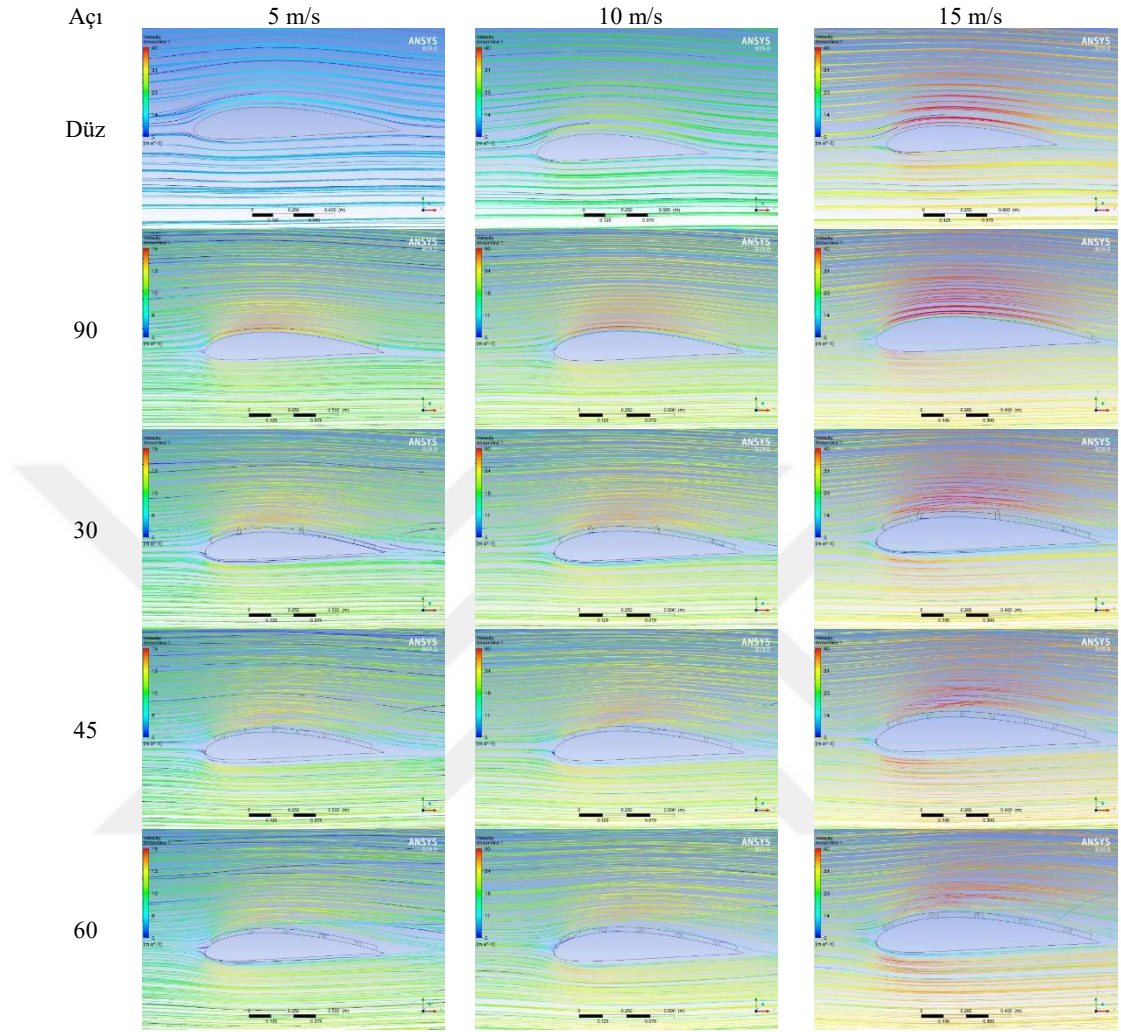


Şekil 7.11. Kanat üstü basınç dağılımları (25cm türbülator yükseklik)

Kanat üzerinde oluşan basınç değişimleri göz önüne alındığında türbülatorlerin kaldırma kuvvetine etkisi artı yönde olduğu görülmekte olup kanat performansını olumlu yönde arttırmaktadır.

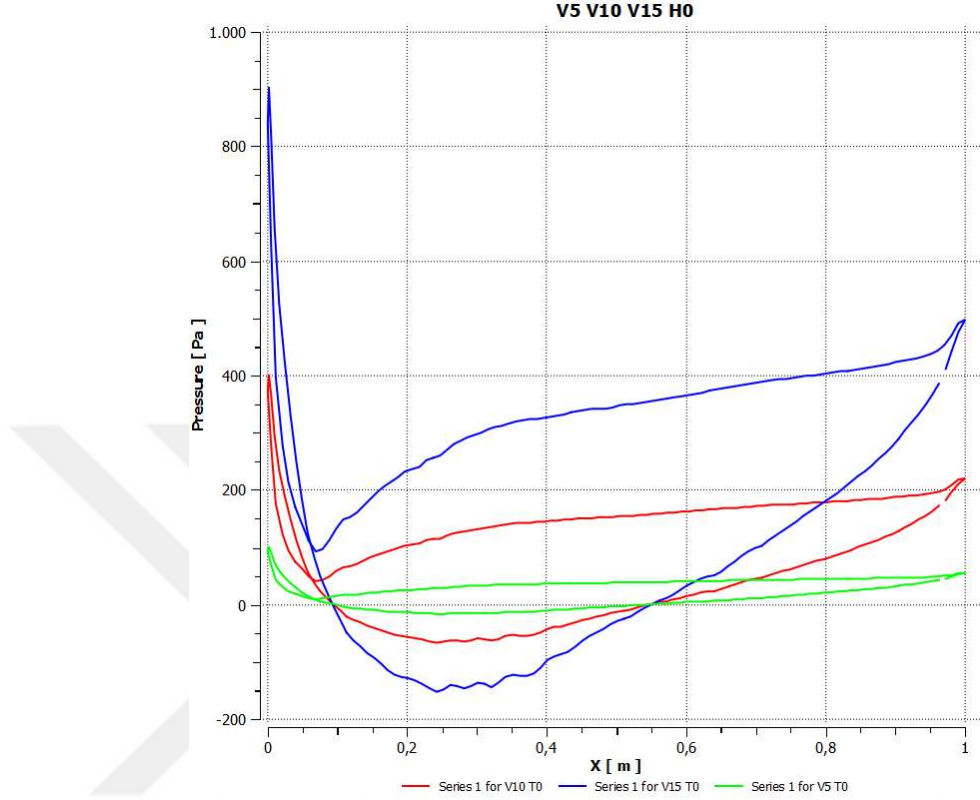


Şekil 7.72. Kanat üstü hız çizgileri (15cm türbülator yükseklik)

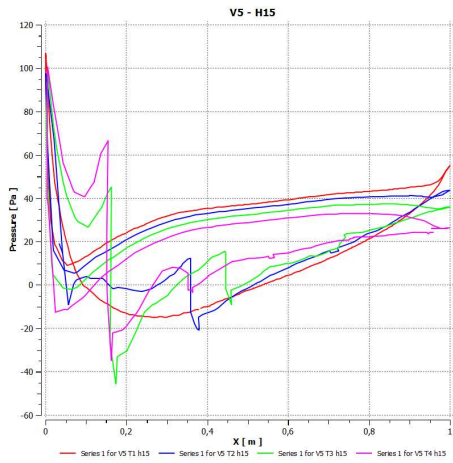


Şekil 7.13. Kanat üstü hız çizgileri (25cm türbülator yükseklik)

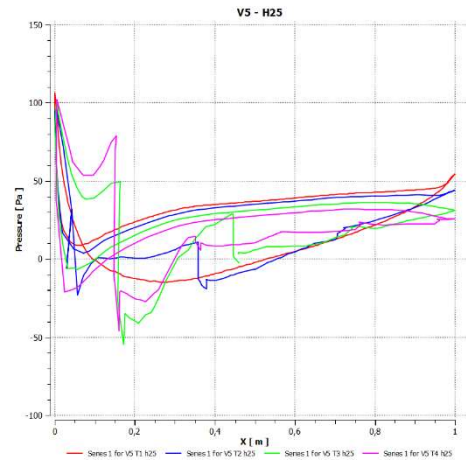
Kanatların tasarımlarına bağlı olarak havanın kat etmesi gereken yol üst kısımda daha çok olduğu için oradaki hava hızı daha yüksektir (Şekil 7.12.-7.13.). Bernoulli prensibinden hareketle üst kısımdaki hava hızı arttıkça basıncı azalmıştır ve kanat üzerine kaldırma kuvveti etlemiştir. Artan kaldırma kuvveti enerji üretimini arttırmaya yardımcı olur.



a- Türbülatorsüz kanat üzerinde basınç dağılım grafiği

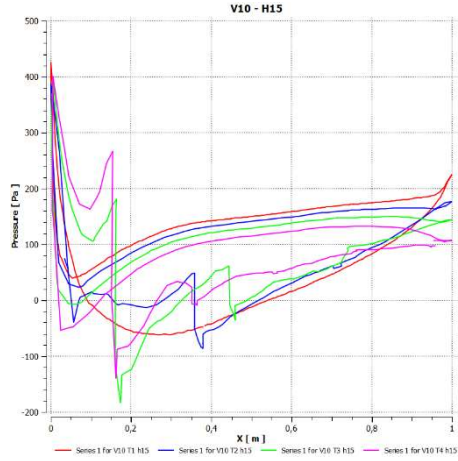


b- 5 m/s hız 15 mm yükseklikte türbülantörlü kanat üzerindeki basınç grafiği

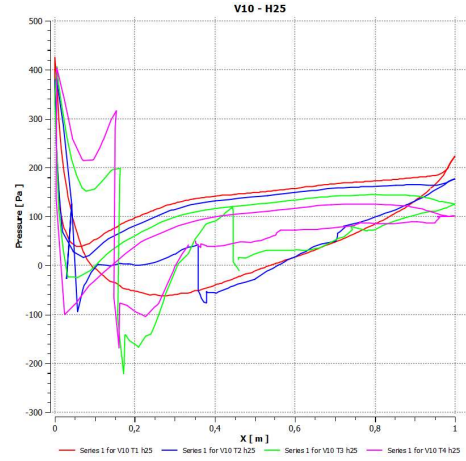


c- 5 m/s hız 25 mm yükseklikte türbülantörlü kanat üzerindeki basınç grafiği

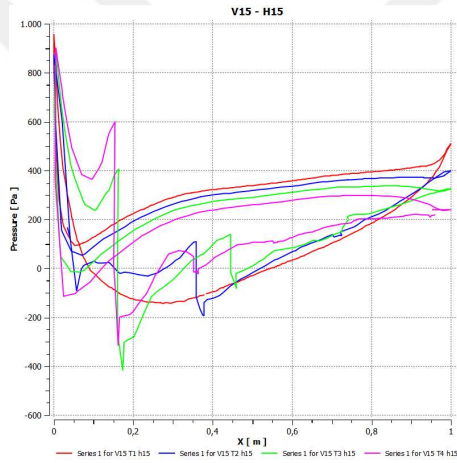
Şekil 7.84. Kanat üzerindeki basınç dağılım grafikleri



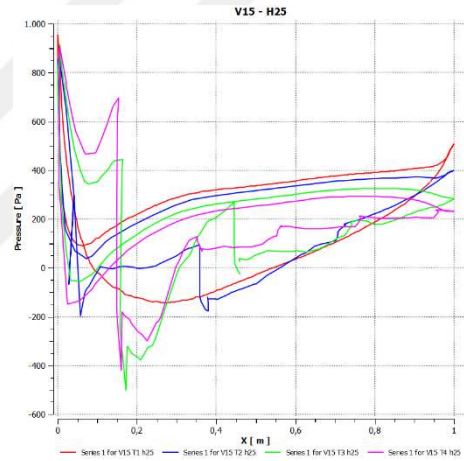
d- 10 m/s hız 15 mm yükseklikte türbülantörlü kanat üzerindeki basınç grafiğı



e- 10 m/s hız 25 mm yükseklikte türbülantörlü kanat üzerindeki basınç grafiğı



f- 15 m/s hız 15 mm yükseklikte türbülantörlü kanat üzerindeki basınç grafiğı



g- 15 m/s hız 25 mm yükseklikte türbülantörlü kanat üzerindeki basınç grafiğı

Şekil 7.94. (Devamı)

Basınç grafikleri incelendiğinde 60 derece Türbülantörlü (T4) kanatların alt yüzeyinde basınçların diğerkanat yerleşimlerine göre daha yüksek olduğı görölmektedir. 15 mm yüksekliğindeki türbülantöre göre 25 mm türbülantör yüksekliğinde daha fazla kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Kanat üzerinde yer alan türbülantörlere göre basınç dağılımları $T4 > T3 > T2 > T1 > T0$ (60 > 45 > 30 > 90 > 0 (düz) derece) şeklinde olup Türbülantör yüksekliğinin artmasının kaldırma kuvvetini arttırdığı görölmüşür.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada rüzgar türbin kanatlarının üst yüzeylerine 30, 60, 45 ve 90 derece açılar ile yerleştirilen türbülatorlerin (rip) kanat üzerinde oluşturduğu basınç, hız, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine etkisi sayısal olarak araştırılmıştır.

5 m/s, 10 m/s ve 15 m/s hızlarda iki farklı türbülator yüksekliğinde (15 cm ve 25 cm) türbülator kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonrasında kanat üzerinde meydana gelen basınç farklarının en yüksek değeri 60 derece türbülatorlü (ripli) kanatta meydana geldiği tespit edilmiştir. En düşük basınç farkı ise 90 derece olan türbülatorlü kanatta meydana gelmiştir.

Aynı yüksekliğe sahip türbülatorlü kanatların farklı hızlarda yapılan sayısal çalışmalarında hız arttıkça basınç farkının azaldığı tespit edilmiştir. Türbülator yüksekliğinin artmasıyla birlikte basınç farklarının arttığı, en yüksek farkın 60 derece açı ile yerleştirilen 25 cm yükseklikteki türbülatorlü kanatta olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Karadağ, H.İ., “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgâr Enerjisinin Önemini ve Rüzgâr Türbini Tasarımı”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2009).
- [2] Güneş, İ.İ., “Bir Rüzgâr Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü”, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2006).
- [3] Üzümlü, K., “Yeni Nesil Teknoloji Kullanarak Küçük Güçlü Rüzgâr Türbini Tasarımı Ve Bilgisayar Destekli Analizi”, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2015).
- [4] Avcı, B., Yılmaz, T.B., “Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı Ve Analizi”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (2012).
- [5] http://www.ktemo.org/uploads/documents/22-04_ruzgar_enerjisine_genel_bir_bakis.pdf, Erişim Tarihi:11.05.2017.
- [6] Hemami, A., Courtesy of Vestas Wind Systems A/S, Wind Turbine Technology, ISBN-13: 978-1-4354-8646-1.
- [7] Ergür, Ö., “Rüzgâr Türbinleri İle Enerji Üretimi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2006).
- [8] Uysal, A., “Rüzgâr Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Olarak İncelenmesi”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2003).
- [9] Önder M., “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2006).
- [10] Duran, S., “Computer-Aided Design of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2005).

- [11] Yücel, B., “Performance Prediction of Horizontal Axis Wind Turbines Using Vortex Teory”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (2004).
- [12] Onat, C., “Rüzgâr Türbini Pervanesi Dizaynı”, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2001).
- [13] Walker, J., F., Jenkins, N., “Wind Energy Technology”, John Wiley & Sons, New York, 17-74, 1997.
- [14] Çiçek, A., “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Dizayn ve İmalatı”, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2002).
- [15] Wilson, R., E., “Aerodynamic Behavior of Wind Turbines”, Wind türbine technology fundamental concepts of wind turbine engineering, Spera, D., A., Asme Pres, New York, 215-282, (1998).
- [16] Manwell, J.F., Mcgowan, J.G., Rogers, A.L., Wind Energy Explained: Theory, design and application, Second Edition, Massachusetts University, USA.
- [17] Derya, H., “İkili Kanat Profili Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava Ve Su Akışlarının İncelenmesi Ve Aerodinamik Performans Analizleri”, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2010).
- [18] Durak M., Özer S., “Rüzgâr Enerjisi: Teori ve Uygulama 1.Baskı”, İmpress Baskı, Ankara, (2008).
- [19] Keleş, D., “Bir Rüzgâr Türbini Tasarımı Ve Geliştirilmesi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2012).
- [20] Kristian S. D., Peter F., “Design of the Wind Turbine Airfoil Family RISØ-AXX”, RisØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, (1998).
- [21] Hiroharu Suzuki, Kenichi Rinoie, Asei Tezuka, “Laminar Airfoil Modification Attaining Optimum Drag Reduction by Use of Airfoil” Morphing University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan.
- [22] David Hartwanger et.al “3D modeling of a Wind Turbine using CFD” NAFEMS Conference, United Kingdom, 2008.
- [23] Xavier Mauciere, Vestas, Automatic 2D airfoil Generation, Evaluation and Optimisation Using Matlab and Xfoil, master’s thesis, 2009, DTU Mechanical Engineering, Section of Fluid Mechanics, Technical University of Denmark.

- [24] Barış Önen, Ali Çınar, düz flaplı pozitif kambura sahip NACA 4412 kanat kesitinin aerodinamik performansının bilgisayar destekli analizi. Ulusal Tasarım imalat ve Analiz Kongresi 11-12 Kasım 2010- Balıkesir.
- [25] Horia Dumitrescu, Vladimir Cardoş; the turbulent boundary layer on wind turbine blades, proceedings of the romanian academy, series of the romanian academy volume 11, number 2/2010, pp. 125–136.
- [26] S. Sarada, M. Shiva Shankar and Rudresh.G” Numerical simulation of Viscous, Incompressible flow around NACA 64618 subsonic airfoil using Computational Fluid Dynamics”, Proceedings of National conference on advances in Mechanical Engineering, Allied Publishers Pvt Ltd, 2012.
- [27] Tetsuya Kogaki, Hhikaru Matsumiya, Kaori Kieda, Naofumi Yoshimizuand Yuusuke Yamamoto; performance improvement of airfoils for wind turbines by the modified vortex generator, European Wind Energy Conference Proceedings 2004.
- [28] Amit Saraf, Faruk Ahmed Nazar, Sushil Pratap Singh, Analysis of the k- ϵ and k- ω standard models for the simulation of the flow over a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 4412 airfoil International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 6, June-2013 1659 ISSN 2229-5518 IJSER © 2013 <http://www.ijser.org>.
- [29] Ravi.H.C1, Madhukeshwara.N2, S. Kumarappa3, Numerical Investigation Of Flow Transition For Naca-4412 Airfoil Using Computational Fluid Dynamics, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 2, Issue 7, July 2013, ISSN: 2319-8753.
- [30] Abbott.I.H, ‘Theory of wing section, including a summary of airfoil data, Dover book on Physics, 1995.
- [31] Davis, W.H., ‘Technique for Developing Design Tools from the Analysis methods of Computational Aerodynamics,’ AIAA Journal, Vol. 18, No.9, September, 1980, pp. 1080-1087.
- [32] De Boor, C., ‘On calculating with B-Splines,’ Journal of Approximation Theory, vol.6, 1972, pp.50-62.
- [33] NACA 0012 VE NACA 4412 Kanat Kesitlerinin Yeniden Tasarlanarak Had ile Analiz Edilmesi, Ali Erişen, Mehmet Bakırcı*, Journal of Engineerin and Technological Sciences (2014/1)].
- [34] Wavy Airfoil, Patent No: US 8,573,541 B2, (2013).

- [35] Rüzgâr türbini kanadında vorteks jeneratörlerinin yenilenmesi, Paent No: EP 2 548 800 A1, (2013).
- [36] ANSYS Fluent 12.0, Theory Guide.
- [37] Naca0012 Kanat Profili Etrafındaki Hava Akısının Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi, Cevahir Tarhan, Temmuz 2012 Yl.
- [38] Uzol, Nilay Sezer, 2009,” Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Üç-Boyutlu Karmaşık Akış Problemlerinin Yüksek Başarımlı Hesaplamaları”, Makine Mühendisliği Bölümü, TOBB, Ankara.
- [39] Slatlı Kanat Profilinin Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava Ve Su Akışlarının İncelenmesi Ve Aerodinamik Performans Analizleri, Çağrı Cengiz, 2010 Yl.
- [40] Uçak Kanatlarında Aerodinamik Davranışın Teorik Ve Deneysel İncelenmesi, Osman Murat Bayrak, 2012 Yl.

ÖZGEÇMİŞ

Ufuk Ali AYGEN, 22.02.1985 tarihinde Adapazarı'nda doğdu. Eğitim hayatını Sakarya'da tamamlamış olup 2004 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2008 yılında mezun oldu. 2009 - 2010 yıllarında 5'nci Kolordu Komutanlığı Bakım bölümünde yedek subay olarak askerliğini tamamladı. 2010 yılında özel sektörde makine mühendisi olarak iş hayatına başladı. 2011 yılından beri Sakarya Ticaret ve Sanayi Odası bünyesinde uzman olarak çalışmaya devam etmektedir. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır.