

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 1.2 MW'LIK RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADININ
AERODİNAMİK VE MALZEME OPTİMİZASYONU

OĞUZHAN GEDİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İMAL USULLER PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. AYŞEGÜL AKDOĞAN EKER

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 1.2 MW'LIK RÜZGÂR TÜRBİNİ
KANADININ AERODİNAMİK VE MALZEME OPTİMİZASYONU

Oğuzhan GEDİK tarafından hazırlanan tez çalışması 21.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cihan DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenim hayatımın her aşamasında tecrübesi, bilgi birikimi, insaniyeti ve çalışma disipliniyle yoluma ışık olan, tez çalışmasına başladığım günden itibaren her türlü desteği sağlayarak çalışmamı bitirmemi sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER' e teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bugünlere gelmemde kuşkusuz en büyük paya sahip olan değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Gerek öğrenim hayatım gerek iş hayatım boyunca desteğini bir an olsun esirgemeyen değerli arkadaşım Barış ERDEM' e teşekkür ederim.

Haziran, 2018

Oğuzhan GEDİK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viiviii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.2.1 Modern Rüzgar Türbini Geliştirme	3
1.3 Hipotez	6
BÖLÜM 2	
TASARIM PARAMETRELERİ	7
BÖLÜM 3	
ÖN TASARIM	11
3.1 Kanat Profili Seçimi	11
3.1.1 Panel Metod	11
3.1.2 Viterna ve Montgomerie yöntemleri ile kanat profili kaldırma ve sürükleme enterpolasyonu	12
3.1.2.1 Viterne Metod	12
3.1.2.2 Montgomerie Metod	13

3.1.3	Fırar kenarı arttırılmış rüzgâr türbini kanat profilleri	15
3.2	Burulma Açısının Optimizasyonu.....	18
3.3	Kord Uzunluklarının Optimize Edilmesi.....	18
3.4	Optimum Aktüatör Disk Teorisi	19
3.5	Betz Limit ve Betz Limitin KEM'e Etkileri.....	21
BÖLÜM 4		
GÜÇ KONTROLÜ		26
BÖLÜM 5		
WEIBULL PARAMETRELERİ İLE YILLIK ÜRETİM HESAPLAMA		28
BÖLÜM 6		
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ		29
6.1	Akış Alanı ve Ağ Yapısı.....	30
BÖLÜM 7		
1.2 MW MODERN RÜZGÂR TÜRBİNİ		31
7.1	Kanat Sayısı.....	32
7.2	Yatay Eksen Rüzgâr Türbinleri İçin Kanat Profilleri.....	33
7.2.1	360° Polar Ekstrapolasyon.....	40
7.3	Kord Dağılımı	42
7.4	Burulma Açısı Dağılımı	45
7.5	Güç Katsayısı.....	47
7.6	Nümerik Akış Simülasyon Sonuçları	51
BÖLÜM 8		
1.2 MW RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİK OPTİMİZASYON SONUÇLARI VE ÖNERİLER .		65
BÖLÜM 9		
1.2 MW RÜZGÂR TÜRBİNİ YAPISAL TASARIM VE MALZEME OPTİMİZASYONU		66
9.1	Amaç	66
9.2	Kompozit	66
9.3	Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Yapısal Optimizasyon	71
9.4	Kompozit Optimizasyonunun Ağ Yapıya Bağımlılık Kontrolü.....	73
9.5	1.2 MW Rüzgâr Türbini Kanadının Yapısal Tasarımı	75
9.5.1	Malzeme Seçimi	75
9.5.2	Serbest Boyut Optimizasyonu.....	77
9.5.3	Boyut Optimizasyonu	82
9.5.4	Karıştırma Optimizasyonu.....	84
9.6	Son Kanadın Yapısal Özellikleri.....	85
9.6.1	Şekil Değiştirme Dağılımı	86
9.6.2	Gerilme Dağılımı	87
9.6.3	Titreşim Biçimleri.....	88

BÖLÜM 10

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR	92
EK-A	
HAD İÇİN GEREKEN BAZI BİLGİLER.....	94
A-1 Reynolds Numarası	94
A-2 k-w SST Türbülans Modeli	94
A-3 4.dereceden Polinom Denklem	94
A-4 Spalart- Allmaras Model, eddy viskosite	94
EK-B	
HAD ÖZELLİKLERİ.....	95
B-1 NREL Phase VI Deney Sonuçları ve HAD Model Karşılaştırması NLSS Mühendislik.....	95
B-2 Ağ Yapı Hassasiyeti.....	95
ÖZGEÇMİŞ	96

SİMGE LİSTESİ

C_p	Güç Katsayısı
C_m	Moment Katsayısı
λ	Kanat Ucu Hızının Rüzgâr Hızına Oranı
C_L	Kaldırma Kuvvet Katsayısı
C_D	Sürüklenme Kuvvet Katsayısı
Ω	Açısal Hız
R	Yarıçap
V_w	Rüzgâr Hızı
AoA	Angle of Attack (atak açısı)
C_{opt}	Optimum Kord Uzunluğu
P	Güç
A_R	Kanadın Tarama Alanı
R	Kanat Yarıçapı
Re	Reynolds Sayısı
T	Sıcaklık
ρ	Özkütle
K	Weibull Parametresi_1
A	Weibull Parametresi_2
E	Elastiklik Modülü

KISALTMA LİSTESİ

BEM	Blade Element Method
CFD	Computational Fluid Dynamic
Cf	Force Coefficient/ Kuvvet Katsayısı
Cp	Power Coefficient/Güç Katsayısı
DERT	Dikey Eksen Rüzgâr Türbini
DU	Delft University
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
KEM	Kanat Eleman Yöntemi
kWh	Kilowatt Per Hour
MW	MegaWatt
NREL	National Renewable Energy Laboratory
Uröl	Rölatif Rüzgâr Hızı
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
YERT	Yatay Eksen Rüzgâr Türbini

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1 C.F. Brush'un Rüzgâr Türbini	3
Şekil 1. 2 Rüzgâr Türbini Ana Bileşenleri	4
Şekil 1. 3 Gövde İçindeki Bileşenler	5
Şekil 1. 4 Cam fiberi katman serimi	5
Şekil 1. 5 Cam fiberi kanat fabrikası	6
Şekil 2. 1 Atak Açısı	8
Şekil 2. 2 Kanat Burulma Açısı	10
Şekil 3. 1 Kanat profili ve kaynak dağılımı	12
Şekil 3. 2 NACA23012	14
Şekil 3. 3 NACA 23012 kaldırma katsayısı ve NACA 23012 sürüklenme katsayısı	14
Şekil 3. 4 NACA 23012 kaldırma katsayısı	14
Şekil 3. 5 NACA 23012 sürüklenme katsayısı	15
Şekil 3. 6 DU-91-W250 kanat profili	16
Şekil 3. 7 Tamamen türbülanslı k-SST modeli ile hesaplanan DU-91-W2-250 kanat profilinin firar kenardaki artışın kanat profiline göre kaldırma katsayısındaki artış	16
Şekil 3. 8 DU-97-W-300 kanat profili	16
Şekil 3. 9 Tamamen türbülanslı k-SST modeli ile hesaplanan DU-91-W-3000 kanat profilinin firar kenardaki artışın kanat profiline göre kaldırma katsayısındaki artış	17
Şekil 3.10 DU-96-W-350 kanat profili	17
Şekil 3.11 Tamamen türbülanslı k-SST modeli ile hesaplanan DU-96-W-350 kanat profilinin firar kenardaki artışın kanat profiline göre kaldırma katsayısındaki artış	18
Şekil 3. 12 Rotor üzerindeki hız bağıntıları	20
Şekil 3. 13 Temel momentum teorisine göre, serbest akışta hava akışından mekanik enerjinin çekilmesine bağlı akış koşulları	22
Şekil 3. 14 Akış gücünün ideal disk şekilli bir enerji dönüştürücüsünden geçirilmesi ile mümkün olan en yüksek mekanik güç elde edilmesi	24
Şekil 3. 15 Kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranına bağlı olarak değişen güç katsayısı	25
Şekil 4. 1 Türbin Kontrol Sürücülerini	26
Şekil 6. 1 Ağ Yapı Geometrilere	30
Şekil 7. 1 Farklı Rüzgâr Türbinlerine Ait Güç Katsayıları	31

Şekil 7. 2	Yatay Eksen Rüzgâr Türbinlerindeki Güç Katsayılarının Farklı Sayıdaki Kanat Miktarına Göre Değişimi.....	32
Şekil 7. 3	Kanat Bölümleri.....	34
Şekil 7. 4	NACA Kanat Profilleri.....	34
Şekil 7. 5	FX Kanat Profilleri.....	35
Şekil 7. 6	SG Kanat Profilleri.....	35
Şekil 7. 7	AH Kanat Profilleri.....	35
Şekil 7. 8	DU Kanat Profilleri.....	36
Şekil 7. 9	Kaldırma Kuvvet Katsayısı ve Atak Açısı.....	36
Şekil 7. 10	CL/CD oranı ve Atak Açısı.....	37
Şekil 7. 11	NACA Kanat Profillerinin CL/CD Oranlarına Karşılık Gelen Atak Açıları...	38
Şekil 7. 12	FX-73-W-108/227, SG6043 kanat proilleri CL/CD oranı ve atak açısı.....	39
Şekil 7. 13	Kanattaki bölgelerin performans özellikleri.....	39
Şekil 7. 14	AH-93-W145 CL ve CD değerlerinin 360 derece ekstrapolasyonu.....	41
Şekil 7. 15	DU 91-W-2250 CL ve CD değerlerinin 360 derece ekstrapolasyonu.....	41
Şekil 7. 16	Kanat profillerinin CL ve CD değerlerinin 360 derece ekstrapolasyonu..	42
Şekil 7. 17	Schmitz kord dağılımı kanat DU 91-2250LM/AH 93-W-257/ NACA 64618.....	42
Şekil 7. 18	Schmitz dağılımının radyal pozisyona göre değişimi.....	43
Şekil 7. 19	Schmitz kord dağılımının tek bir kanat profilinden oluşan kanat için DU 99- W- 350LM.....	43
Şekil 7. 20	Schmitz kord dağılımının linearizasyonu.....	44
Şekil 7. 21	Kord dağılımı lineerleştirilmiş DU-91-W-2250LM/AH 93-W-257/ NACA64618.....	44
Şekil 7. 22	Schmitz dağılımı ile linearizasyonu yapılmış kanadın daraltılması.....	44
Şekil 7. 23	Burulma açısı DU-91-W-2250/AH-W-257/NACA64618.....	45
Şekil 7. 24	Burulma açısının grafiksel gösterimi DU-91-W-2250/AH-W-257/NACA64618 kanadı için.....	45
Şekil 7. 25	Tek kanat profili kullanılan kanattaki burulma açısı DU 99- W- 350LM...	46
Şekil 7. 26	Ortalama burulma açısı dağılımı DU 91-W-2250LM/ AH 93-W-257/ NACA 64618 kanadı için.....	46
Şekil 7. 27	Kanatların Güç Katsayıları.....	47
Şekil 7. 28	Kanatlardaki Momentum Katsayıları.....	48
Şekil 7. 29	B1: AH 93-W-257/AH 93-W-145.....	48
Şekil 7. 30	B2: DU 99-W-350LM/DU 91-W-2250LM/AH 93-W-145.....	48
Şekil 7. 31	B3: DU 97-W-300LM/DU 91-W-2250LM/DU 93-W-210LM/NACA 64618.....	49
Şekil 7. 32	B1, B2, and B3 kanatlarının C_p değerleri.....	49
Şekil 7. 33	Rüzgâr hızı- güç grafikleri B1, B2, and B3.....	49
Şekil 7.34	B1, B2, ve B3 kanatlarının 5 ve 7 m/s rüzgâr hızları arasındaki güç karşılaştırmaları	50
Şekil 7. 35	Burun kısmının 120°'lik kısmı modellenir.....	51
Şekil 7. 36	Rotasyonel Akış Hacmi.....	52
Şekil 7. 37	Rotasyonel Olmayan Akış Hacmi.....	52
Şekil 7. 38	Rotasyonel ve Rotasyonel Olmayan Akış Hacimleri.....	52
Şekil 7. 39	Sınır koşulları olarak belirtilen yüzeyler.....	53
Şekil 7. 40	HAD ağ yapısı.....	53

Şekil 7. 41	Burun etrafındaki sınır tabaka ağ yapıları.....	54
Şekil 7. 42	Kanat etrafındaki ağ yapısı.....	54
Şekil 7. 43	KEM ve HAD güç çıkışlarının karşılaştırılması.....	55
Şekil 7. 44	Kesitler üzerindeki basınç dağılımı.....	57
Şekil 7. 45	r=14m'deki basınç dağılımı.....	57
Şekil 7. 46	r=16m'deki basınç dağılımı.....	58
Şekil 7. 47	r=18m'deki basınç dağılımı.....	58
Şekil 7. 48	r=20m'deki basınç dağılımı.....	59
Şekil 7. 49	r=22m'deki basınç dağılımı.....	59
Şekil 7. 50	r=24m'deki basınç dağılımı.....	60
Şekil 7. 51	r=26m'deki basınç dağılımı.....	60
Şekil 7. 52	r=28m'deki basınç dağılımı.....	61
Şekil 7. 53	r=30m'deki basınç dağılımı.....	61
Şekil 7. 54	r=32m'deki basınç dağılımı.....	62
Şekil 7. 55	r=34m'deki basınç dağılımı.....	62
Şekil 7. 56	r=36m'deki basınç dağılımı.....	63
Şekil 7. 57	r=24m'deki kanat kesidi etrafındaki hız dağılımı.....	63
Şekil 7. 58	Tahrik bölgesindeki hız değişimi.....	64
Şekil 7. 59	Türbin etrafındaki hız değişimi, üstten görünüm.....	64
Şekil 9. 1	Düzlemsel gerilme durumu.....	67
Şekil 9. 2	Delaminasyon.....	67
Şekil 9. 3	Mikro Çatlama.....	68
Şekil 9. 4	Kırılma Mekanizmaları.....	68
Şekil 9. 5	Maksimum Gerilme Teorisinin Formülü.....	69
Şekil 9. 6	Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi.....	69
Şekil 9. 7	Tsai-Hill arıza kriteri.....	70
Şekil 9. 8	3 hata kriteri için arıza mukavemet zarfı.....	70
Şekil 9. 9	Boyut Optimizasyonu.....	71
Şekil 9. 10	Şekil Optimizasyonu.....	72
Şekil 9. 11	Topoloji optimizasyonu.....	72
Şekil 9. 12	Reçine Malzeme Karşılaştırılması.....	76
Şekil 9. 13	Ağ yapı haline getirilmiş kanat.....	78
Şekil 9. 14	Modeldeki Süper Katmanlar.....	79
Şekil 9. 15	Kanat Konumu.....	80
Şekil 9. 16	Kalınlık Dağılımı 01.....	81
Şekil 9. 17	Kalınlık Dağılımı 02.....	81
Şekil 9. 18	Kalınlık Dağılımı 03.....	82
Şekil 9. 19	Kalınlık Dağılımı 04.....	82
Şekil 9. 20	Serbest Boyut Optimizasyonu Sonrası Katmanlar.....	83
Şekil 9. 21	Boyut Optimizasyonu Sonrası Bazı Katmanların Dağılımı.....	83
Şekil 9. 22	Boyut Optimizasyonu Sonrası Katmanları.....	84
Şekil 9. 23	Kanadın Şekil Değişimine Uğramış Hali.....	86
Şekil 9. 24	Kanat Üzerindeki Gerilme Dağılımı.....	87
Şekil 9. 25	1. Ve 2. Titreşim Biçimleri (100 defa büyütülmüş görüntü).....	88
Şekil 9. 26	3. Ve 4. Titreşim Biçimleri (100 defa büyütülmüş görüntü).....	89
Şekil 9. 27	5. Ve 6. Titreşim Biçimleri (100 defa büyütülmüş görüntü).....	89

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1 Modern ve Eski Tip Rüzgâr Türbinleri	2
Çizelge 7. 1 Farklı kanat profil konfigürasyonlu kanatlar	40
Çizelge 7. 2 4 kanat profilli kanat örneği.....	40
Çizelge 7. 3 Türkiye Weibull parametreleri ve rüzgâr hızı dağılımı.....	50
Çizelge 7. 4 Seçilen 3 kanadın yıllık enerji üretim tahminleri.....	51
Çizelge 9. 1 Ağ yapı bilgileri.....	73
Çizelge 9. 2 0 derece katman serbest boyut optimizasyon sonuçları.....	74
Çizelge 9. 3 45 derece katman serbest boyut optimizasyonu sonuçları.....	74
Çizelge 9. 4 90 derece katman serbest boyut optimizasyon sonuçları.....	75
Çizelge 9. 5 Cam fiber ve mekanik özellikleri.....	76
Çizelge 9. 6 Kompozit Malzeme Mekanik Özellikleri.....	77
Çizelge 9. 7 Dolgu Malzemesinin Mekanik Özellikleri.....	77
Çizelge 9. 8 Ağ Yapı Bilgileri.....	78
Çizelge 9. 9 Yükleme Durumları.....	79
Çizelge 9. 10 Optimizasyonu Sonuçları.....	80
Çizelge 9. 11 Karıştırma Optimizasyonu Adımları.....	85
Çizelge 9. 12 Titreşim Biçim Frekansları.....	88
Çizelge 9. 13 Titreşim Biçim Frekansları ve Uzak Durulması Gereken Değerler.....	90

**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 1.2 MW'LIK RÜZGÂR TÜRBİNİ
KANADININ AERODİNAMİK VE MALZEME OPTİMİZASYONU**

Oğuzhan GEDİK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Rüzgâr türbinlerinin kullanımının daha da artırılması için fayda/maliyet oranının yükseltilmesi gerekmektedir, bu terimin rüzgâr türbinleri için karşılığı TL/kwh olarak adlandırılan enerji maliyetidir. Enerji maliyeti, rüzgâr türbininin ürettiği elektrik miktarının, rüzgâr türbini imal edilirken ki maliyetine oranıdır. Bu değerin artırılması rüzgâr türbini kullanımının daha da artmasına neden olacaktır. Kanadın ağırlığı ile doğrudan ilişkili olan malzeme ve montaj maliyetleri, türbin maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Ülkemizin rüzgâr koşullarına uygun olarak aerodinamik açıdan optimize edilmiş rüzgâr türbini kanadı tasarlamak, bu kanadın ülkemizdeki rüzgâr koşullarında diğer ithal türbinlere göre daha fazla enerji üretimi yapabilmesi sağlayacaktır. Bu çalışma koşulları altında, benzer çıkış gücüne sahip olduğu belirtilen rüzgâr türbini kanatlarına göre daha hafif olması için malzeme açısından optimize edilmesi ve ağırlığı azaltılması enerji maliyetini düşürerek kullanım oranının daha da artmasını sağlayacaktır.

Bu proje benzer ölçekte ki ithal rüzgâr türbinleriyle kıyaslandığında ülkemiz rüzgâr koşullarında daha fazla enerji üretecek aerodinamik açıdan optimize ve benzer ölçekteki rüzgâr türbinlerinden daha hafif olacak şekilde ağırlık açısından da optimize edilmiş 1.2 MW yatay eksen rüzgâr türbini kanadının tasarlanması ve prototip imalatıdır.

Benzer ölçekteki ithal rüzgâr türbinleri, üretildiği ülkelerdeki rüzgâr koşulları baz alınarak tasarlandığı için, ülkemizde düşük oranda enerji üretimi yapmaktalar, bu sebeple tasarlanan kanat ülkemizdeki rüzgâr koşulları baz alınarak, düşük rüzgâr hızlarında dahi enerji üretimi yapabilmelidir.

Proje sonucunda ülkemizdeki rüzgâr koşullarında yüksek enerji verimliliğine sahip olacak rüzgâr türbini kanadı tasarlanmıştır. Aynı zamanda benzer güçteki rüzgâr türbinlerine oranla daha hafif ve mukavemet açısından da sorunsuz rüzgâr türbini kanadı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Temiz Enerji, Yenilenebilir Enerji, Rüzgâr Türbini Kanadı, Enerji Maliyeti



**1.2 MW WIND TURBINE BLADE AERODYNAMIC AND MATERIAL
OPTIMISATION WITH FINITE ELEMENT METHOD**

Oğuzhan GEDİK

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

In order to further increase the use of wind turbines, the benefit / cost ratio needs to be raised, which is the cost of energy referred to as TL / kWh for wind turbines. The cost of energy is the ratio of the amount of electricity produced by the wind turbine to the cost of producing the wind turbine. Increasing this value will cause the use of the wind turbine to increase further. Material and installation costs, which are directly related to the weight of the blade, constitute a significant part of the cost of the turbine. Designing a wind turbine optimized for aerodynamic optimization in accordance with the wind conditions of our country will enable this wind turbine to produce more energy than other imported turbines under the same wind conditions. Under these operating conditions, the wind turbine, which is said to have similar strength, is optimized for the material to be lighter than its blades and reducing the weight will reduce the energy cost and increase the utilization rate.

This project, compared to similar scale imported wind turbines, is intended to design prototype manufacturing the blade of the 1.2 MW horizontal axis wind turbine, which will produce more energy with aerodynamic optimization, and will be lighter than similar-sized wind turbines due to optimizing weight of turbine .

Imported wind turbines of similar size are designed on the basis of the wind conditions in the countries where they are produced so that our country is able to produce energy even at low wind speeds on the basis of the wind conditions in our blade country.

As a result of the project, the blade of the wind turbine, which will have high energy efficiency in the wind conditions in our country, is designed. At the same time, the wind turbine blade, which is having no problem about strength similar power wind turbines and lighter than the others, was obtained.

Keywords: Energy, Clean Energy, Renewable Energy, Wind Turbine, Turbine Blade, Cost of Energy



GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Sanayi Devrimi'nin başlangıcıyla, insanlığın enerji ihtiyacı hızla arttı. Bu sebeple insanlar 19. yüzyılın en uygun seçeneği olan fosil yakıtlara yöneldiler. Sanayi devriminin başlangıcından itibaren enerji talebi sürekli büyüdü, ancak fosil yakıt kaynakları azalıyor ve hızla yok oluyor. Petrol üreticileri, kaynakların elli yıl gibi bir sürede tükenebileceğini belirtmekte.

Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına neden oluyor. Bu sebeple, insanlar güneş radyasyonu, rüzgârı, okyanustaki su dalgalarını ve hatta okyanusun altından enerjiyi nasıl kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştüreceklerinin yollarını aramaya başladılar.


Rüzgâr türbinlerine, çoğu ülkede son yıllara kadar hak ettikleri önem verilmemiştir. Ancak, son on yılda, temiz enerji ve kirlilik endişelerine yönelik küresel talebin etkisiyle gelişmiş hükümetler rüzgâr enerjisi ile ilgili faaliyetlerini artırdı. Örneğin, halihazırda 970 deniz üzeri rüzgâr türbini olan İngiltere'de 3.3 GW rüzgâr türbini vardır. Türkiye hükümeti rüzgâr enerjisi konusunda da bir adım atmış ve birey ve firmalara, lisans almadan dahi 1 MW ve daha az yenilenebilir enerji tesisleri kurmalarına izin verecek yeni bir yasa çıkarmıştır. Rüzgâr enerjisi kapasitesi ve insanlığa yararları göz önüne alındığında, rüzgâr türbini teknolojisinin iyileştirilmesinin, düşünülenenden daha önemli olduğunu belirtmek açıktır. Rüzgâr türbinlerinin düşük kullanım oranının ana nedeni, bu yapıların yüksek maliyetidir. Rüzgâr türbini maliyeti, üretim maliyetlerinin üretilen enerji miktarına

bölünmesiyle hesaplanır (yaygın olarak kWh cinsinden)(enerji maliyeti). Rüzgâr türbinlerinin kullanımını artırmak için enerji maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir.



Üretim maliyetinin unsurları incelendiğinde, malzeme maliyetlerinin ve montaj süreci masraflarının, türbin kanatlarının ağırlığı ile doğrudan ilişkili olduğu görülecektir. Bu noktada, rüzgâr türbini kanatlarının benzer tasarım koşulları altında ağırlık azaltılmasının “verimlilik” ve kullanım açısından bir artış sağlayacağı kolaylıkla özetlenebilir.

Milin ve dönme ekseninin yönü, rüzgâr türbininin sınıflandırmalarını belirler. Rüzgârın geliş yönü ile rüzgâr türbininin kanatlarının bağlandığı mil aynı doğrultuda ise yatay eksenli rüzgâr türbini veya (horizontal axis wind turbine- HAWT) olarak bilinir. Düşey eksenli bir rüzgâr türbininin (vertical axis wind turbine- VAWT) mili ise rüzgârın geliş yönü ile 90 derece açı yapmaktadır. Rüzgâr türbinlerinden bazıları Çizelge 1'de gösterilmiştir[1].

Çizelge 1.1 Modern ve eski tip rüzgâr türbinleri

Numara	Tasarım	Tür	Verim	Şekil
1	Savonius Rotor	DERT	16%	
2		DERT	8%	
3	Amerikan Yel Değirmeni	YERT	31%	
4	Alman Yel Değirmeni	YERT	27%	

Çizelge 1.1 Modern ve eski tip rüzgâr türbinleri (Devamı)

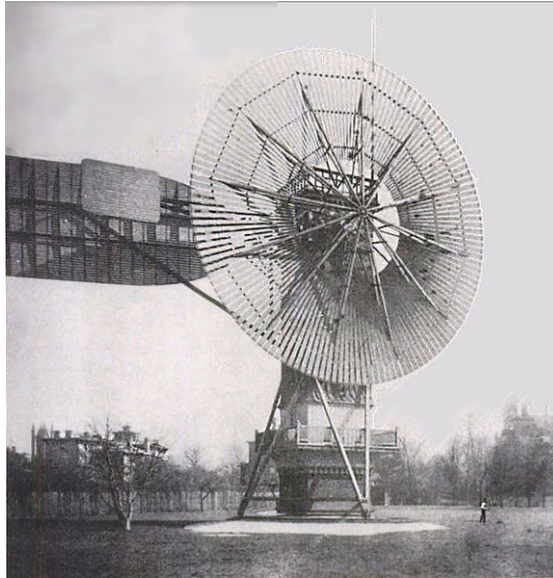
5	Darrieus Rotor	DERT	40%	
6	Modern Rüzgar Türbini	YERT	40-50%	

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, çeşitli kullanım tasarım çalışmaları yaparak, 1.2MW gücündeki bir rüzgâr türbinini hem ağırlık hem de performans açısından optimum olacak şekilde tasarlamak ve prototip imalatı yapmaktır.

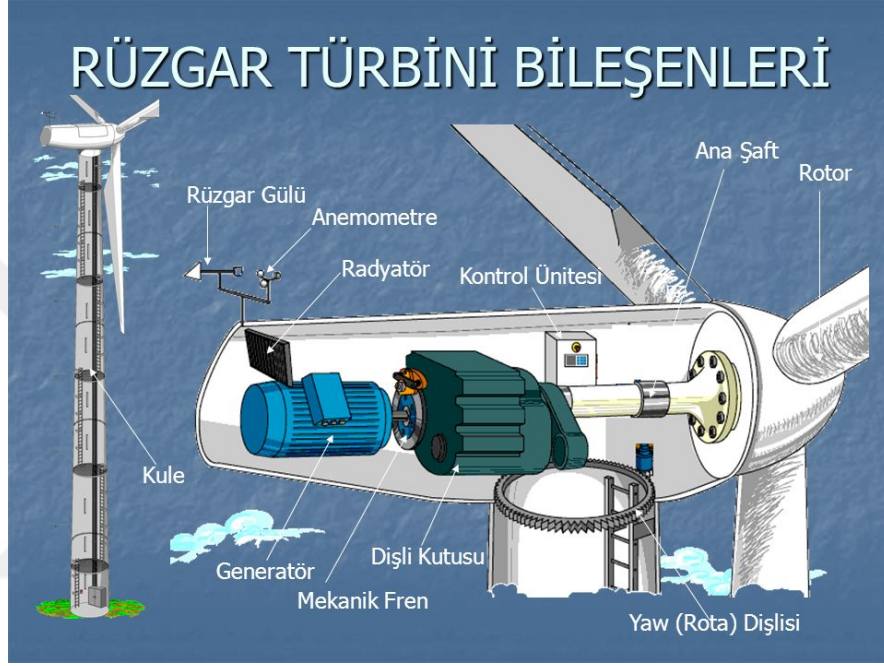
1.2.1 Modern Rüzgâr Türbini Geliştirme

İlk yel değirmenleri İran'da ve daha sonra Avrupa'da buğday öğütmek veya su pompalamak için kullanıldı. Rüzgâr enerjisi ile ilk elektrik üretimi 1887 yılında Scotlond'da Profesör James Blyth tarafından yapıldı. Şekil 1.1'de gösterilen rüzgâr türbini 1888'de Charles F. Brush tarafından yapılmıştır [2].

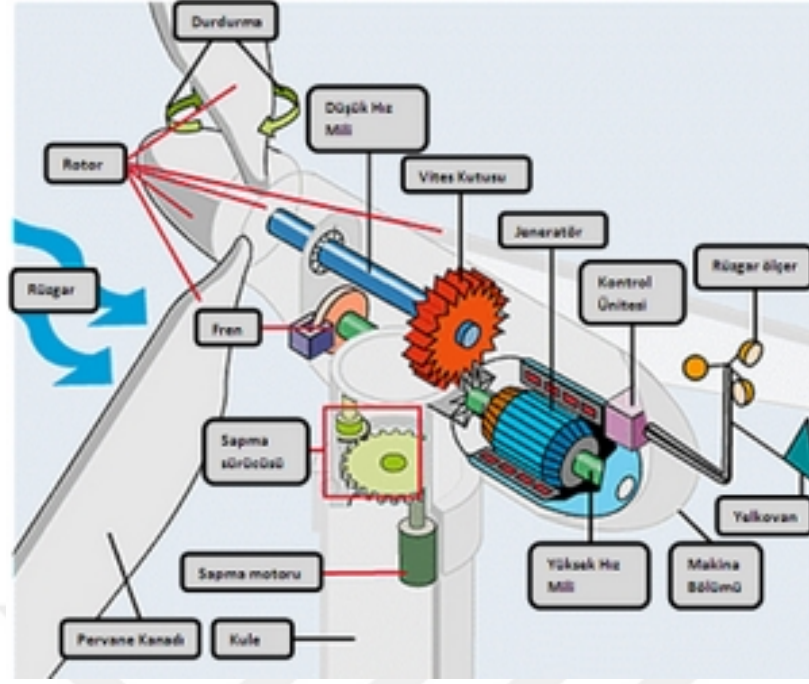


Şekil 1.1 C.F. Brush'un Rüzgâr Türbini.

20. yüzyılın başlarında, rüzgâr türbinlerine kanat tasarım çalışmaları yapıldıktan sonra, Prof. Albert Betz, $16/27$ maksimum rüzgâr gücü oranı ile çıkmış ve modern yatay eksen rüzgâr türbinleri ortaya çıkmaya başlamıştır. 1925 yılında Savonius ve 1931 yılında Darrieus kendi tasarımlarını icat etmiştir. İkinci dünya savaşı süresince Danimarka ve Almanya'da ve savaştan sonra da ABD'de rüzgâr türbini çalışmaları çok hızlandı[2].



Şekil 1.2 Rüzgâr Türbininin Ana Bileşenleri

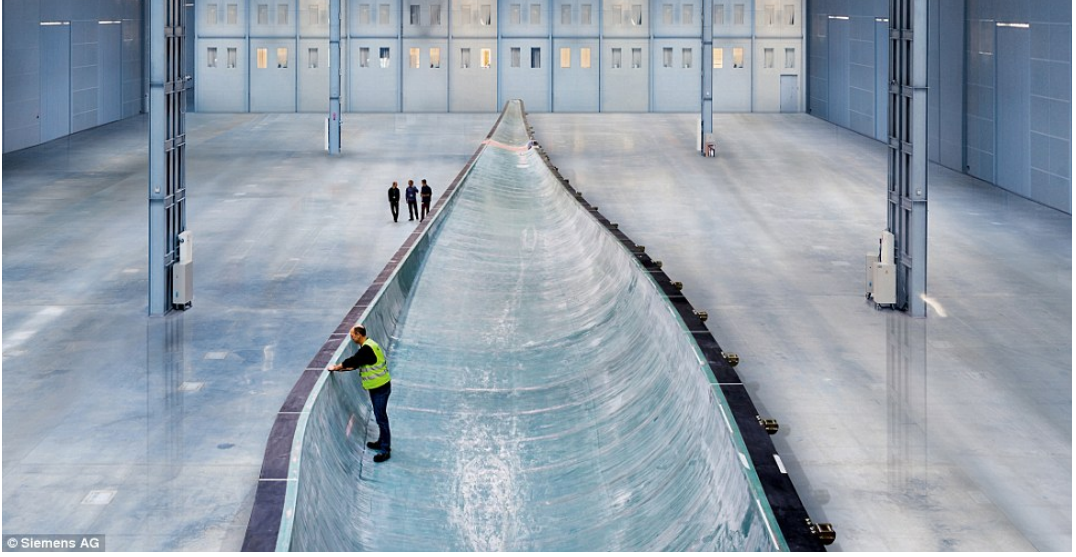


Şekil 1.3 Gövde İçindeki Bileşenler

Bugünkü kanatların yapısı, cam fiberi katmanlarının üst üste dizilmesiyle oluşur. Ağırlık ve kolay tasarım parametreleri nedeniyle geniş bir uygulamaya sahiptir. Kanatlar, burun ve gövde gövdesi cam fiberden yapılmaktadır. Genel olarak, kanadın şeklini sağlamak için kanat kalıbı, burunun şeklini sağlamak için burun kalıbı ve gövdesi için gövdesinin geometrisinin kalıbı hazırlanır ve daha sonra cam fiberi katmanlar üst üste dizilerek yerleştirilir (Şekil 1.8, Şekil 1.9).



Şekil 1.4 Cam Fiberi katman serimi, Gamesa Corp Tecnologica SA, İspanya



Şekil 1.5 Cam Fiberi kanat fabrikası, Siemens AG, Almanya

1.3 Hipotez

Her geçen gün artan enerji ihtiyacı ve her geçen gün gittikçe azalan fosil yakıtlar, enerji ihtiyacını karşılamak için yeni çözümler arayışlarını da beraberinde getirmektedir. Bu çözümler arayışlarına karşılık olarak günümüzün en çok başvurulan çözümlerinden biri yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisidir. Rüzgârın gücünü elektrik enerjisine çeviren bu makinelerin en önemli kısımlarının başında kanatları gelmektedir. Rüzgârdan gelen enerjiyi dönme enerjisine çeviren kanatların tasarımı bulunduğu bölgenin rüzgâr potansiyeline göre değişmesi gerekmektedir.

Ülkemizin rüzgâr koşullarında yüksek performansa sahip kanat tasarlamak, enerji verimini artıracak gibi bu kanadın ağırlığını da öngörülen sınır şartları içerisinde olabildiğince minimuma indirmek üretim maliyetlerini de düşürecektir. Böylelikle ülkemizde MW üstü sınıfta ilk kez tasarımı ve imalatı yerli olan MW üstü rüzgâr türbini kanatları ile düşük maliyetli ve yüksek performanslı kanatlar elde edilmiş olacaktır.

BÖLÜM 2

TASARIM PARAMETRELERİ

Nominal güç: Nominal güç, müşteri veya üretici tarafından elde edilmesi amaçlanan önceden belirlenmiş güç çıkışıdır.

Nominal rüzgâr hızı: Bu, rüzgâr türbininin nominal güç çıkışına ulaştığı en düşük rüzgâr hızıdır. Bu hızın üstünde, daha yüksek güç çıkışları mümkündür, ancak rotordan sabit bir güç çıkışı sağlamak için ve kanatlardaki yükleri ve gerilmeleri sınırlamak için kontrol edilir.

Devreden çıkma hızı: Bu, türbinin çalışacağı en yüksek rüzgâr hızıdır. Bu hızın üzerinde, türbin kanatlarının zarar görmesini önlemek için durdurulur.

Devreye girme hızı: Bu, türbinin çalışacağı ve elektrik üreteceği en düşük rüzgâr hızıdır.

Kanat Ucu Hız Oranı: Kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanan kanat ucu hız oranı. Rotor boyutları gibi temel özelliklerin temel tasarım parametresidir.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_w} \quad (2.1)$$

λ = Rüzgâr hızının kanat ucu hızına oranı,

Ω = açısal hız (rad/s),

R= yarıçap,

V_w = rüzgâr hızı.

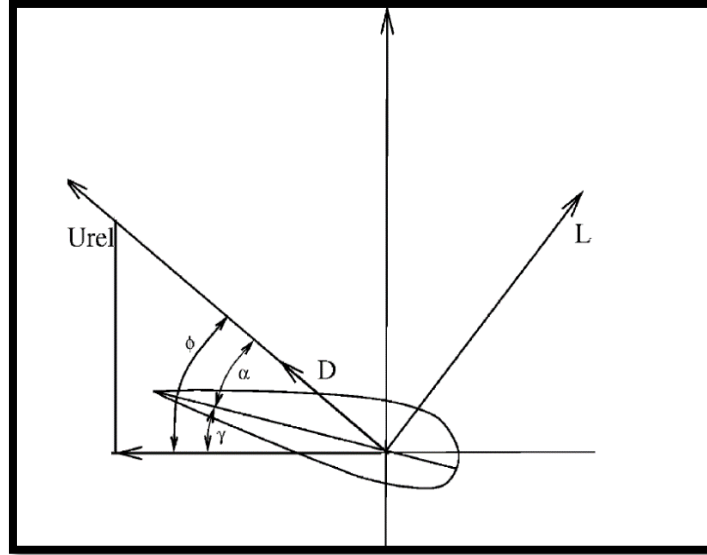
Sağkalım rüzgâr hızı: Rüzgâr türbininin güvenli bir şekilde dayanacağı maksimum rüzgâr hızıdır. Çoğu rüzgâr türbini, 50 m / s - 65 m / s olan belirli bir sağkalım rüzgâr hızına sahiptir.

Kord uzunluk değişimi: Kord uzunluğu, kanat profilinin kanat üzerindeki genişliğine verilen isimdir.

Güvenlik Faktörü: Güvenlik faktörü, tasarım değerinin hesaplanan veya belirtilen değere oranıdır [3].

Katılık: Katılık, kanat alanının rotorun süpürme alanına oranıdır. Katılık miktarını azaltmak, malzeme kullanımında ve üretim maliyetlerinde düşüğe neden olur.

Kaldırma Kuvvetinin Sürüklenme Kuvvetine Oranı: Kaldırma kuvveti (L,lift), türbin tarafından üretilen güç veriminden sorumlu olan yerçekiminin üstesinden gelmek için kullanılan kuvvettir ve bu kuvvet, uygun tasarımı kullanarak maksimize etmek türbin verimi açısından önemlidir. Sürüklenme kuvveti (D,drag), nispi rüzgâr hızına veya kanadın hareketine karşı direnç kuvvettir [4].



Şekil 2.1 Atak Açısı

α = atak açısı

$\alpha = \phi - \gamma$

$U_{röl}$ = rölatif rüzgâr hızı

Sürüklenme kuvvetinin kaldırma kuvvetine oranı, tasarımda önemli bir parametredir.

Sürüklenme kuvvetinin kaldırma kuvvetine oranı=Kaldırma Kuvveti / Sürüklenme Kuvveti= C_L/C_D (2.2)

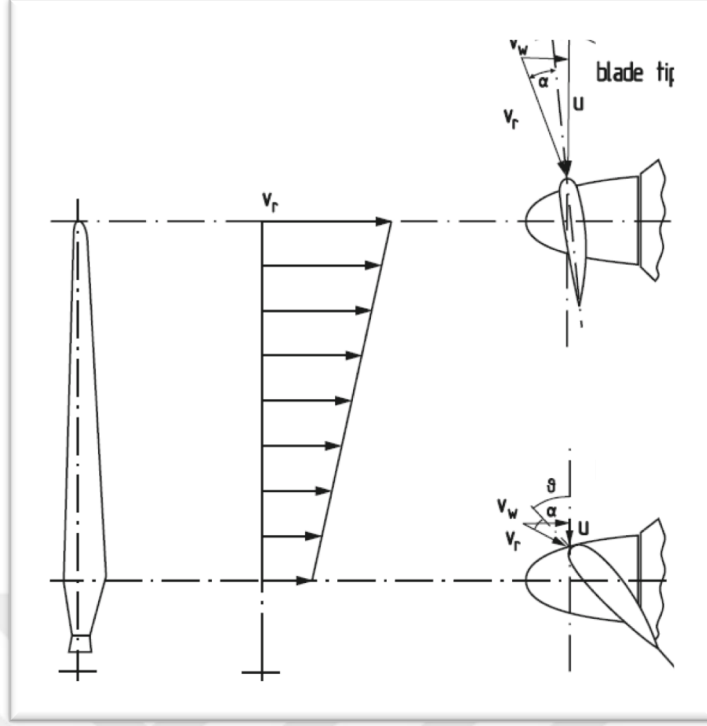
$$C_L = \frac{L}{1/2\rho V_\infty^2 c} \quad (2.3)$$

$$C_D = \frac{D}{1/2\rho V_\infty^2 c} \quad (2.4)$$

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hesaplaması bir sonraki bölümde daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Atak açısı: Atak açısı kord çizgisine göre gelen akışın açısıdır ve C_L ve C_D belirlenirken bu açı referans alınır (Şekil 2.1).

Burulma açısı: Atak açısını ve dolayısıyla kaldırma katsayısını rotor tarafından akış hızındaki en uygun azalmaya göre korumak için, rotor kanadını kökten uca geometrik olarak burulmaya yatkındır. Burulma açısı, burada yerel kanat kordu ve rotor yarıçapı arasındaki veya kanat ucundaki açı olarak tanımlanmıştır [3].



Şekil 2.2 Kanat Burulma Açısı [3]

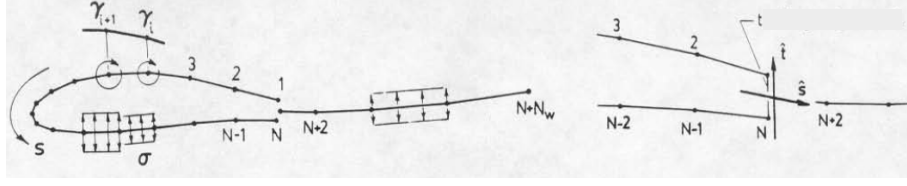
ÖN TASARIM

3.1 Kanat Profili Seçimi

Bir kanat profili tasarlandığında veya seçildiğinde, C_L / C_D oranının maksimize edilmesi gerektiği açıktır. Bunun nedeni rüzgâr türbinin çalışma prensibi doğrultusunda, kanat üzerinde bulunan kanat profili sadece kaldırma kuvveti ile güç üretmez buna ek olarak sürtünme kuvveti de bu üretilmeye çalışılan gücü düşürmeye çalışır, bu sebeple kanat profilinin kendine has özelliği olan kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları arasındaki oranın maksimum olduğu değerde kullanılması istenir ki o kanat profili en fazla gücü üretmeye katkıda bulunsun. Bununla birlikte, tasarımın diğer araçlarını tatmin edecek durum söz konusu olamaz. Bir kanat profili üzerindeki kuvvetleri belirlemek için, önce basınç dağılımı hesaplanmalıdır. Bu iş için birçok panel metodu kullanılabilir[4].

3.1.1 Panel metot

Rüzgâr türbini kanat profillerinin üzerindeki basıncı hesaplamak için Drela'nın panel yöntemi tercih edilir. Akış alanı için çözümlenirken sınır tabakasını hesaba katan bir 2. derece panel yönteminden oluşur. Böylece, sınır tabakası ve dış akış arasındaki etkileşim oldukça gerçekçi bir şekilde modellenir[5].



Şekil 3.1 Kanat Profili ve vorticity ve kaynak dağılımı [6]

3.1.2 Viterna ve Montgomerie yöntemleri ile kanat profili kaldırma ve sürüklenme ekstrapolasyonu

360 derece polar modelleme, Viterna veya Montgomerie yöntemleri ile elde edilir. Bir kanat profili, bir rüzgâr tüneli içine yerleştirilir veya daha önce sözü edilen ve sürtünme, eğilme momenti, atak açısı parametreleri ile hesaplanır[6].

3.1.2.1 Viterna metot

Viterna yöntemi, kanat profili verilerinin tahmininde en popüler yöntemlerden biridir. Veriler, deneylerden veya sayısal hesaplamalardan elde edilebilir. Verilerin kullanılmasıyla, duraklamadan 90° değerine kadar verilerin hesaplanması aşağıdaki denklem kullanılarak gerçekleştirilmiştir [7].

$$C_L = A_1 \sin 2\alpha + A_2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \quad (3.1)$$

$$C_D = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha \quad (3.2)$$

$$C_{Dmax} = 1.11 + 0.018AR$$

AR: en boy oranıdır.

$$A_1 = \frac{C_{Dmax}}{2} \quad (3.3)$$

$$B_1 = C_{Dmax} \quad (3.4)$$

$$A_2 = (C_{Lstall} - C_{Dmax} \sin \alpha_{stall} \cos \alpha_{stall}) \frac{\sin \alpha_{stall}}{\cos^2 \alpha_{stall}} \quad (3.5)$$

$$B_2 = \frac{C_{Dstall} - C_{Dmax} \sin^2 \alpha_{stall}}{\cos \alpha_{stall}} \quad (3.6)$$

3.1.2.2 Montgomerie metot

Montgomerie yöntemi aynı zamanda bir kanat profilinin kaldırma ve sürüklenme katsayılarını hesaplamakta kullanılan popüler yöntemlerden biridir. Montgomerie yöntemi, bir atak açısındaki kanat profillerinin bazı potansiyel akış benzeri davranışların var olduğu varsayımına dayanarak formüle edilir. Daha yüksek atak açılarında, kanat profili ince bir levha gibi davranır. Aradaki açılardaki davranışı simüle etmek için bir dönüşüm işlevi kullanılır. Toplam performans, aşağıdaki formül kullanılarak açıklanabilir; ince levha davranışı ve potansiyel akış eğrisi (t) arasındaki bir enterpolasyondur [7].

$$C_L = ft + (1-f)s \quad (3.7)$$

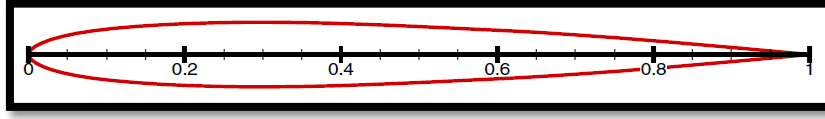
$$f = \frac{1}{(1+k\Delta\alpha^4)} \quad (3.8)$$

$$k = \left(\frac{1}{f_2} - 1\right) \frac{1}{(\alpha^2 - \alpha_m)^4} \quad (3.9)$$

$$\alpha_m = \frac{\alpha_1 - G\alpha_2}{1-G} \quad (3.10)$$

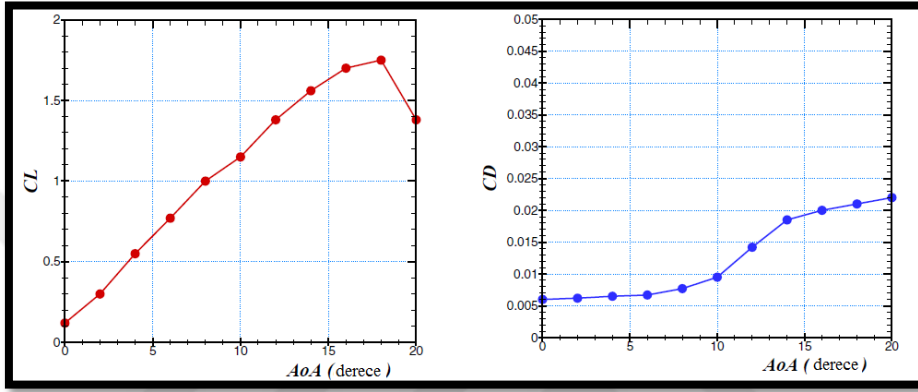
$$G = \sqrt[4]{\frac{\frac{1}{f_1} - 1}{\frac{1}{f_2} - 1}} \quad (3.11)$$

Örnek:



Şekil 3.2 NACA 23012

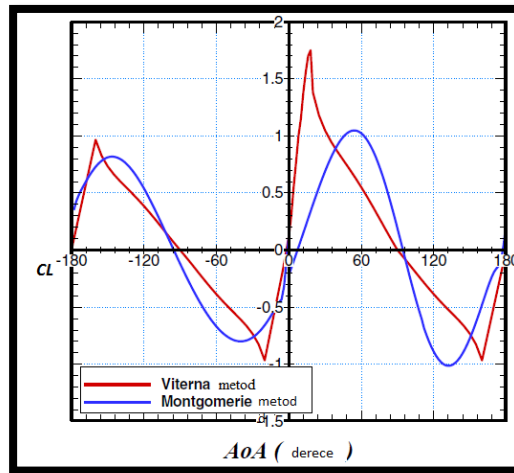
Atak Açısına Karşılık Kaldırma ve Sürüklenme Katsayıları:



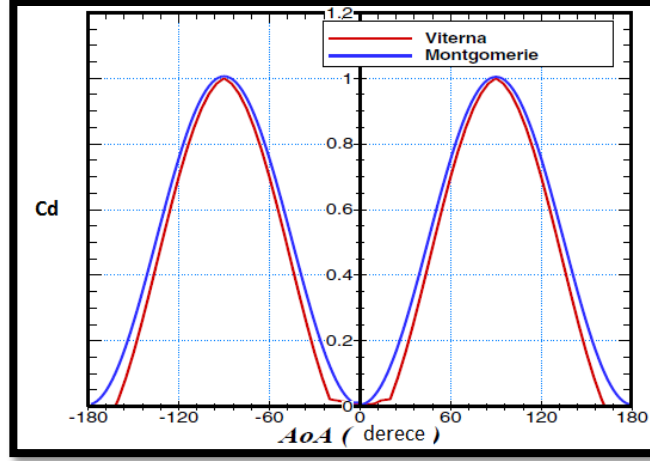
Şekil 3.3 soldaki: NACA 23012 Kaldırma Katsayısı, sağdaki: NACA 23012 Sürüklenme Katsayısı

Viterna ve Montgomerie yöntemleri ile ekstrapolasyon yaptıktan sonra 360 derece polar elde edilir. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları enterpolasyondan sonra verilir.

[Şekil 3.4, Şekil 3.5]



Şekil 3.4 Kaldırma Katsayısı of NACA23012



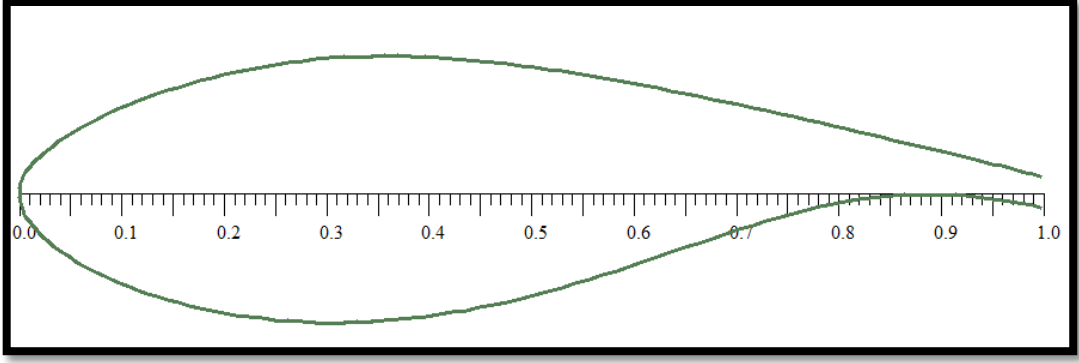
Şekil 3.5 Sürüklenme Katsayısı NACA23012

Montgomerie ve Viterna yöntemleri yardımıyla kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları hesaplanmış, 360 derece polar ekstrapolasyonları yapılmış ve yukarıdaki grafikler elde edilmiştir. [Şekil 3.4, Şekil3.5] Kaldırma kuvvet katsayıları ve sürüklenme kuvvet katsayılarının kanat profillerinin dönme merkezinden kaç derece kaçıklıkta hangi değeri elde ettiğini belirten grafikler yukarıda verilmiştir. Bu grafikler bahsi geçen kanat profilinin hangi açıda hangi kaldırma kuvvet katsayısına ve hangi sürüklenme kuvvet katsayısına sahip olduğunu belirtir.

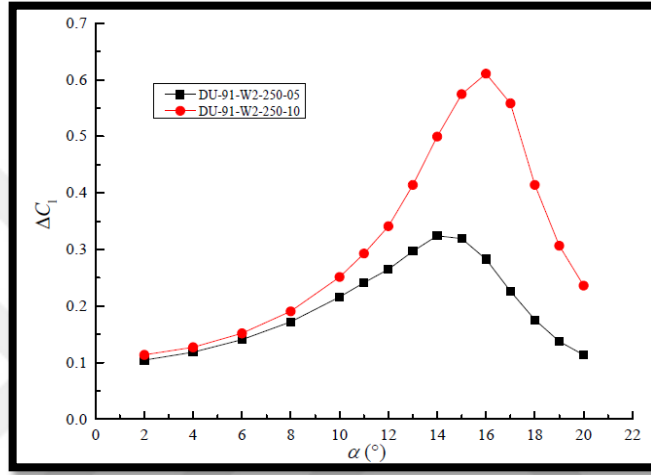
3.1.3 Firar kenarı arttırılmış rüzgâr türbini kanat profilleri

Firar kenar kalınlığının artmasıyla, lineer bölgedeki kaldırma kuvvetinde de artma durumu söz konusu olur, kaldırma kuvvetinin artması düşük atak açılarında kademeli olarak sınırlanırken, sürtünme kuvveti önemli ölçüde artar. Daha geniş maksimum kalınlıktaki kord uzunluğuna sahip daha kalın kanat profilleri için, firar kenarın kalınlığını % 5'den % 10 kord uzunluğundan arttırıldığında, kaldırma kuvveti artışı nispeten daha ince kanat profillerinden daha büyük olmuştur. [Şekil 3.7, Şekil 3.9, Şekil 3.11] Ancak çok büyük kaldırma kuvveti, ani duraklamaya neden olabilir, bu da güç çıkışı için bir kazanç değildir [8].

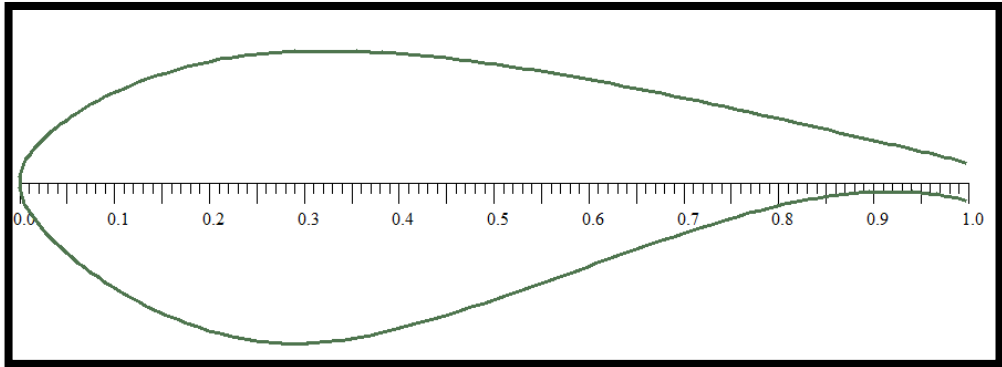
Rüzgâr türbini kanat profillerine ait örneklerden bazıları aşağıda verilmiştir:



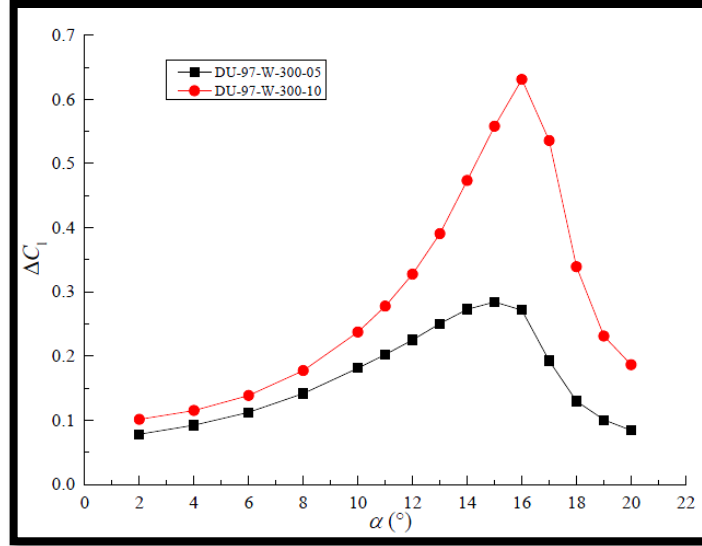
Şekil 3.6 DU-91-W2-250 Kanat Profili



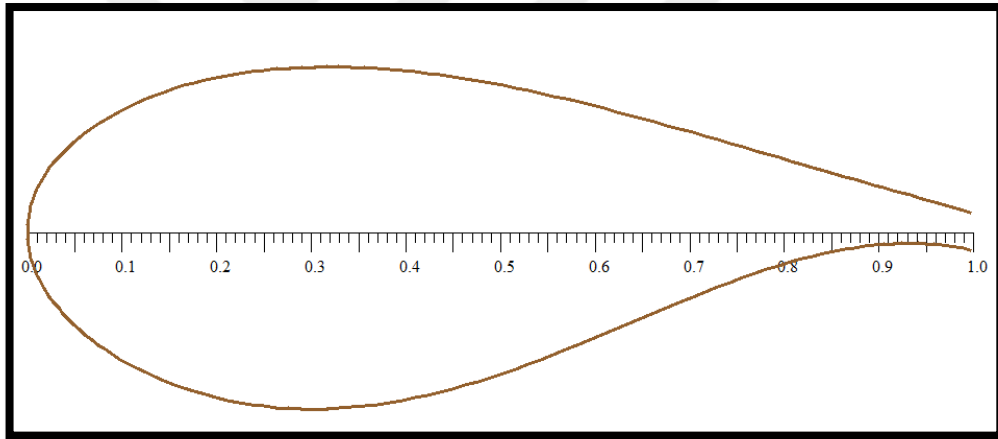
Şekil 3.7 Tamamen türbülanslı k-SST modeli ile hesaplanan DU-91-W2-250 kanat profilinin firar kenardaki artışın orijinal kanat profiline göre kaldırma katsayısındaki artışı [Ek-A]



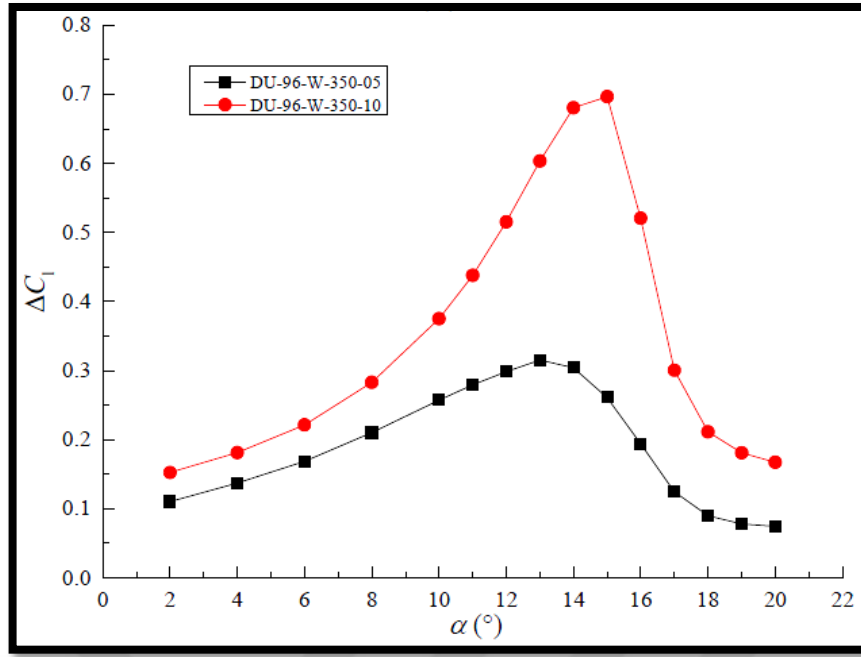
Şekil 3.8 DU-97-W-300 Kanat Profili



Şekil 3.9 Tamamen türbülanslı k-SST modeli ile hesaplanan DU-97-W-300 kanat profilinin firar kenardaki artışın orijinal kanat profiline göre kaldırma katsayısındaki artışı



Şekil 3.10 DU-96-W-350 kanat profili



Şekil 3.11 Tamamen türbülanslı k-SST modeli ile hesaplanan DU-96-W-350 kanat profilinin firar kenardaki artışın orijinal kanat profiline göre kaldırma katsayısındaki artışı[8]

3.2 Burulma Açısının Optimizasyonu

Gerekli olan burulma açısı, uç hızı oranına ve istenen kanat profili açısına bağlıdır. Genel olarak, burun kısmındaki kanat profili, yüksek rüzgâr hızı oranından kanadın radyal hızına bağlı olarak rüzgârın içine doğru açılmaktadır. Burulma açısı, burada yerel kanat profili ile kanat ucunda bulunan açı olarak tanımlanmıştır. Rotor kanatlarında etkili akış rotasyon hızı ve rüzgâr hızından oluşur. En iyi kanat burulma değeri belirli bir uç hızı oranı için uygulanabilir.[3]

Her bir kesitteki atak açısı Kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine optimum oranını sağlayabilmek için ayarlanabilir.

3.3 Kord Uzunluklarının Optimize Edilme

Modern rüzgâr türbini tasarımında kord uzunluk dağılımı bir başka optimizasyon problemidir. Bu konuda kullanılan iki önemli teori vardır: bunlar Betz ve Schmitz teorileridir. Kord uzunluğunun belirlenmesi, bir sonraki bölümde detaylandırılacak

olan kanat elemanı momentum (KEM) yönteminin bir sonucudur. Sadece Betz'in KEM yöntemi açıklanacaktır.[3,5]

Betz's Kord uzunluk Dağılımı Teorisi[11]

$$C_{opt} = \frac{2\pi r}{N} \frac{8}{9C_L} \frac{U_D^2}{\lambda U_{rel}} \quad (3.12)$$

Schmitz's Kord uzunluk Dağılımı Teorisi

$$C_{opt} = \frac{16\pi r}{NC_L} \sin^2 \left(\frac{1}{3} \arctan \left(\frac{R}{\lambda r} \right) \right) \quad (3.13)$$

3.4 Optimum Aktüatör Disk Teorisi

$$dP = \Omega dQ = \Omega r \rho V (r\omega) (2\pi r dr) \quad (3.14)$$

Q, rotor torkudur. Burada, güç katsayısı hesaplanmadan önce aksel indüksiyon katsayıları tanımlanmıştır. Aksel indüksiyon faktörü, a, rotorda aşağı akım hızının rüzgâr hızına oranıdır ve dönme indüksiyon faktörüdür[2].

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3.15)$$

Güç katsayısı

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda (1-a) a' x^3 dx \quad (3.16)$$

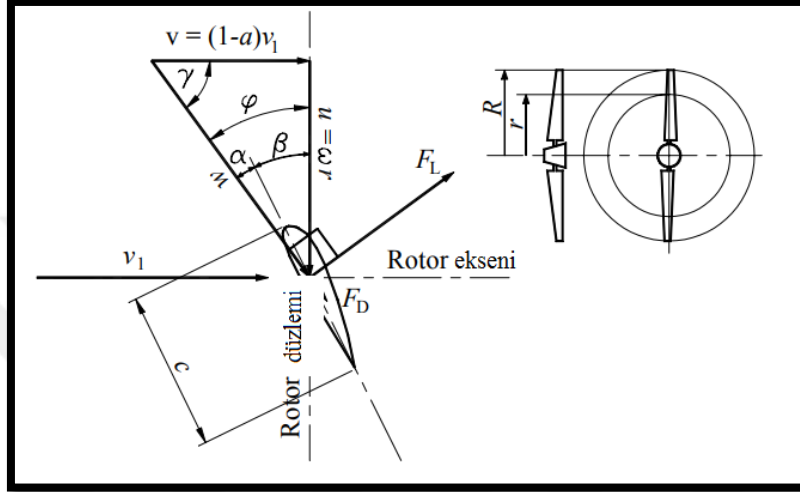
X yerel hız oranı olarak tanımlandığında:

$$x = \frac{r\Omega}{V} \quad (3.17)$$

Momentum denklemleri aşağıdaki gibidir

$$x = \frac{r\Omega}{V} \quad (3.17)$$

$$a'(1+a')x^2 = a(1-a) \quad (3.18)$$



Şekil 3.12 Rotor üzerindeki hız bağlantıları [9]

Akış, çevresel değişkenler olmaksızın dairesel akış tüplerinde tekdüze olarak kabul edilir. İki boyutlu akış kabul edilebilir. Dönüş düzleminde nispi rüzgâr vektörüne olan açının tanjantı için iki ifade, toplam indüklenen hızın görece hıza dik olması koşuluyla geliştirilebilir [2].

$$\tan(\phi) = \frac{(1-a)U}{(1+a')r\Omega} = \frac{(1-a)}{(1+a')x} \quad (3.19)$$

$$\tan(\phi) = \frac{a'r\Omega}{aU} = \frac{a'}{a}x \quad (3.20)$$

Dönme ve aksenal indüksiyon faktörleri arasındaki ilişki:

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (3.21)$$

$$x = (4a - 1) \sqrt{\frac{1 - a}{1 - 3a}} \quad (3.22)$$

Burada görülebilir ki en yüksek hız oranı, Betz'in sınırını belirleyecek olan $a = 1/3$ olduğunda elde edilir.

3.5 Betz Limit ve Betz Limitin KEM'e Etkileri

V hızda hareket eden bir hava kütesinin kinetik enerjisi

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (3.23)$$

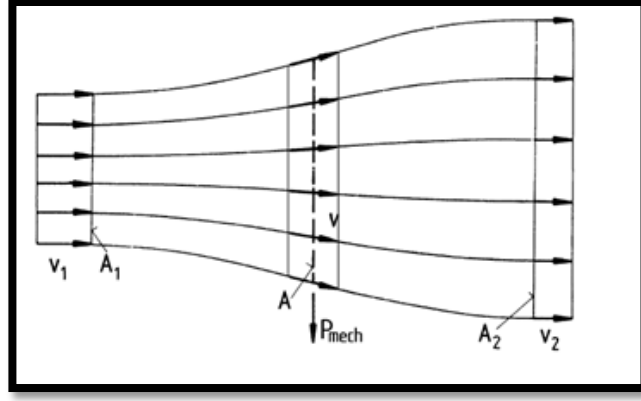
Havanın v hızı ile geçtiği belirli bir kesit alanı (A) düşünüldüğünde, belirli bir zaman birimi boyunca geçen hava hacmi (V), "akış hacmi" olarak adlandırılır [9]:

$$\dot{V} = vA \quad (3.24)$$

$$\dot{m} = \rho vA \quad (3.25)$$

Hareketli havanın kinetik enerjisini ve kütle akışını ifade eden denklemler, birim zaman başına A kesitinden geçen enerji miktarını verir. Bu enerji fiziksel olarak P gücü ile aynıdır[9]:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (3.26)$$



Şekil 3.13 Temel momentum teorisine göre, serbest akışta hava akışından mekanik enerjinin çekilmesine bağlı akış koşulları [3].

Burada V_1 havanın giriş hızı V_2 ise çıkış hızı; A_1 havanın giriş alanı A_2 ise çıkış alanıdır. Aradaki enerji farkı ise mekanik enerjiye dönüşmüştür.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 V_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 V_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 V_1^3 - A_2 V_2^3) \quad (3.27)$$

Süreklilik denklemi hatırlanırsa:

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \quad (3.28)$$

Böylece,

$$P = \frac{1}{2} \rho V_1 A_1 (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.29)$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.30)$$

Ancak, bu sonuç fiziksel olarak anlam ifade etmemektedir. Dönüşümün olduğu yerin arkasındaki çıkış hızı V_2 sıfır ise, o zaman dönüştürücüden önce giriş akış hızı sıfır olmalıdır, bu da dönüştürücüden daha fazla akış olmayacağı anlamına gelir. Beklendiği gibi, fiziksel olarak anlamlı bir sonuç, çıkarılabilir gücün maksimum seviyesine ulaştığı V_1 / V_2 'nin belirli bir sayısal oranından oluşur [3].

Bu, dönüştürücünün mekanik gücünü ifade eden başka bir denklem gerektirir. Momentumun korunum yasasını kullanarak, dönüşümün olduğu bölgenin üzerinde havanın uyguladığı kuvvet şu şekilde ifade edilebilir:

$$F = \dot{m}(V_1 - V_2) \quad (3.31)$$

$$P = FV = \dot{m}(V_1 - V_2)V$$

$$\frac{1}{2}\dot{m}(V_1^2 - V_2^2) = \dot{m}(V_1 - V_2)V \quad (3.32)$$

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (3.33)$$

Böylece kütle akışı şu şekilde olur

$$\dot{m} = \frac{1}{2}\rho A(V_1 + V_2) \quad (3.34)$$

Mekanik güç dönüştürünce:

$$P = \frac{1}{4}\rho A(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) \quad (3.35)$$

Etkileşimden önce rüzgârın gücü:

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho V_1^3 A \quad (3.36)$$

Dönüşümden çıkan mekanik gücün, bozulmamış hava akışının sahip olduğu güce oranı, "güç katsayısı" C_P olarak adlandırılır:

$$C_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)}{\frac{1}{2}\rho V_1^3 A} \quad (3.37)$$

Sadeleştirmeler yapıldıktan sonra güç katsayısı için V_2/V_1 'in bir fonksiyonu olduğu görülür

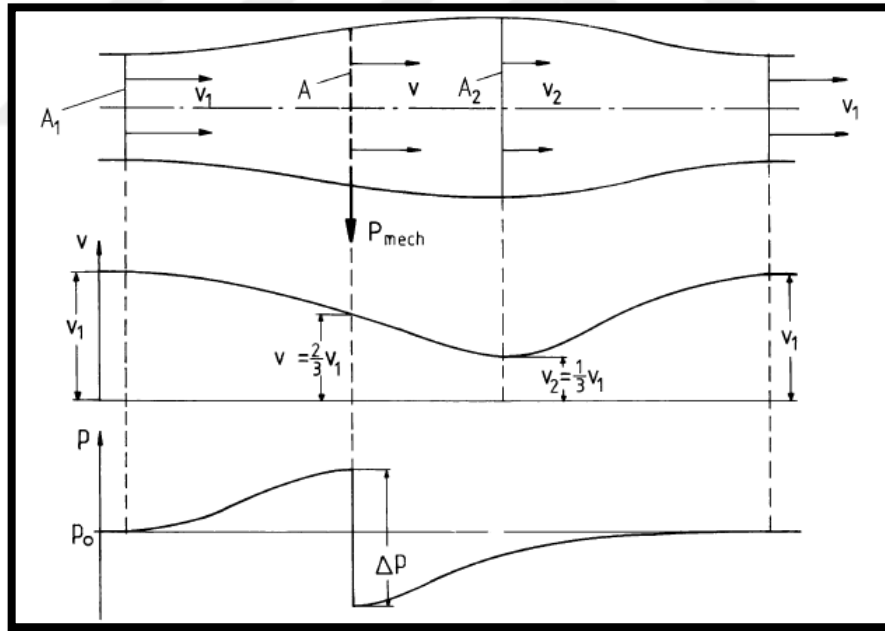
$$C_p = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \quad (3.38)$$

$$C_p = \frac{1}{2} [1 - a^2] [1 + a] \quad (3.39)$$

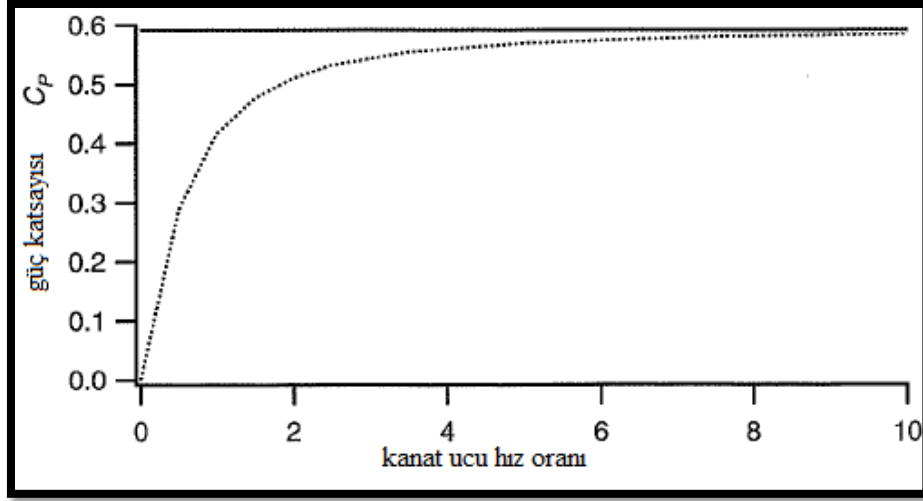
“a” aksenal indüksiyon faktörü değerinin en fazla 1/3 olabileceği göz önüne alındığında

$$C_p = \frac{16}{27} \quad (3.40)$$

Aşağıdaki şekilde güç ve hız değişimi görülebilir:



Şekil 3.14 Akış gücünün ideal disk şekilli bir enerji dönüştürücüsünden geçirilmesi ile mümkün olan en yüksek mekanik güç elde edilir[3]

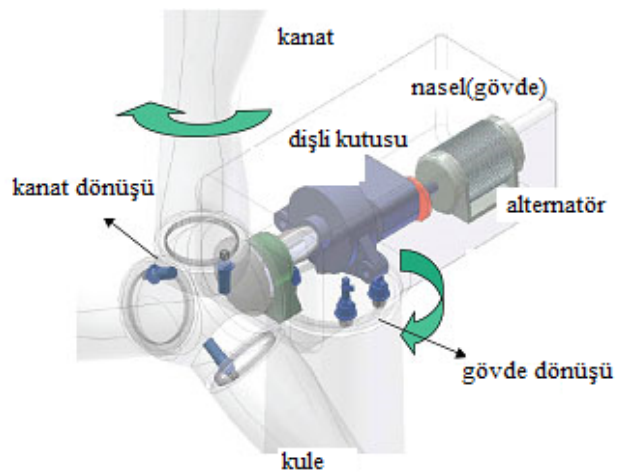


Şekil 3.15 Kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranına bağlı olarak değişen güç katsayısı (C_p) değeri

BÖLÜM 4

GÜÇ KONTROLÜ

Rotorun güç çıkışı, jeneratörün izin verilen maksimum gücü ile sınırlıdır. Ayrıca, yüksek rüzgâr hızlarında, rotor tarafından rüzgârdan çekilen güç, rotor yapısının tasarım gücü tarafından belirlenen sınırları aşabiliyor. Rotor hızını sabit bir değerde veya önceden belirlenmiş limitler dahilinde tutmak bir sorundur. Örneğin bir şebeke kesintisi sırasında alternatör torku aniden kaybolduğunda türbinin hasara uğramadan hayatta kalma sorunu ortaya çıkar. Böyle bir durumda, rotor hızı çok hızlı artar ve karşı önlemler hemen alınmadıkça türbinin yok olmasına neden olur. Bir rüzgâr türbininin rotoru, gücünü ve dönme hızını sınırlamak için aerodinamik olarak etkili bir yola sahip olmalıdır [5].



Şekil 4.1 Türbin kontrol sürücüleri

Rüzgâr türbinine gelen rüzgârın hızı belirli bir seviyeyi aştığı zaman kanat dönüşü kontrol için devreye girer ve kanatları çevirerek rüzgârdan kaçtırmaya başlar, eğer rüzgâr hızı türbinin devreden çıkma hızını da geçerse kanat dönüş kontrolü rüzgâr türbini kanatlarını, kanat üzerine minimum yük gelecek şekilde çevirir ve bu sayede güç kontrolü sağlanmış olur. Ayrıca kanat dönüş kontrolüne ek olarak gövde dönüş kontrolü de söz konusudur, gövde dönüş kontrolü esasen rüzgâr türbinini rüzgârın geldiği yöne dönmesini sağlar ancak bazı durumlarda türbinin güç kontrolü içinde devreye girebilir[10].



WEIBULL PARAMETRELERİ İLE YILLIK ÜRETİM HESAPLAMA

Q-Blade bilgisayar programının kılavuzunda, türbin yıllık veriminin, WEIBULL dağılımının iki parametresi olan k ve A (Marten ve Wendler, 2013) aracılığıyla yıllık bir rüzgâr hızı dağılımı belirtilerek hesaplandığı açıklanmaktadır. Bir rüzgâr hızının meydana gelme olasılığı[15]:

$$h_{W(V_0)} = \frac{k}{A} \left(\frac{V_0}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V_0}{A} \right)^k \right) \quad (5.1)$$

V_i ve V_{i+1} arasında bir rüzgâr hızının varlığı olasılık $f(V_i < V_0 < V_{i+1})$

$$f(V_i < V_0 < V_{i+1}) = \exp \left(- \left(\frac{V_i}{A} \right)^k \right) - \exp \left(- \left(\frac{V_{i+1}}{A} \right)^k \right) \quad (5.2)$$

Böylece yıllık enerji üretimi şu şekilde hesaplanır:

$$AEP = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} (P(V_{i+1}) + P(V_i)) \cdot f(V_i < V_0 < V_{i+1}) \cdot 8760 \quad (5.3)$$

Seçilen artımlı adım büyüklüğü ile bir dizi rüzgâr hızı üzerinde bir türbin simülasyonu gerçekleştirilir. Türbinin belirtilen dönme hızına bağlı olarak, her rüzgâr hızı için bir kanat ucu hızı oranı hesaplanır. Daha sonra hesaplanan uç hızı üzerindeki bir KEM simülasyonu, bir rotor simülasyonuna eşdeğerdir [11].

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI (HAD)

Rüzgâr türbini rotorlarının performansı nümerik akış analizi ile hesaplanabilir, ayrıca bu analizler hesaplamalı akışkan dinamiği olarak da bilinir. Temel ilke, incelenecek bir nesnenin etrafındaki tüm alanın küçük hacim elemanlarına bölünmesi ve her birim hacimdeki unsurlardaki akış durumlarının belirlenmesi ve birleştirilmesidir [12].

Bu nümerik akış simülasyonunda, Euler hareket denklemleri, genellikle sürtünmesiz olduğu düşünülen akış kısmının matematiksel temelini oluşturur ve Navier-Stokes denklemleri, yapının sınır tabakasına yakın olan akış için temel oluşturur. Süreklilik denklemleri (kütlenin korunumu), momentum korunumu yasası (kuvvetler dengesi) vb. gibi temel fiziksel denklemler, hacim elemanlarındaki üç eksen doğrultusunda düzenlenir. Atalet kuvvetleri, sürtünme ve basınç ile dış kuvvetlerin etkileri arasındaki ilişkiyi tanımlar. Kısmi diferansiyel denklemler sistemi yinelemeli olarak çözümlenir ve sonuçlanır. Akış durumunun laminar mı yoksa türbülans mı olduğu önemlidir. Özellikle hangi akış etkilerinin ele alınabileceğine karar veren seçilmiş türbülans modelidir [3].

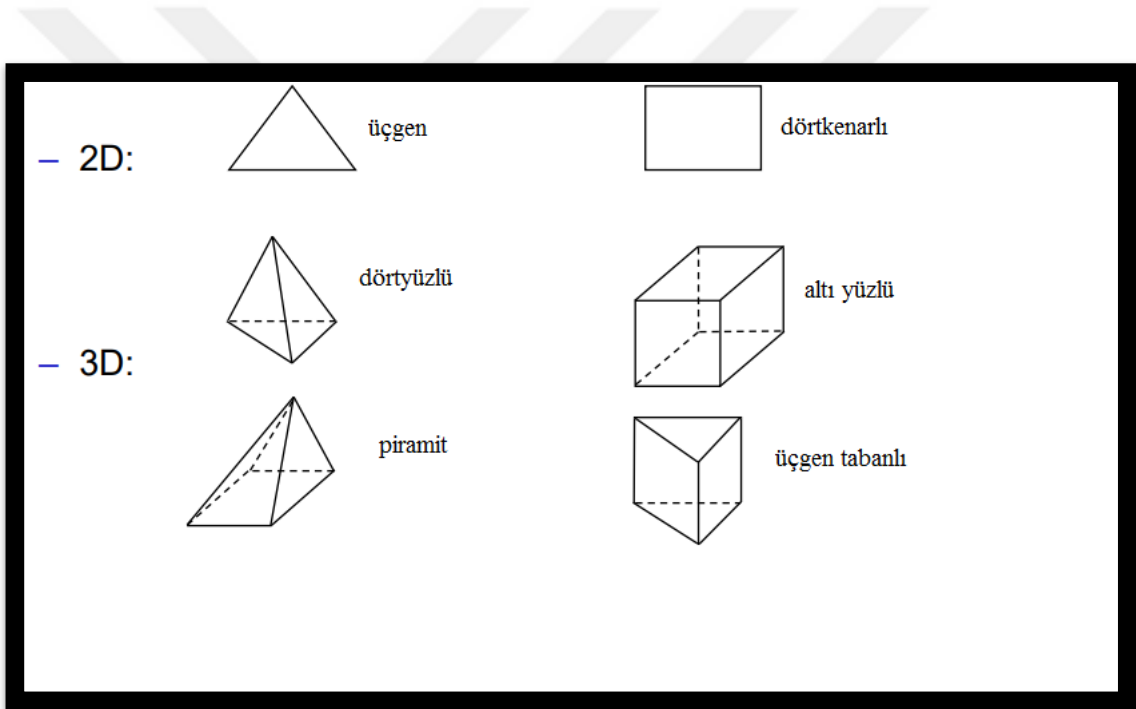
HAD metodu sadece hız, basınç ve sıcaklık gibi akış parametrelerini değil, aynı zamanda kuvvet dağılımını da belirler. Bu ayrıntılı yöntemler, temel tasarımı bulmak için tasarım sürecinin ilk kısmında uygulanabilecek basitlikte yöntemler değildir. Karmaşık akış süreçlerinin ayrıntılı analizinde ve karmaşık akış durumlarını şekillendirme konularında gündeme gelirler . Bu analiz ile elde edilen bulgular,

temel tasarımı iyileştirmek ve optimize etmek için kullanılabilir[3]. Bu alanda çeşitli bilgisayar yazılımı mevcuttur. Bu tezde Acuconsole kullanılmıştır.

6.1 Akış Alanı ve Ağ Yapı

Bir rüzgâr türbini için, rotorun periyodik hareketini simüle etmek için periyodik akış alanlarına ihtiyaç vardır. Akış alanlarının boyutları, akıştaki değişikliklerin gözlenmemesi için yeterince büyük olmalıdır.

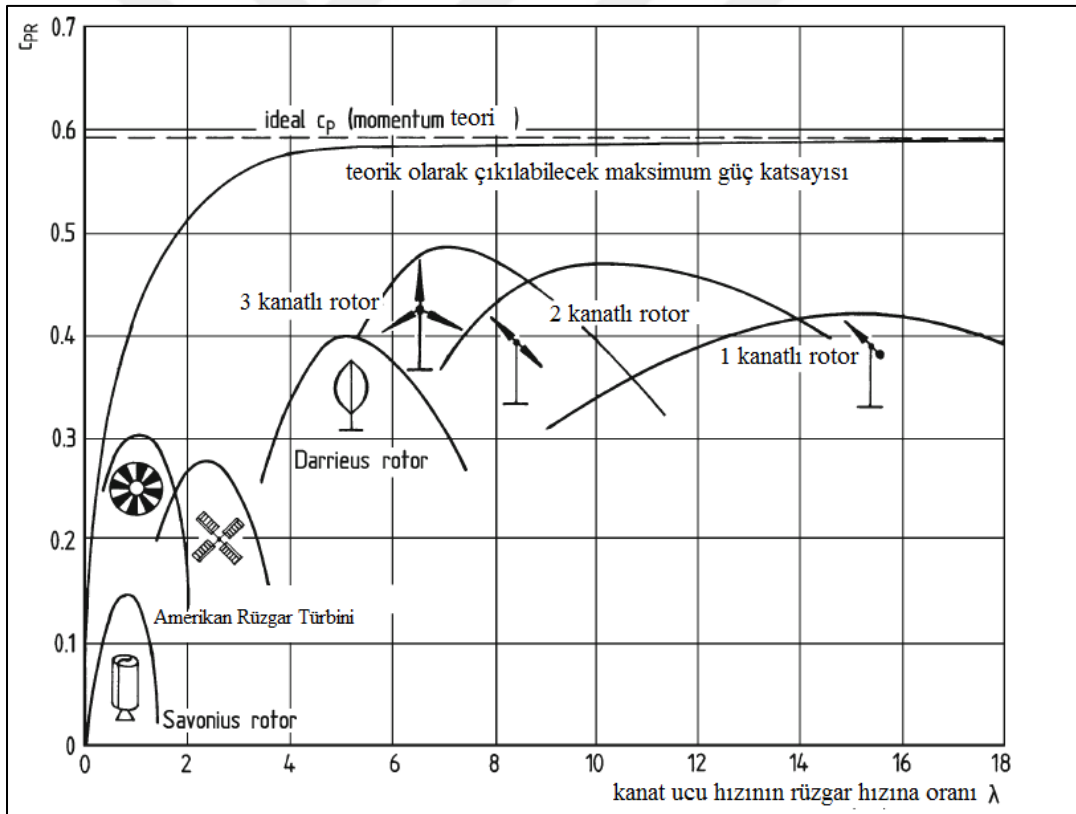
Farklı düğüm sayıları ile farklı ağ geometrileri vardır. Birçok farklı ağ, eleman ve örgü türleri mevcuttur. Hangi tür eleman kullanılacağı, probleme ve kullanılacak programın çözebilme kapasitesine bağlıdır. Tipik ağ şekilleri:



Şekil 6.1 Ağ geometrileri

1.2 MW MODERN RÜZGÂR TÜRBİNİ

Yatay eksen rüzgâr türbinlerinin (YERT) tercih edilmesinin nedeni, tüm rüzgâr türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırıldığı Şekil 7.1’de görülebilir.



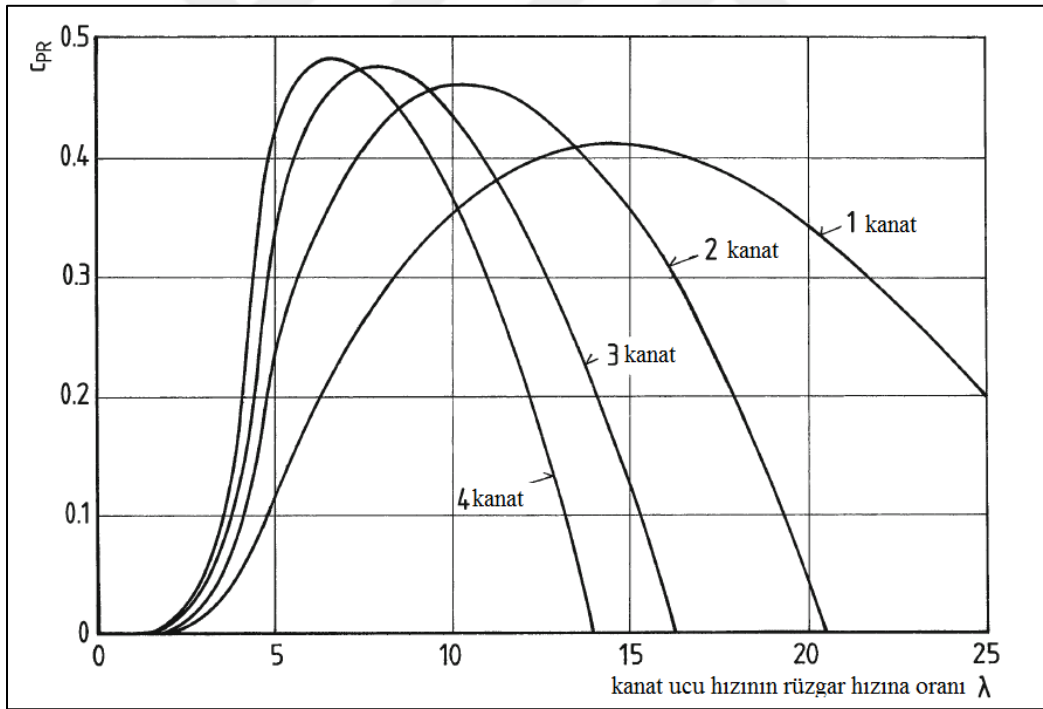
Şekil 7.1 Farklı Rüzgâr Türbinlerine Ait Güç Katsayıları

Bazı parametreler problemin başında belirlenmeli veya varsayılmalıdır. İlk olarak nominal güç 1,2 MW enerji üretimi ve nominal rüzgâr hızı 10 m/s olarak belirlendi. Genellikle, bu ölçekteki rüzgâr türbinlerinin devreye girdiği rüzgâr hızı 3 m/s ve

devreden çıkma rüzgâr hızı 20 m/s'dir. Diğer taraftan, bu büyüklükteki rüzgâr türbinlerinin yapısal anlamda hasara uğramadan dayanabileceği maksimum rüzgâr hızı 50 m/s - 65 m/s aralığındadır.

7.1 Kanat Sayısı

Kanat sayılarındaki artış rüzgâr türbinin ürettiği enerjinin artmasına neden olur, bu doğru bir yaklaşımdır. Bir kanatlı rüzgâr türbinleri ile iki kanatlı rüzgâr türbinleri arasında %10 oranında enerji üretim miktarında artış gözlemlenmektedir. İki kanatlı rüzgâr türbinleri ile üç kanatlı rüzgâr türbinleri arasında da % 3 ila 5 arasında enerji üretim artışı gözlemlenmektedir. Kanat sayısı dörde çıktığında enerji üretimindeki artış %1 mertebelerinde gözlemlenmektedir ancak kanat sayısının dörde çıkınca ortaya çıkan maliyet ile enerji üretimindeki artış miktarı birbirini karşılayamamakta ve dördüncü kanat durumu fizibil olmaktan çıkarmaktadır[3].



Şekil 7.2 Yatay Eksen Rüzgâr Türbinlerindeki Güç Katsayılarının Farklı Sayıdaki Kanat Miktarına Göre Değişimi

3 kanatlı rüzgâr türbini için yaklaşık % 50 olacak bir güç verimliliği (C_p) değeri alıyoruz. Daha sonra, gerçek C_p hesaplanacaktır.

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho U_w^3 A_R$$

$$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3 :$$

$$1.2 \times 10^6 \text{ W} = 0.5 \frac{1}{2} (1.22) 10^3 A_R$$

$$A_R = 3934 \text{ m}^2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$d = 70.7 \text{ m}$$

Gerekli rotor çapı 70.7 m olarak hesaplanmıştır. Ancak, % 2-3 alternatör kaybı ve % 2-3 mekanik kayıp düşünüldükten sonra, rotor çapının 75m mertebesine çekilmiştir.

$$R = 37.5 \text{ m}$$

3 kanatlı yatay eksen rüzgâr türbinlerinin maksimum C_p değerine karşılık gelen kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranı olan TSR değeri 7-8 arasındadır. Rotorun açısal hızı Ω denklem 2.1'den $\lambda = 8$ için hesaplanmıştır.

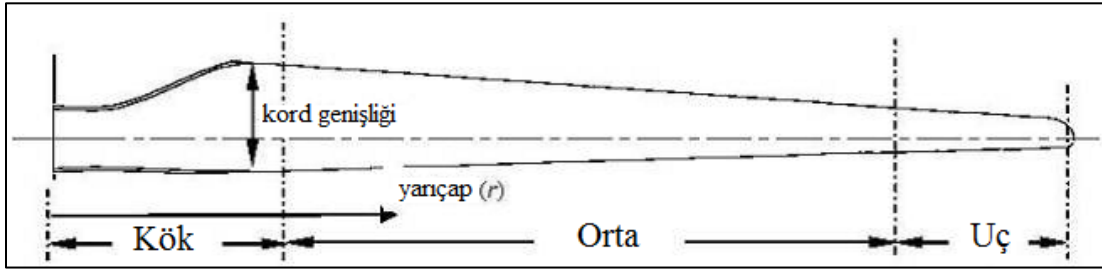
$$8 = \frac{\Omega \cdot 37.5 \text{ m}}{10 \text{ m/s}}$$

$$\Omega = 2.1333 \text{ rad/sec}$$

Belirli bir yarıçaptaki göreceli rüzgâr hızı $U_{rel} = \sqrt{(2.1333r)^2 + 10^2}$ şeklinde hesaplanır.

7.2 Yatay Eksen Rüzgâr Türbinleri İçin Kanat Profilleri

Eğer ki tek bir kanat profili kullanıp kanat tasarımı yapılmak istenirse bu kolay bir işlem olur ancak bu şekilde bir tasarım söz konusu olursa maksimum güç üretiminden ve yapısal anlamdaki dayanımdan çok da fazla söz edilemez. Bu sebeple kanat tasarımı söz konusu olduğunda kanadın farklı bölgeleri için farklı kanat profilleri kullanılmalıdır. Bu kanat profilleri kanadın kök, orta ve uç bölgeleri için farklılık arz etmektedir.

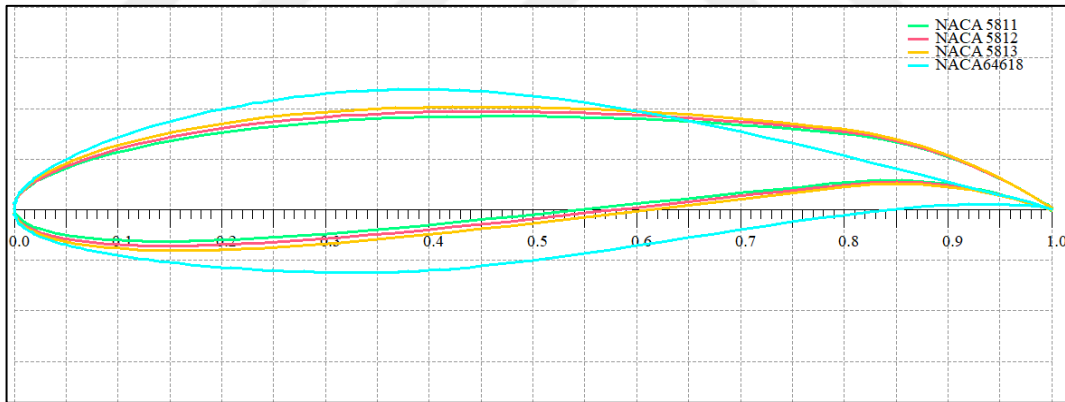


Şekil 7.3 Kanat bölümleri

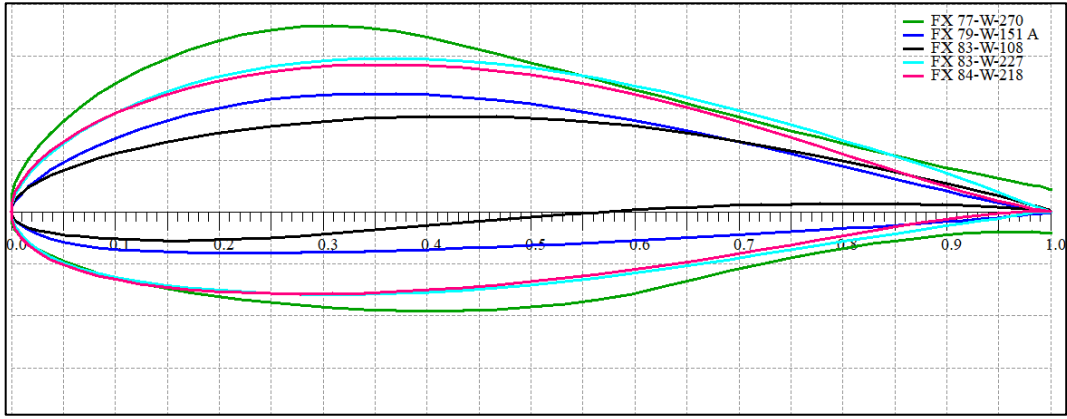
Ayrıca farklı kanat profilleri arasındaki geçişlerde geçişleri kolaylaştırmak için benzer kanat profilleri seçilmesinde fayda vardır. Uç bölgesi kanat profillerinin en yüksek C_L / C_D oranına sahip olması gerekirken, kök bölgesinde daha yüksek bir atalet momenti gibi daha yüksek yapısal özelliklere sahip kanat profilleri seçilmeli ve daha yüksek bir kalınlığa sahip olmalıdır.

Kanat profil parametreleri, Drela'nın formülasyonu izin verdiği ölçüde -10° ila 20° arası bir dizi atak açısında hesaplanır. Birçok kanat profili, geniş bir seçim yelpazesinde karşılaştırmak için hesaplanır. QBlade v.0963 programı kullanılmıştır.

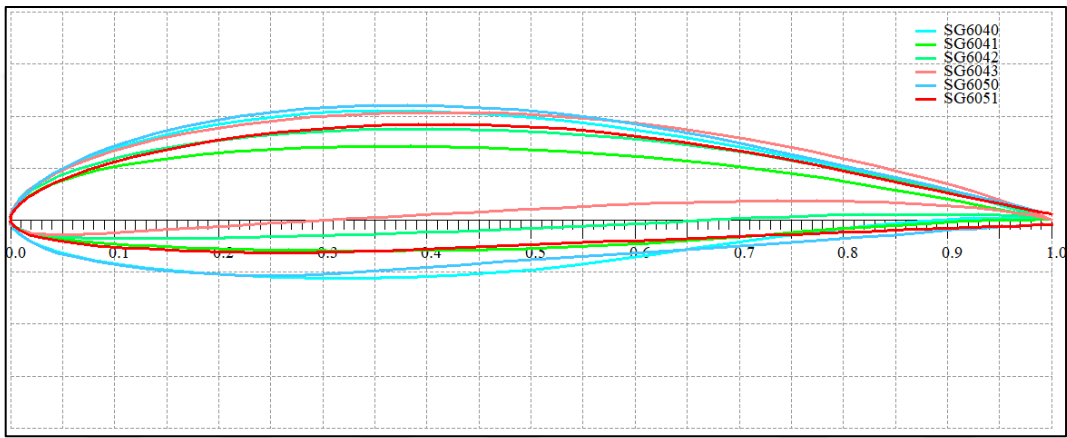
Bu tasarımda göz önünde bulundurulmuş kanat profilleri:



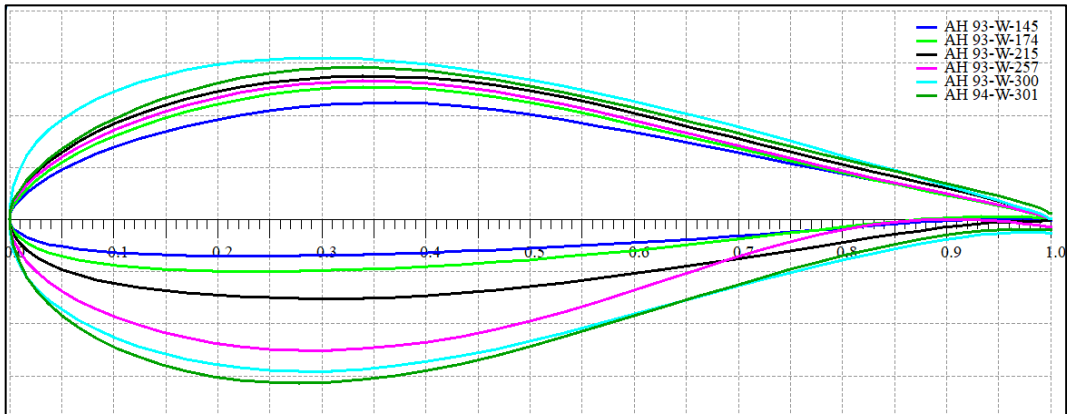
Şekil 7.4 NACA kanat profilleri



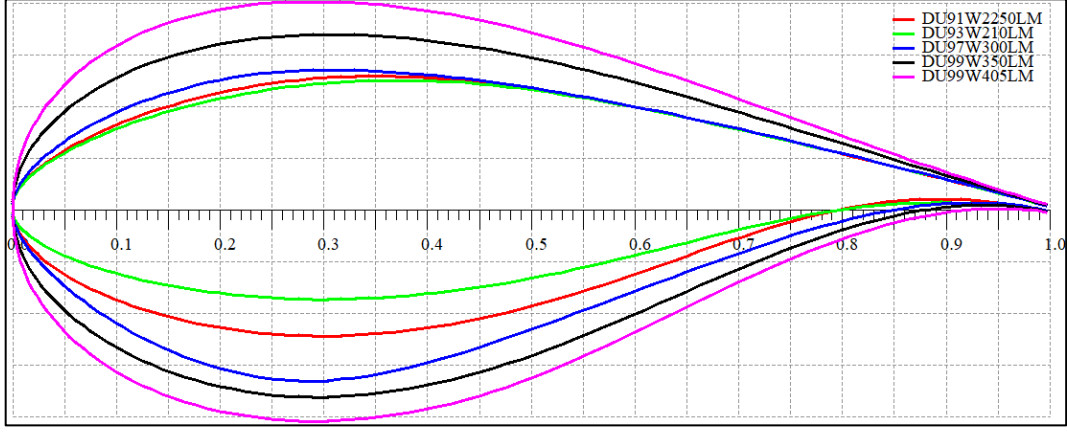
Şekil 7.5 FX (Wortmann) kanat profilleri



Şekil 7.6 SG (Selig / Giguere) kanat profilleri



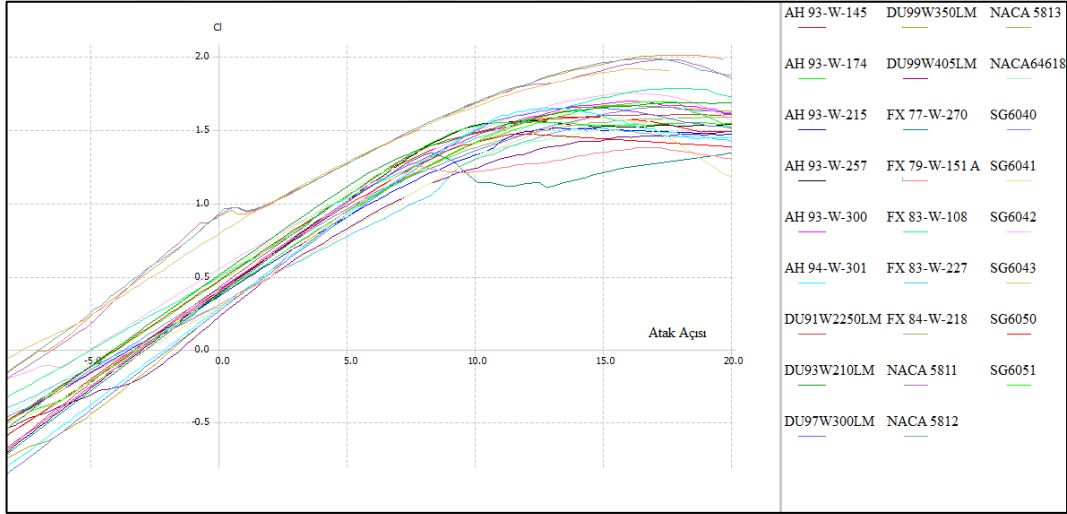
Şekil 7.7 Althaus, AH kanat profilleri



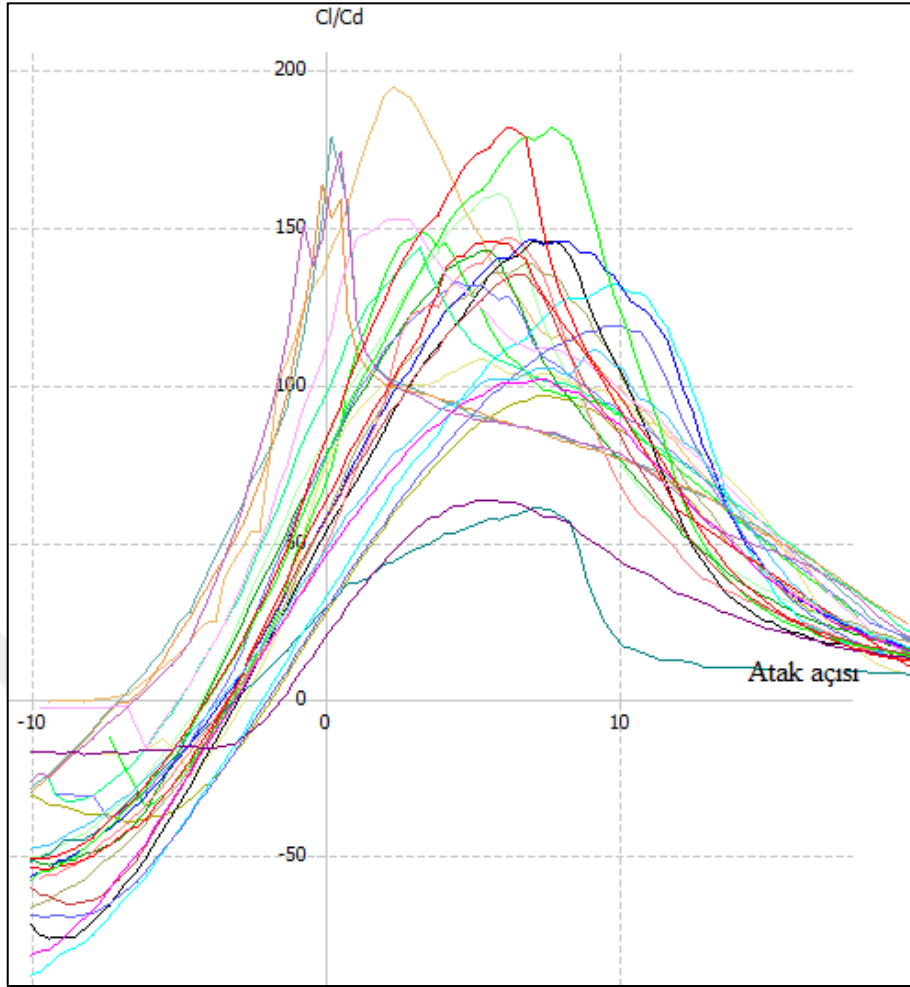
Şekil 7.8 Delft Üniversitesi, DU Kanat Profilleri

Büyük boyutlu rüzgâr türbinleri için Reynolds Sayıları 1 ila 5 milyon arasında değişmektedir.

Yukarıdaki tüm kanat profillerinin $Re = 2 \times 10^6$ ile çözümü sonucunda atak açısına karşılık gelen C_L / C_D değerleri tek bir grafikte toplanmıştır. Kanat profillerinin kalınlıklarının ve şekillerinin C_L/C_D değerlerini nasıl etkilediğini görmek için tek bir Reynolds sayısında çözümlenmeler yapılmıştır.

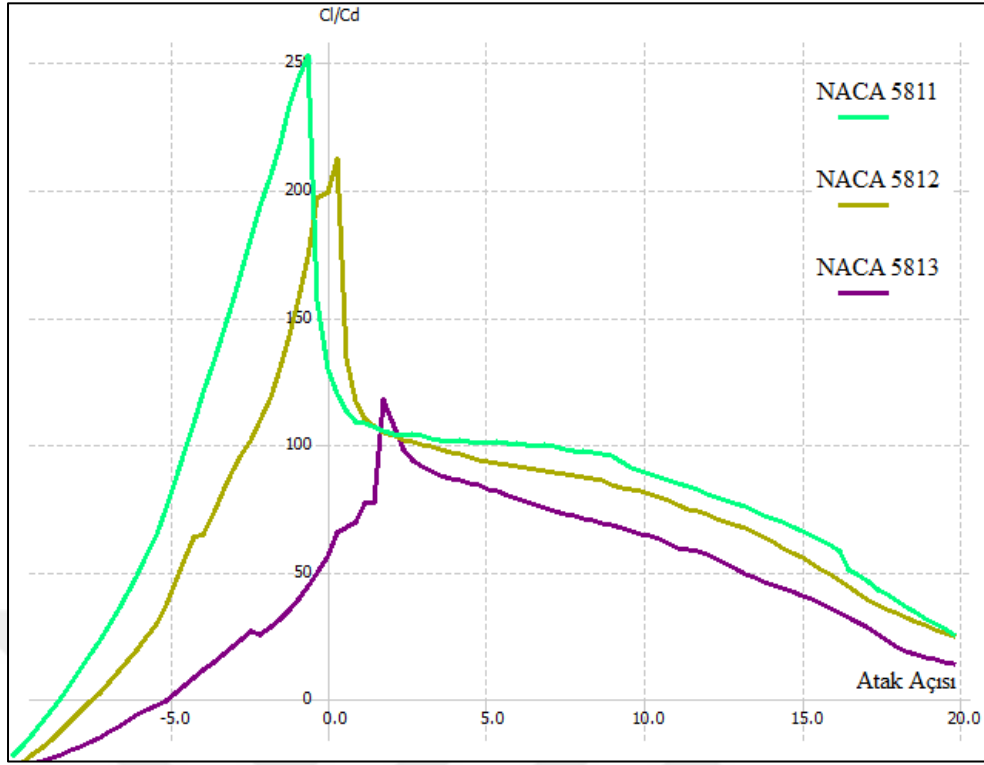


Şekil 7.9 Kaldırma kuvvet katsayısı, C_L ve atak açısı, alpha



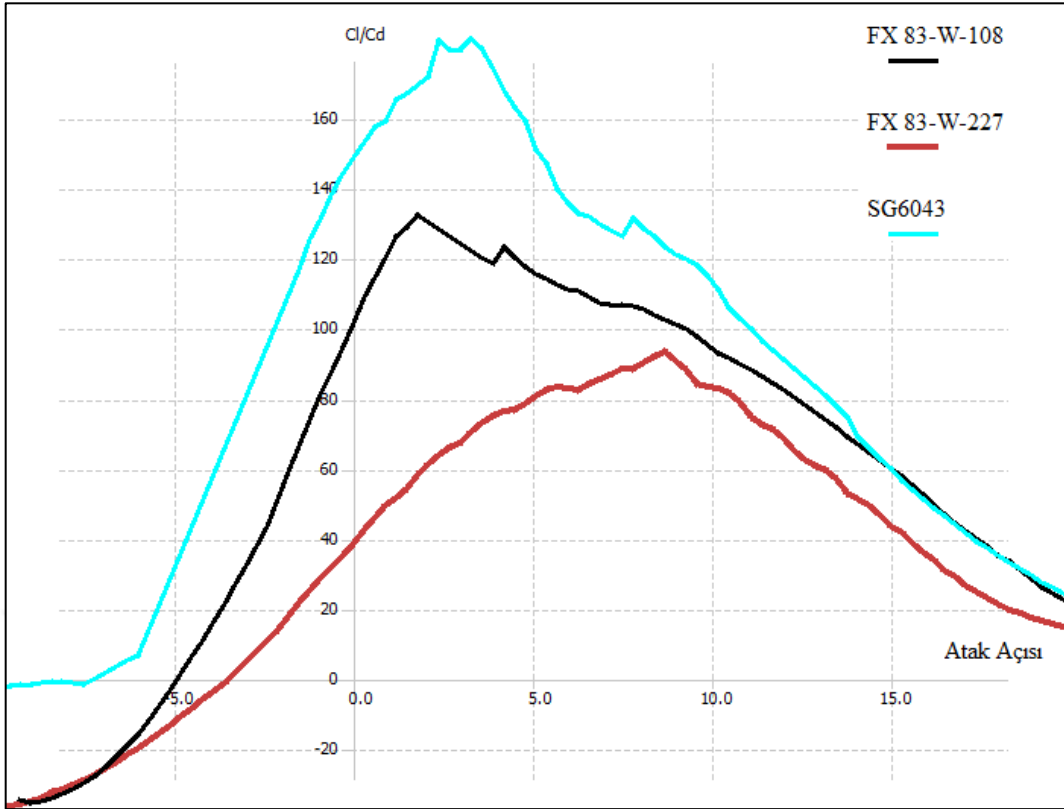
Şekil 7.10 C_L/C_D oranı ve atak açısı

İnce kanat profillerinin aerodinamik performansının son derece yüksek olduğu ve kanat profilinin büyüdükçe performansının azaldığı görülmüştür. Örnek olarak verilen NACA kanat profillerini ele alalım. NACA 5811-5812-5813'den oluşan bir kanat yüksek bir güç çıkışına sahip olacaktır. Kanat profil kutuplarının NACA 5811'in uç bölgesi, NACA 5812'nin orta bölge olduğu ve NACA 5813'in kök bölge için uygun kanat profilleri olduğu gerekçesiyle farklı Reynold sayılarında yeniden hesaplanması gerekecektir. Tüm kutupsal hesaplamalarda Reynolds sayıları aşağıdaki gibi kullanılır: Uç bölge $Re = 10^6$, birincil bölge $Re = 2.5 \times 10^6$ ve kök bölgesi $Re = 4 \times 10^6$ 'dir.

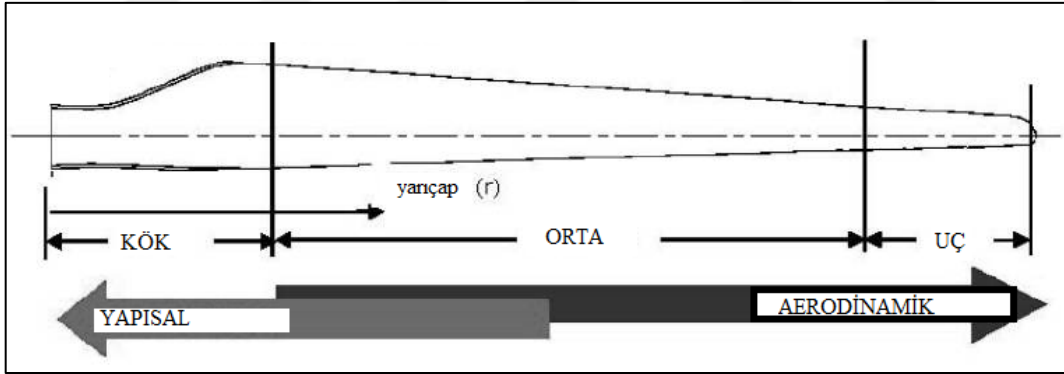


Şekil 7.11 NACA kanat profillerinin C_L/C_D oranlarına karşılık gelen atak açıları

Aynı zamanda, FX ve SG gibi kanat profil ailelerinden de seçim yapabiliriz, kökte FX 83-W-227, ortada FX 83-W-108 ve SG6043'ün uç bölgesinde olduğu gibi diğer kanat profil ailelerinden de seçim yapabiliriz.



Şekil 7.12 FX 83-W-108/227, SG6043 kanat profilleri C_L/C_D oranı vs atak açısı



Şekil 7.13 Kanattaki bölgelerin performans özellikleri

Kanat tasarımında kullanılan kanat profillerinden kanadın kök kısmına yakın olanlarda yapısal anlamda mukavemete sahip olması beklenir, bu bölgelerde aerodinamik performans açısından fazla bir beklenti yoktur. Kanadın gövde ve uç kısımlarında ise aerodinamik performansı yüksek olan kanat profillerinin tercih edilmesi beklenmektedir.

Çizelge 7.1 Farklı kanat profil konfigürasyonlu kanatlar

Kök	Orta Kısım	Uç
DU 99-W-350LM	DU 93-W-210LM	NACA 64618
DU 99-W-350LM	DU 91-W-2250LM	AH 93-W-145
DU 99-W-350LM	DU 91-W-2250LM	NACA 64618
DU 99-W-405LM	DU 93-W-210LM	NACA 64618
AH 93-W-257	AH 93-W-257	NACA 64618
AH 93-W-257	AH 93-W-257	AH 93-W-145
DU 93-W-210LM	DU 93-W-210LM	AH 93-W-145
DU 91-W-2250LM	DU 91-W-2250LM	AH 93-W-145
DU 91-W-2250LM	AH 93-W-257	NACA 64618

Bir adet de 4 kanat profilli kanat örneği aşağıda verilmiştir.

Çizelge 7.2 Dört kanat profilli kanat örneği

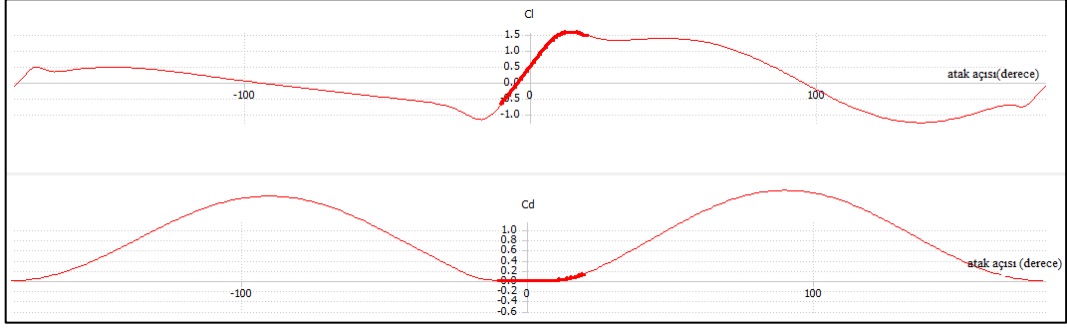
Kök	Orta Kısım	Uç
DU 97-W-300LM	DU 91-W-2250LM DU 93-W-210LM	NACA 64618

NACA 64618, rüzgâr türbini uygulamalarında kanat uçları için özel olarak kullanılır.

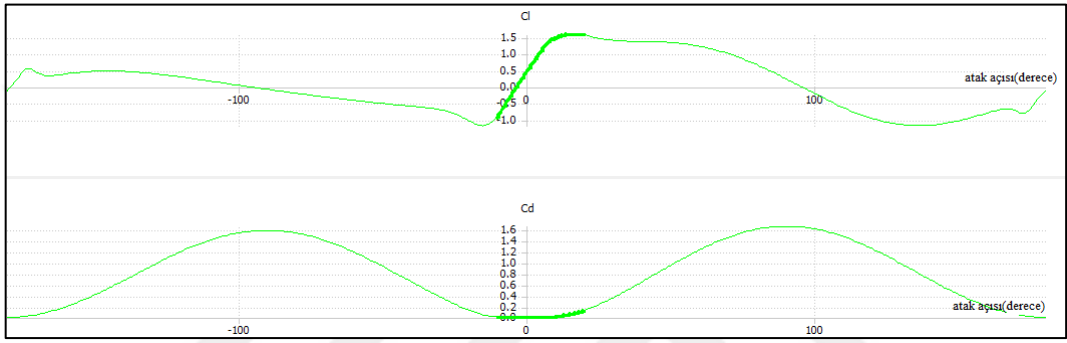
AH 93-W-145, daha iyi bir performans için olası bir aday olarak değerlendirildi.

7.2.1 360° Polar Ekstrapolasyon

Polar değerler -10 ile 20 derece arasında bir atak açısı için hesaplandıktan sonra, kalanlar Viterna ya da Montgomerie Yöntemleri ile tahmin edilir. Montgomerie yöntemi, daha büyük ölçüde sürekli bir ekstrapolasyona sahip olduğu için rüzgâr türbini kanatlarının çoğunda daha uyumlu görünmektedir.



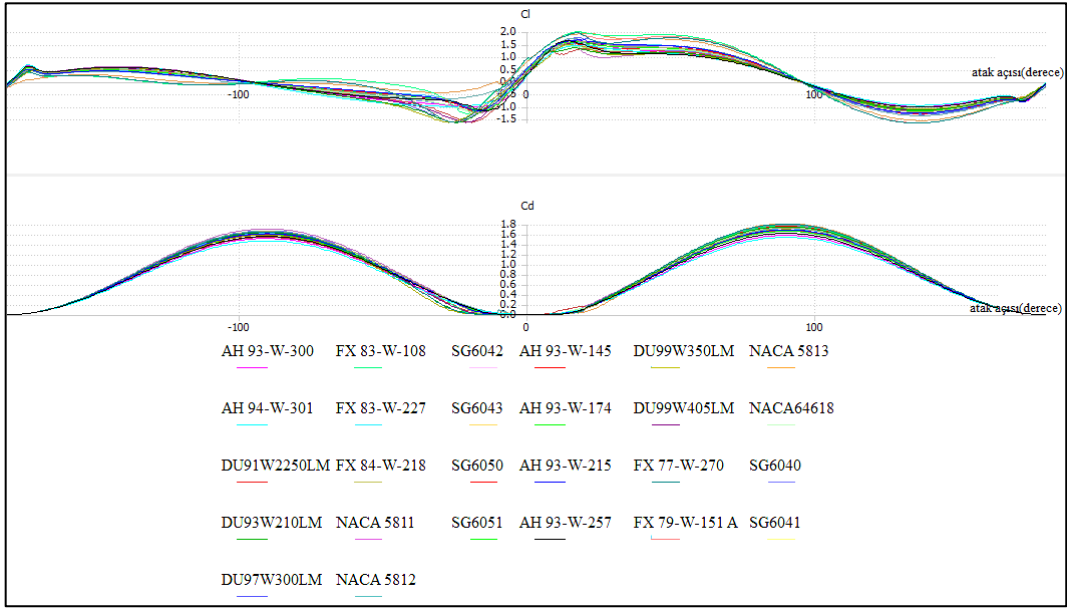
Şekil 7.14 AH 93-W-145 C_L ve C_D değerlerinin 360° ekstrapolasyonu.



Şekil 7.15 DU 91-W-2250, C_L ve C_D değerlerinin 360° ekstrapolasyonu

Tüm kanat profillerini polarları tahmin edildikten sonra, 360° polarlar bir sonraki şekilde gösterildiği gibi olmuştur.

360° polar, bir kanat profilinin dönme merkezinden 360° döndürülmesi süresince kanat profili üzerine gelen yükün belirlenmesidir.

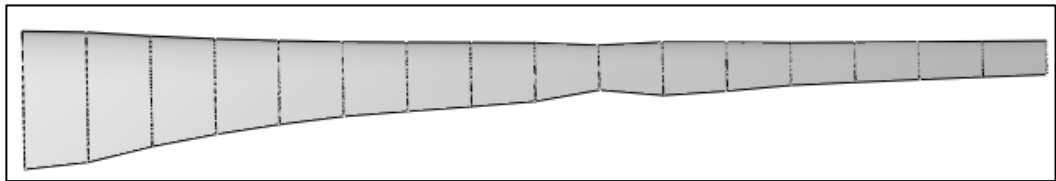


Şekil 7.16 Kanat Profillerinin, C_L ve C_D değerlerinin 360° ekstrapolasyonu

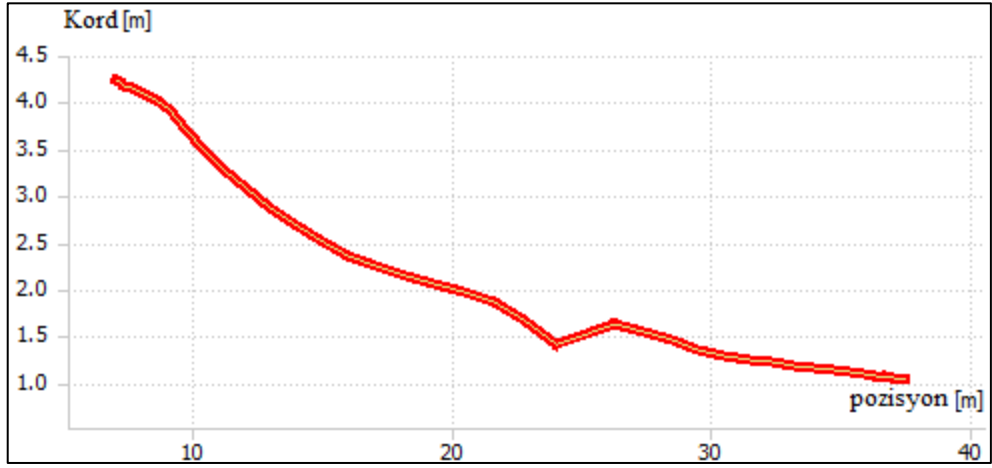
7.3 Kord Dağılımı

İlk 7 m rotor yarıçapı, rüzgâr türbininin burun bölümünden ilk kanat profiline geçiş bölümü olarak ayrılır. QBlade, kanat bölümlerini $r = 7$ m'den $r = 37.5$ m'ye kadar düzenlemek için kullanılır. Bölümler manuel olarak yerleştirilir. Kord uzunluk dağılımı ve daha sonra burulma açıları verilir. Kanat DU 91-W-2250LM / AH 93-W-257 / NACA 64618 bir örnek olarak verilmiştir:

İlk olarak, kord uzunlukları Schmitz teorisi ile optimize edilmiştir:

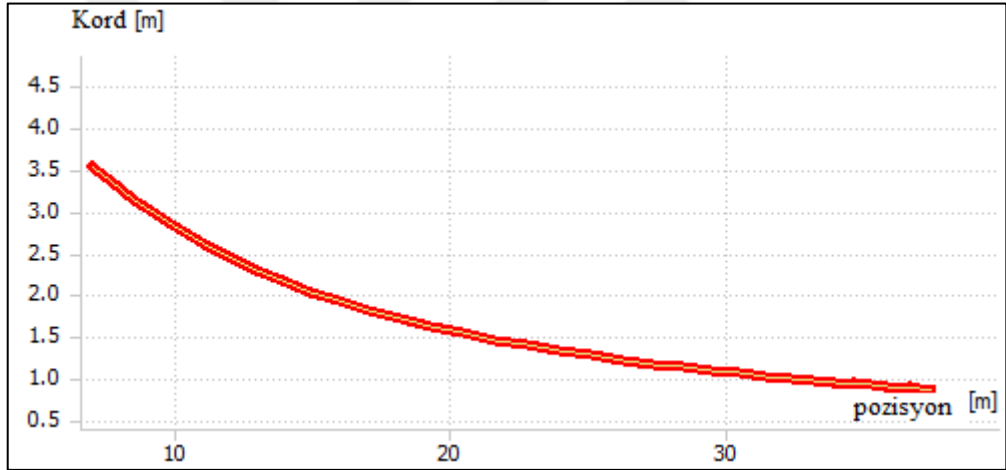


Şekil 7.17 Schmitz kord dağılımı kanat DU 91-W-2250LM/ AH 93-W-257/ NACA 64618



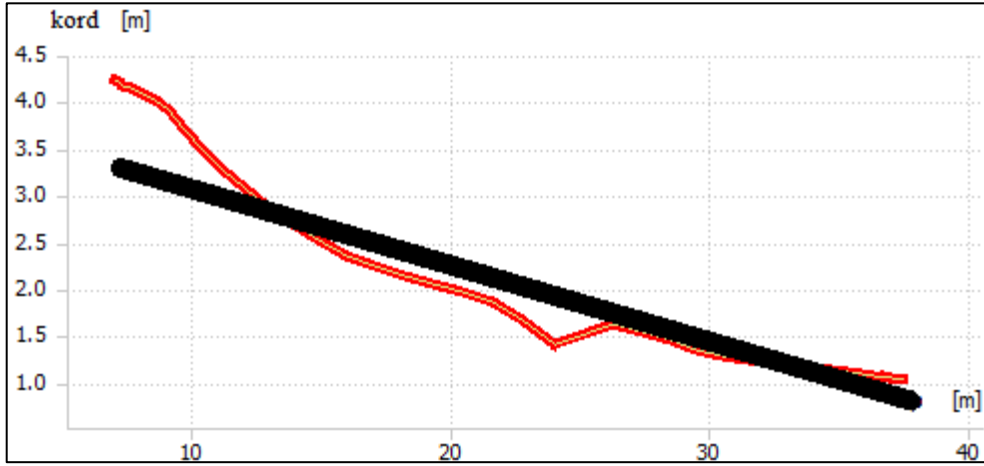
Şekil 7.18 Schmitz dağılımının radyal pozisyona göre değişimi

Şekilde gösterilen kord uzunluğu dağılımı, üretim ve yapı bütünlüğü için uygun değildir. Tek bir kanat profili olsaydı, aşağıdaki Şekilde gösterildiği gibi daha iyi bir kord dağılımı olurdu.



Şekil 7.19 Schmitz' kord dağılımı tek bir kanat profilinden oluşan kanat için DU 99-W-350LM.

Bu tek kanat profili ile tasarlanan kanatta kord dağılımı çok pürüzsüz olmasına rağmen, üreticiler tarafından tavsiye edilmez ve üretilmez. Bu dağılımın bir sonraki şekilde gösterildiği gibi Schmitz teorisi üzerinde doğrusallaştırılmasının nedeni budur.

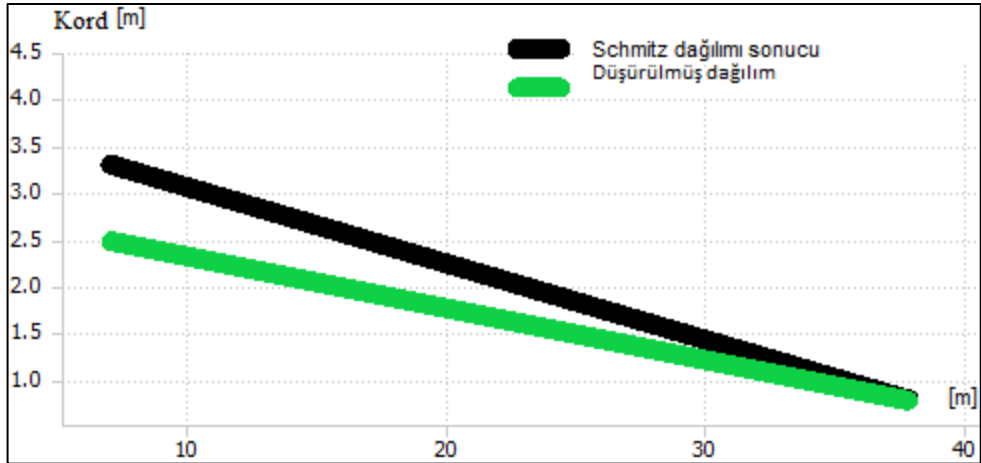


Şekil 7.20 Schmitz' kord dağılımının linearizasyonu.

Bu dağılım kord dağılımının son versiyonu değildir. Endüstriyel gereklilikler gereği bu tasarımda en geniş kord uzunluğu 2,5 metre olmak zorundadır .



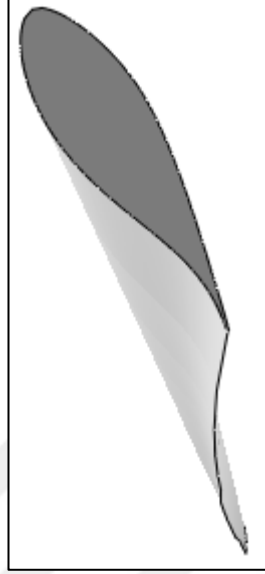
Şekil 7.21 Kord dağılımı lineerleştirilmiş DU 91-W-2250LM/ AH 93-W-257/ NACA 64618 kanadı



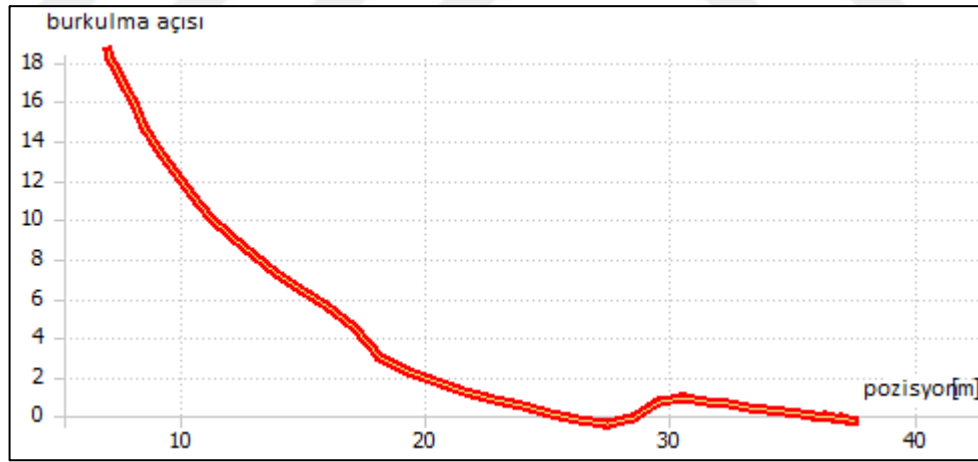
Şekil 7.22 Schmitz dağılımı ile linearizasyonu yapılmış kanadın daraltılması

7.4 Burulma Açısı Dağılımı

Burulma açısı, optimum kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına oranıyla belirlenir.

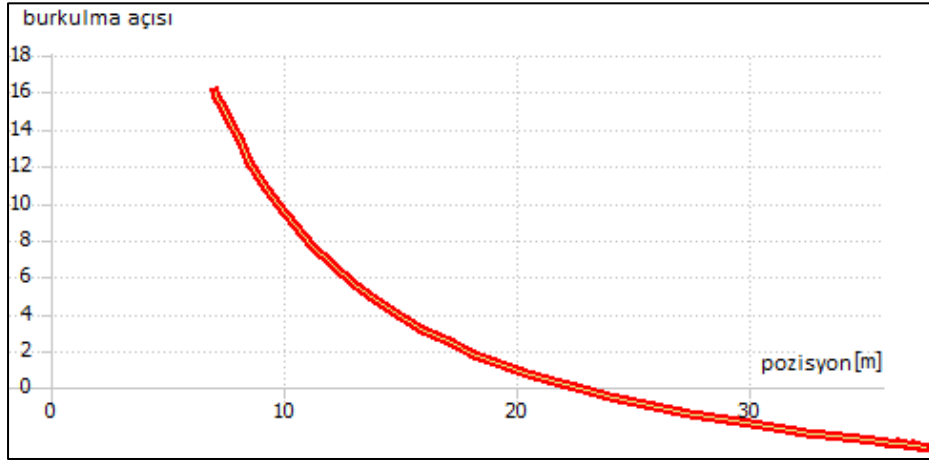


Şekil 7.23 Burulma Açısı DU 91-W-2250LM/ AH 93-W-257/ NACA 64618 kanadı için



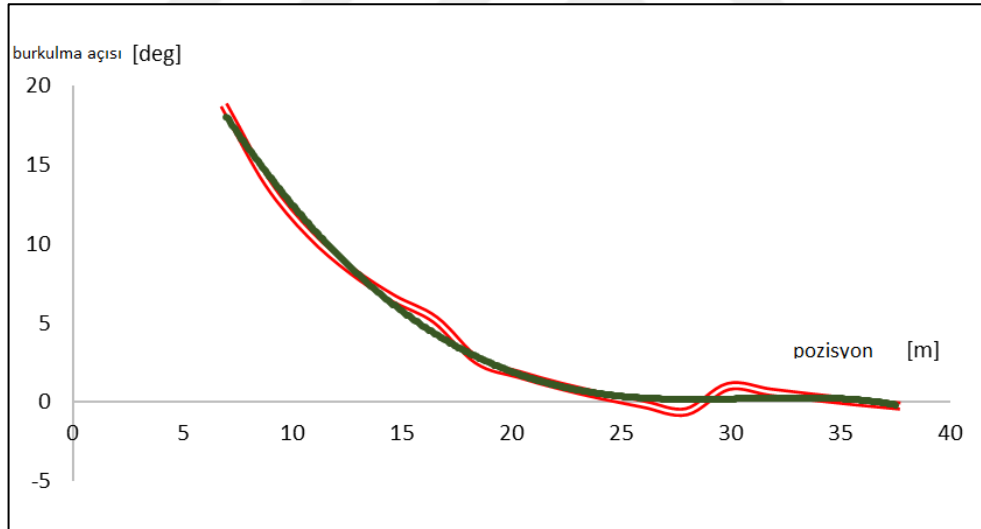
Şekil 7.24 Burulma açısının grafiksel gösterimi DU 91-W-2250LM/ AH 93-W-257/ NACA 64618 kanadı için

Şekilde gösterilen burulma açısı dağılımı, üretim ve gürültü açısından uygun bir varyasyon değildir. Tek bir kanat profili olsaydı, aşağıdaki Şekilde gösterildiği gibi daha iyi bir burulma dağılımı olurdu.



Şekil 7.25 Tek kanat profili kullanılan kanattaki burulma açısı DU 99-W-350LM

Bu büküm açısı dağılımı, imalat ve gürültü azaltma açısından kabul edilebilir. Bu nedenle, bir sonraki resimde bıçak DU 91-W-2250LM / AH 93-W-257 / NACA 64618 için benzer bir dağılım yaklaşımı yapılır.



Şekil 7.26 Ortalama burulma açısı dağılımı DU 91-W-2250LM/ AH 93-W-257/ NACA 64618 kanadı için

Yukarıdaki yeşil çizgi, 4. derece bir polinom denklemi ile yaklaşık olarak verilen yeni burulma açısı dağılımıdır. Bu dağılımın 4. Dereceden polinom denklemi haline getirilmesinin nedeni, söz konusu dağılımın imal edilebilir bir dağılım olmaması ve bu dağılımın imal edilebilir hale getirilmesidir.

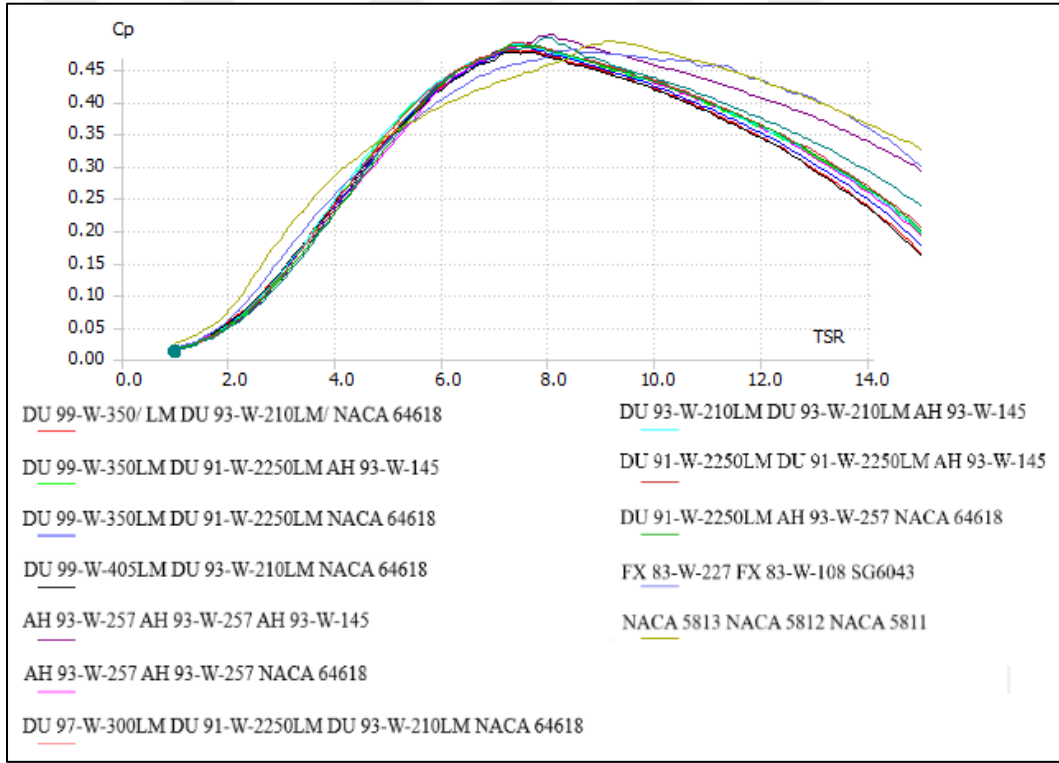
7.5 Güç Katsayısı, C_p

Güç katsayıları, 3 m/s ve 20 m/s olan devreye giriş ve çıkış rüzgâr hızları arasındaki bir aralık için hesaplanır.

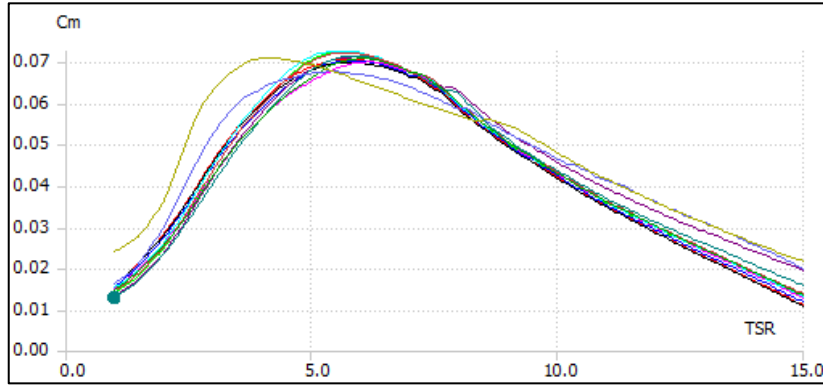
Farklı kanat profilleri arasındaki bölümler, mesafe ve ağırlıklı ortalamaya göre enterpolasyonludur.

C_p değerleri $\lambda = 1$ ve $\lambda = 15$ arasındaki değerler için hesaplandı: $T=20^\circ\text{C}$, $V = 15.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho = 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$.

TSR: Kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranı



Şekil 7.27 Kanatların Güç Katsayıları



Şekil 7.28 Kanatlardaki Momentum Katsayıları

Şimdi kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranının 8 olduğu değerde C_p değerleri düşük olan kanat ön tasarımları alternatifler arasından kaldırılabilir. C_p değerleri 0.49-0.5 mertebesini 3 tane kanat tasarımı yakalayabilmiştir. Bu kanatlar B1, B2 ve B3 olarak adlandırılacaklardır:

B1: AH 93-W-257/AH 93-W-145

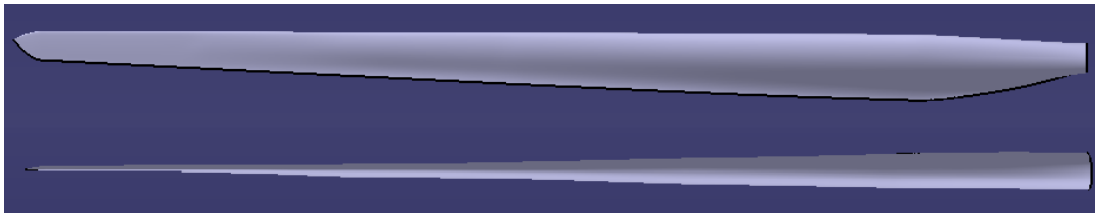
B2: DU 99-W-350LM/DU 91-W-2250LM/AH 93-W-145

B3: DU 97-W-300LM/DU 91-W-2250LM/DU 93-W-210LM/NACA 64618

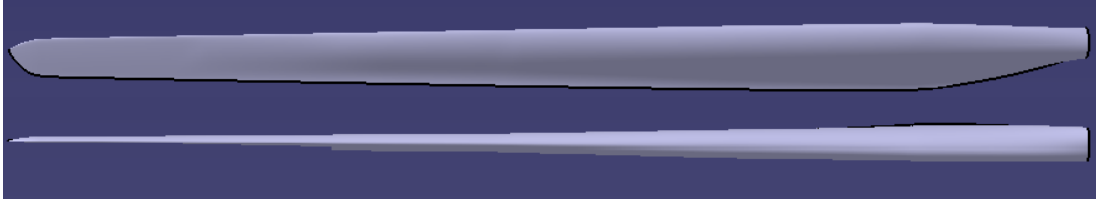
QBlade programı bilgisayar destekli çizim programı değildir. Sadece kanat profillerini, bu profillerin konumları ve atak açılarını verebilir, geri kalan 3 boyutlu tasarım kısmı, 3 boyutlu tasarım yapabilen bir programda yapılmıştır.



Şekil 7.29 B1: AH 93-W-257/AH 93-W-145

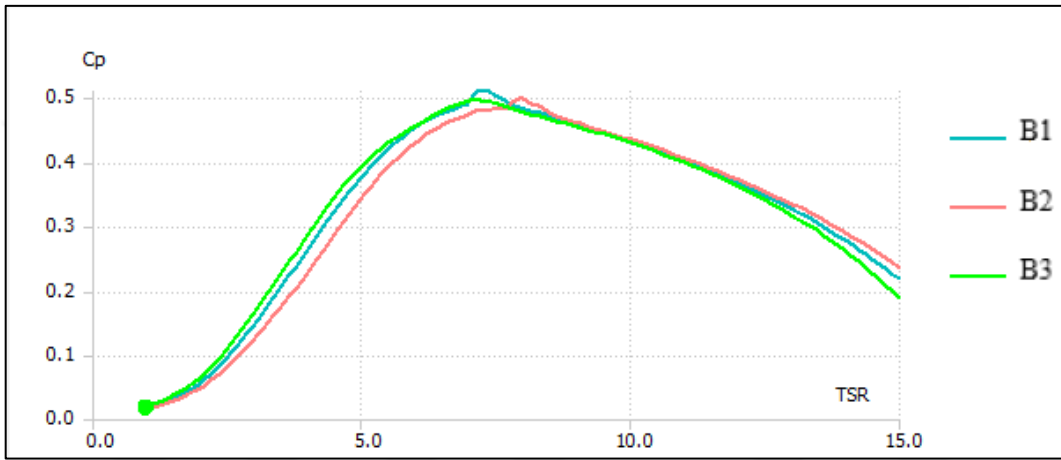


Şekil 7.30 B2: DU 99-W-350LM/DU 91-W-2250LM/AH 93-W-145



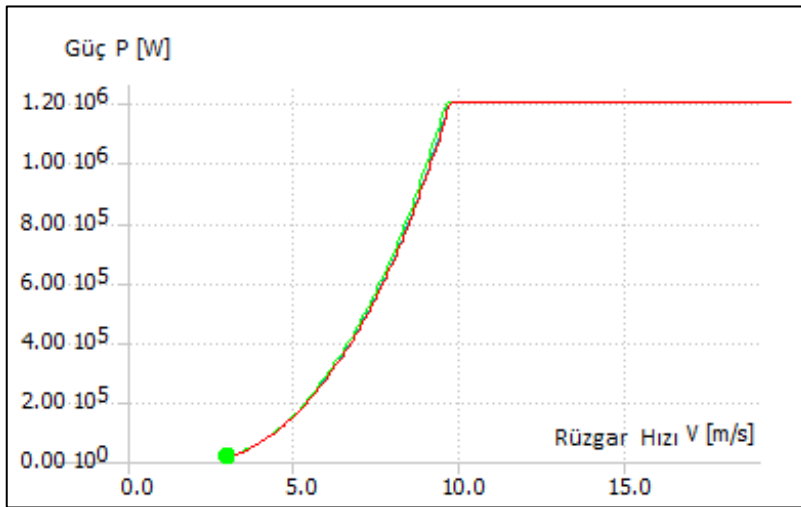
Şekil 7.31 B3: DU 97-W-300LM/DU 91-W-2250LM/DU 93-W-210LM/NACA 64618

Bu 3 kanat tasarımının C_p değerleri tekrardan hesaplanmış ve aşağıdaki Şekilde belirtilmiştir.

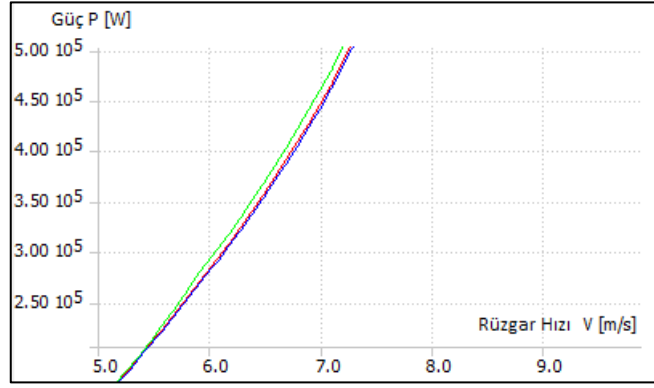


Şekil 7.32 B1, B2, ve B3 kanatlarının C_p değerleri

1.2 MW güçte kontrol altına alınmış türbinlerin, rüzgâr hızı- güç eğrileri aşağıdaki Şekilde verilmiştir:



Şekil 7.33 Rüzgâr hızı- güç grafikleri B1, B2, and B3.



Şekil 7.34 B1, B2, ve B3 kanatlarının 5 ve 7 m/s rüzgâr hızları arasındaki güç karşılaştırmaları

Yıllık güç üretim tahmini Weibull parametreleri ile hesaplanmaktadır. Türkiye'nin bazı illeri için Weibull dağılımı parametreleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 7.3 Türkiye Weibull parametreleri ile rüzgâr hızı dağılımı

Bölge	Ortalama Rüzgâr Hızları (m/s)	Standard Sapma σ (m/s)	Weibull parametresi k	Weibull parametresi A (m/s)	Dominant rüzgâr yönü
Akhisar	5.88	4.56	1.33	6.40	K (0°)
Bababurnu	5.96	3.16	1.99	6.72	KD (30°)
Belen	6.97	3.66	2.01	7.87	BK (300°)
Datça	5.63	3.44	1.71	6.31	BK (300°)
Foça	5.73	2.68	2.28	6.47	KD (30°)
Gelendost	5.05	3.63	1.43	5.56	BK (300°)
Gelibolu	6.85	3.87	1.86	7.71	D (90°)

Çizelge 7.4 Türkiye Weibull parametreleri ile rüzgâr hızı dağılımı (Devamı)

Bölge	Ortalama Rüzgâr Hızları (m/s)	Standard Sapma σ (m/s)	Weibull parametresi k	Weibull parametresi A (m/s)	Dominant rüzgâr yönü
Gökçeada	7.23	4.37	1.73	8.11	GB (210°)

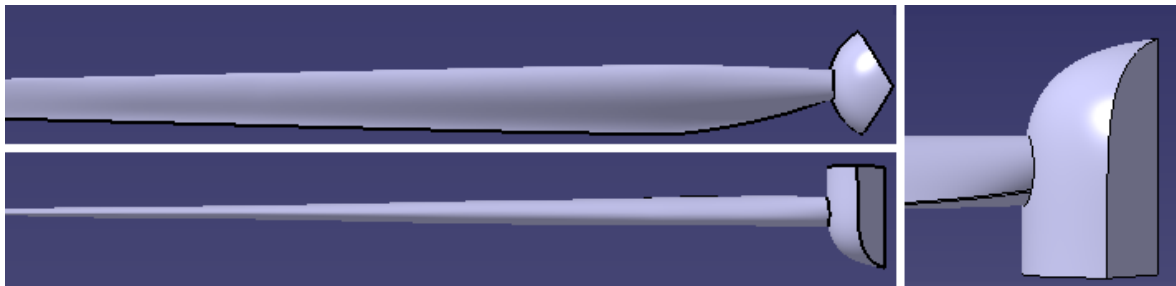
Üç kanat tasarımının yıllık tahmini enerji üretim miktarları aşağıda verilmiştir:

Çizelge 7.5 Seçilen üç kanadın yıllık enerji üretim tahminleri

	Akhisar	Bababurnu	Belen	Datça	Foça	Gelendost	Gelibolu	Gökçeada
E_{B1} (kWh)	3 230 681	3 427 956	4 498 410	3 113 443	3 095 664	2 594 452	4 317 180	4 543 629
E_{B2} (kWh)	3 216 288	3 408 074	4 477 607	3 096 129	3 074 640	2 580 199	4 297 642	4 525 299
E_{B3} (kWh)	3 272 240	3 486 943	4 561 587	3 163 798	3 158 033	2 634 759	4 376 021	4 598 795

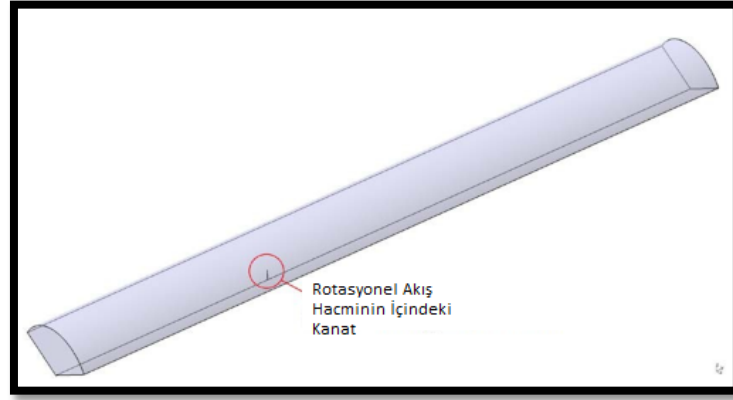
7.6 Nümerik Akış Simülasyon Sonuçları

En yüksek güç çıkışına sahip kanat olan B3, final tasarımı olarak kabul edilir ve HAD analizi yapılır. Akış hacmi 120° için modellenir ve periyodik sınır şartı uygulanır.

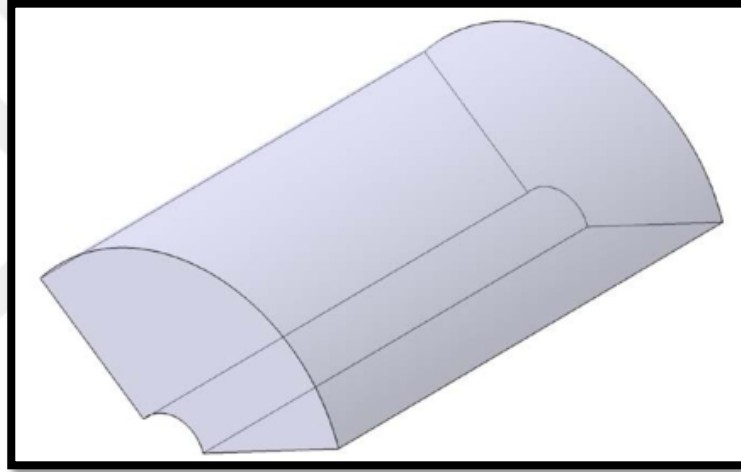


Şekil 7.35 Burun kısmının 120°'lik kısmı modellenir.

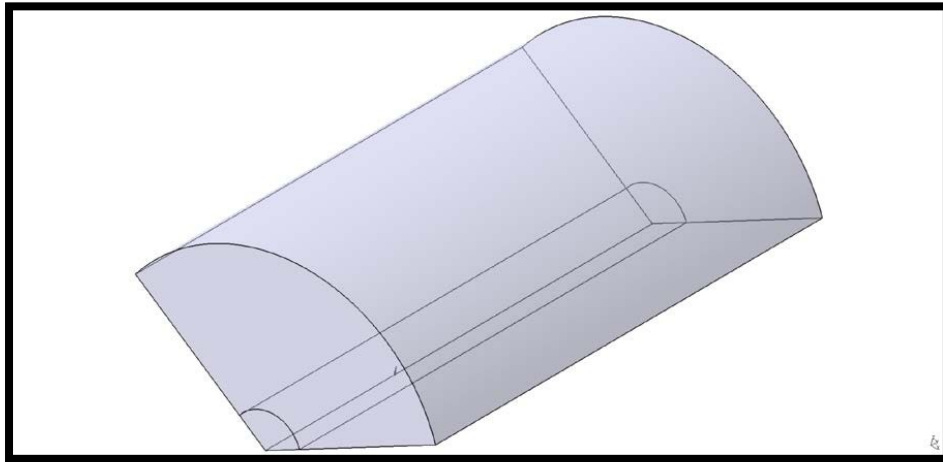
Rotasyonel ve rotasyonel olmayan akış hacimleri modellenir.



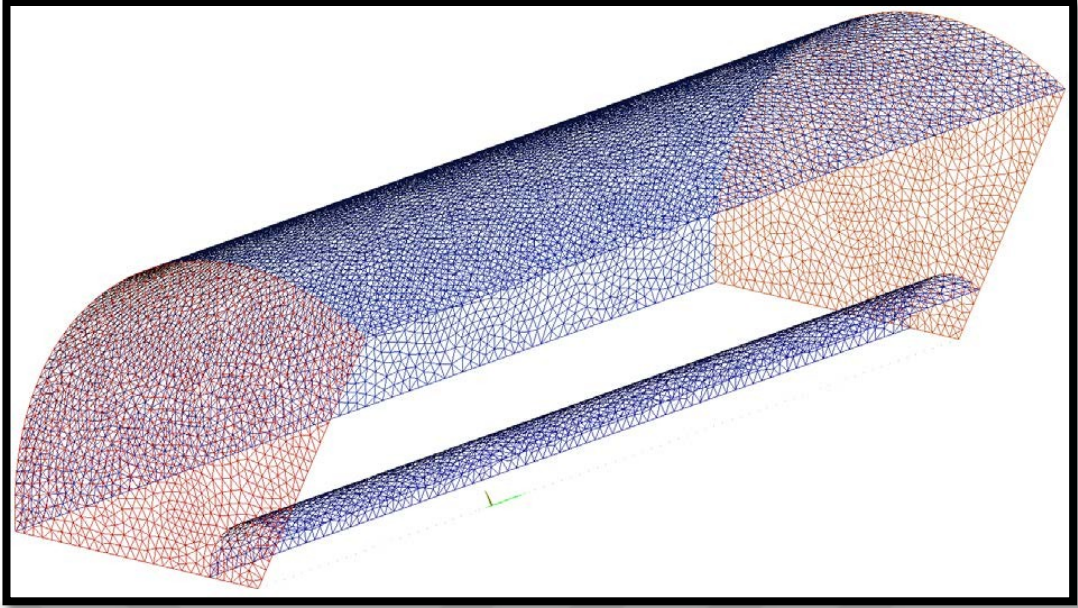
Şekil 7.36 Rotasyonel Akış Hacmi



Şekil 7.37 Rotasyonel Olmayan Akış Hacmi

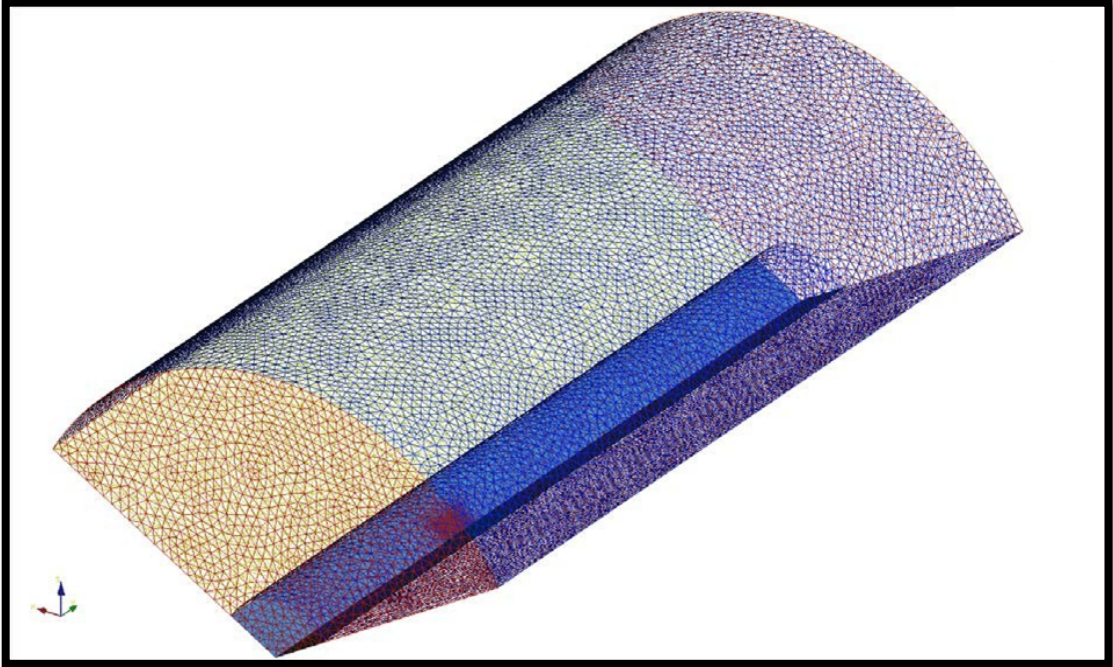


Şekil 7.38 Rotasyonel ve Rotasyonel Olmayan Akış Hacimleri

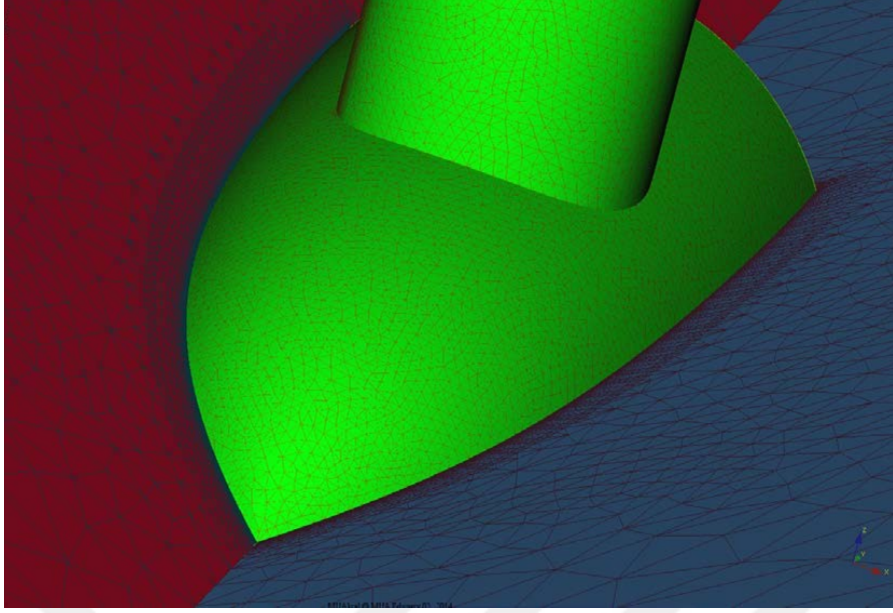


Şekil 7.39 Sınır koşulları olarak belirtilen yüzeyler

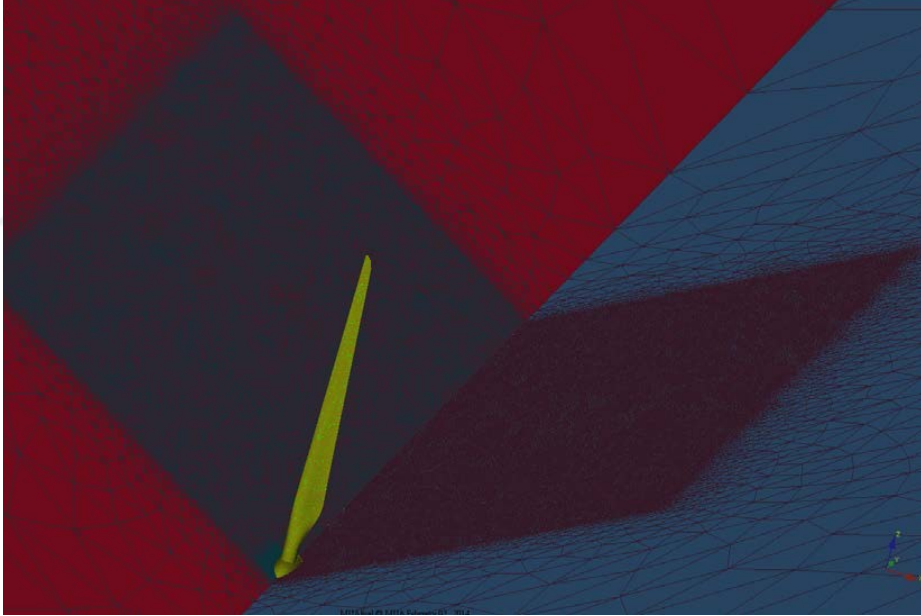
Sınır tabakası üçgen ağ ve prizma ağ yapısı ile modellenmiştir ve geri kalan kısım ise dört yüzlü ağ ile modellenmiştir.



Şekil 7.40 HAD ağ yapısı



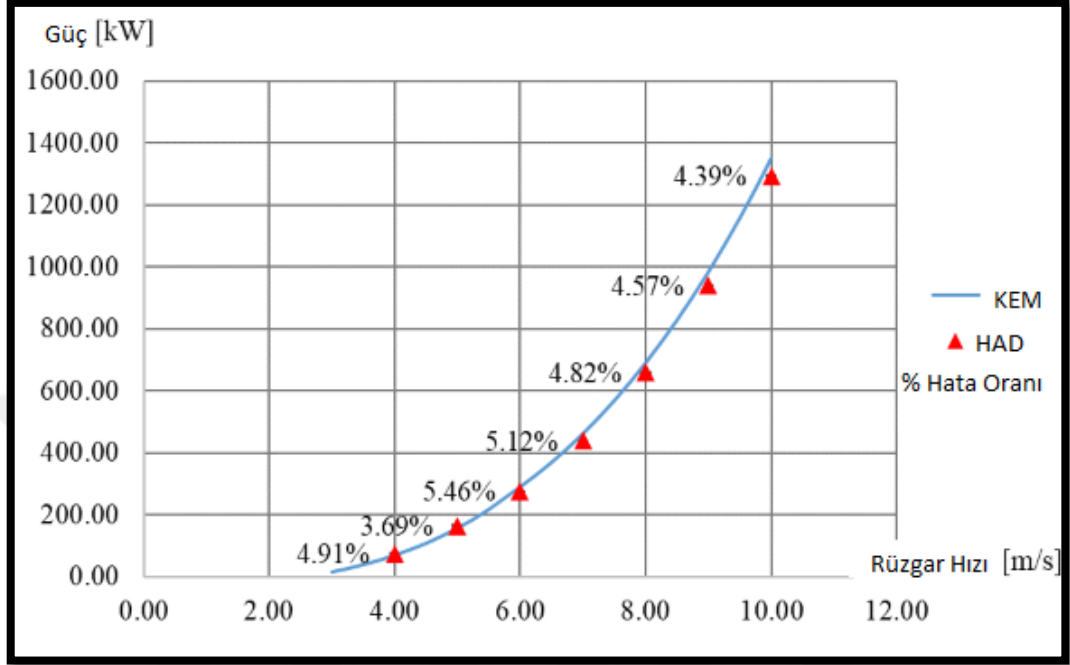
Şekil 7.41 Burun etrafındaki sınır tabaka ağ yapıları



Şekil 7.42 Kanat etrafındaki ağ yapısı.

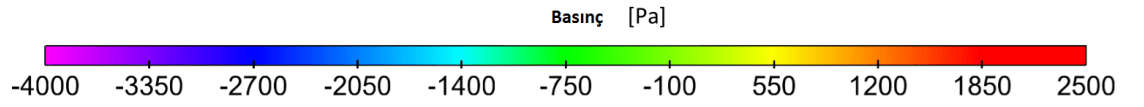
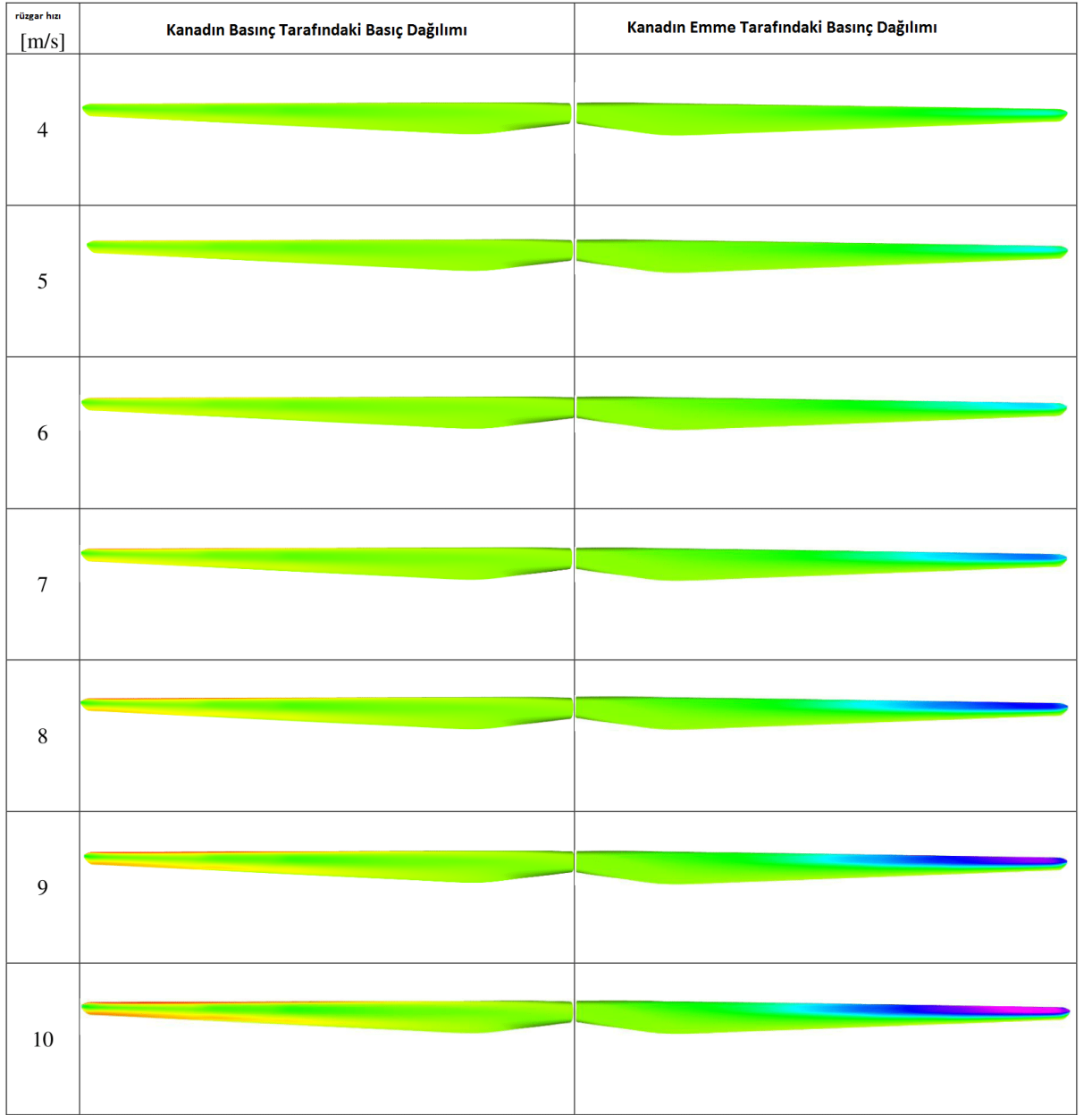
Spalart Almeras, döner makinalar için kullanılan bir türbülans modelidir. Güç çıkışında önemli değişikliğin olmadığı bir noktaya kadar ağ yapısı ve sayısının hassasiyeti için birkaç analiz yapılmıştır. Sonuç olarak, son ağ yapısı ve düğüm noktalarının sayıları 39528960 ve 9190190'tır[Ek B].

HAD sonrası için Ensight sonuç işleme programı kullanılmıştır. HAD sonuçlarından elde edilen güç ile kanat eleman modeli (KEM) sonuçları aşağıdaki şekilde karşılaştırılmıştır.

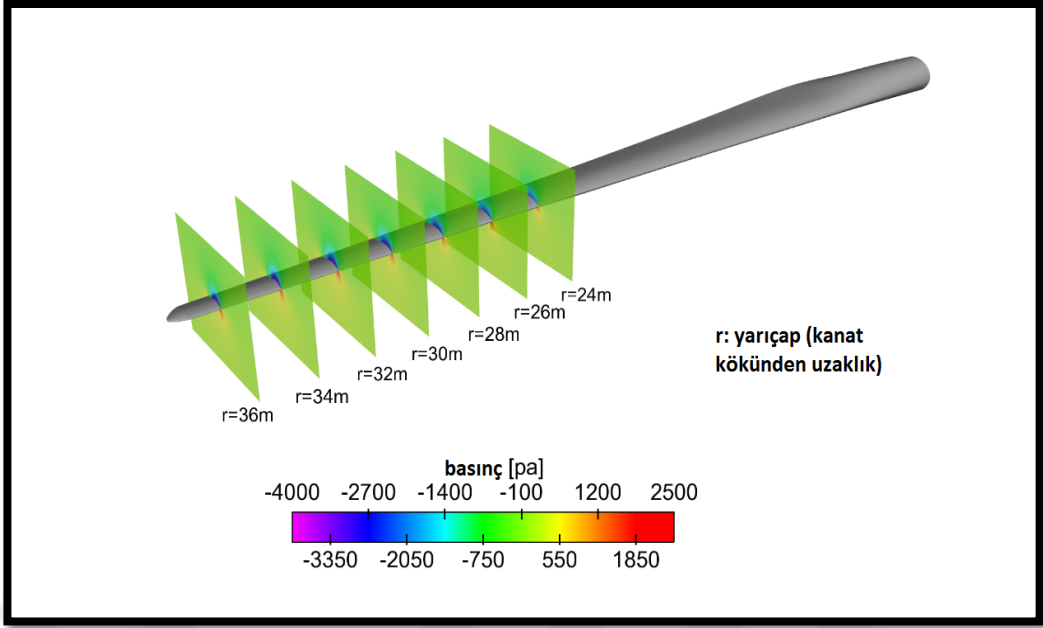


Şekil 7.43 KEM ve HAD güç çıkışlarının karşılaştırılması

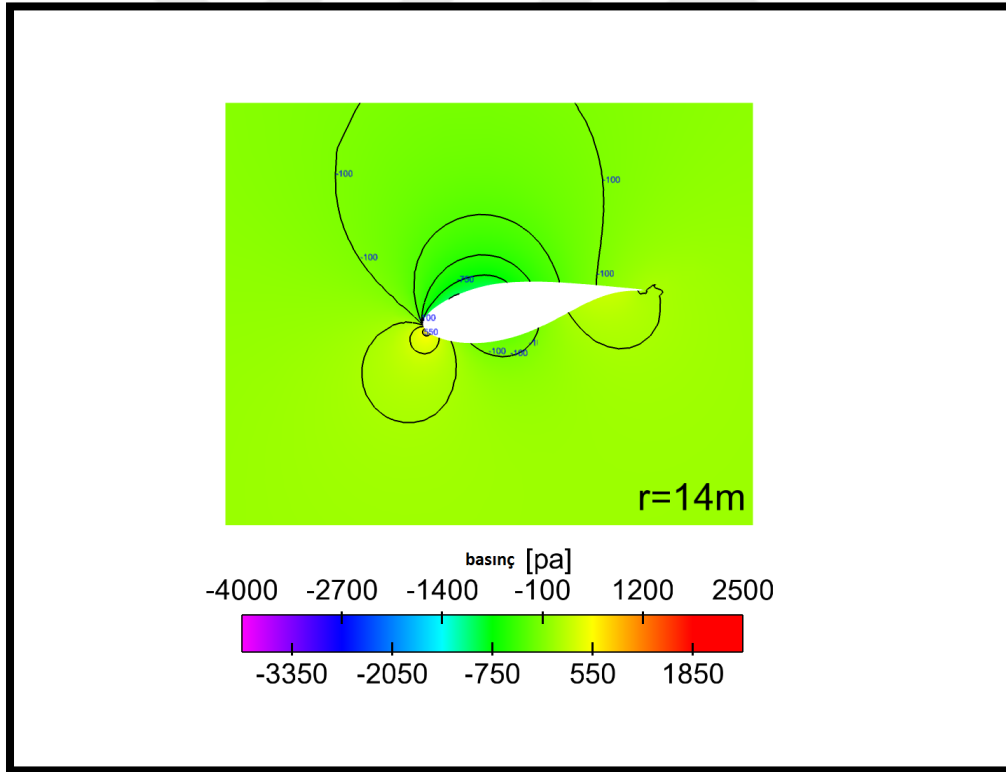
Çizelge 7.6 B3 kanadı üzerinde 10 m/s'deki basınç dağılımı



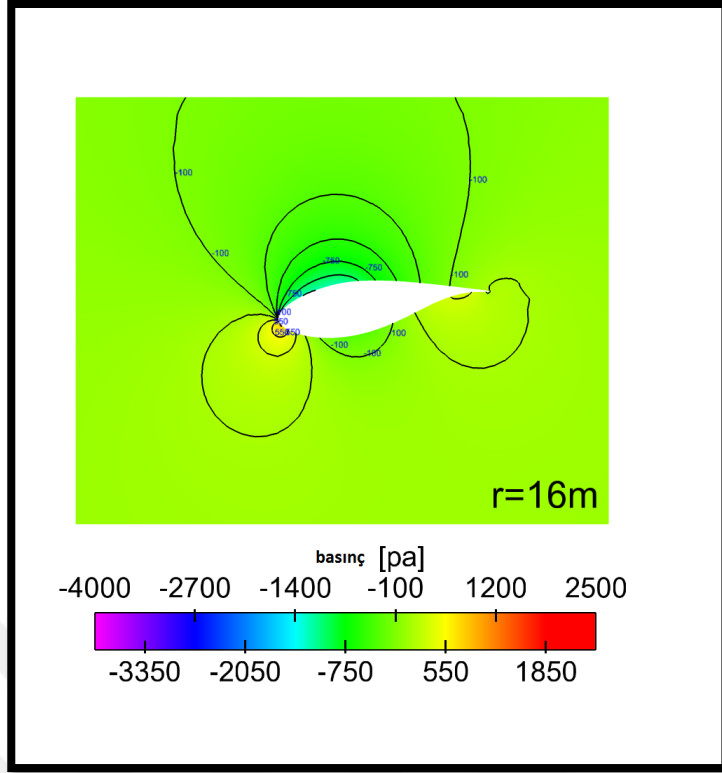
Aşağıdaki şekillerde kanadın kökten uzaklığına bağlı olarak kesitte meydana gelen basınç dağılımı:



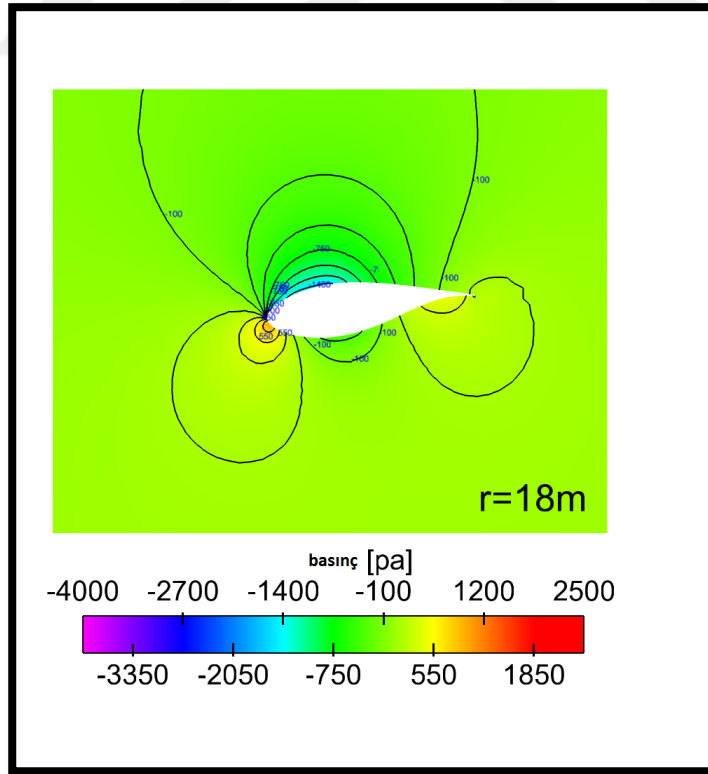
Şekil 7.44 Kesitler üzerindeki basınç dağılımı



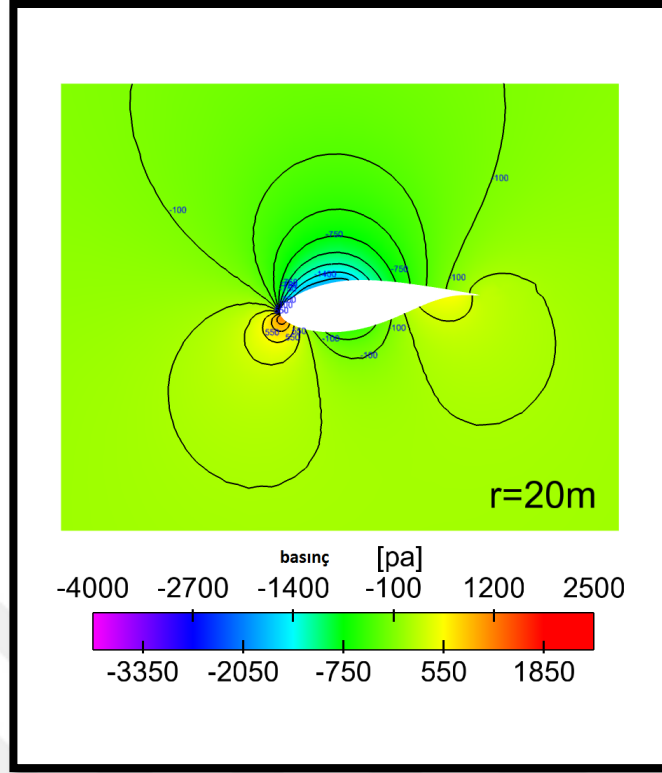
Şekil 7.45 r=14m'deki basınç dağılımı



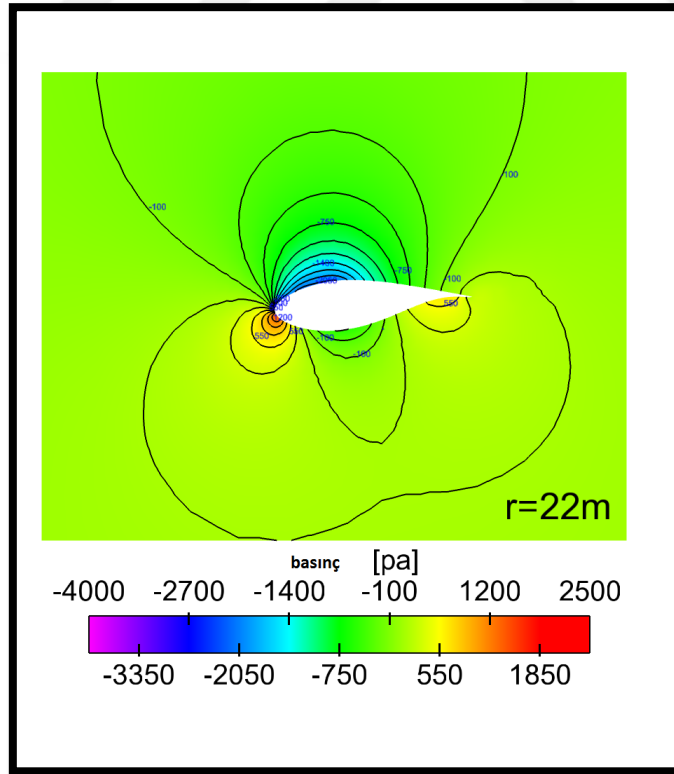
Şekil 7.46 $r=16m$ 'deki basınç dağılımı



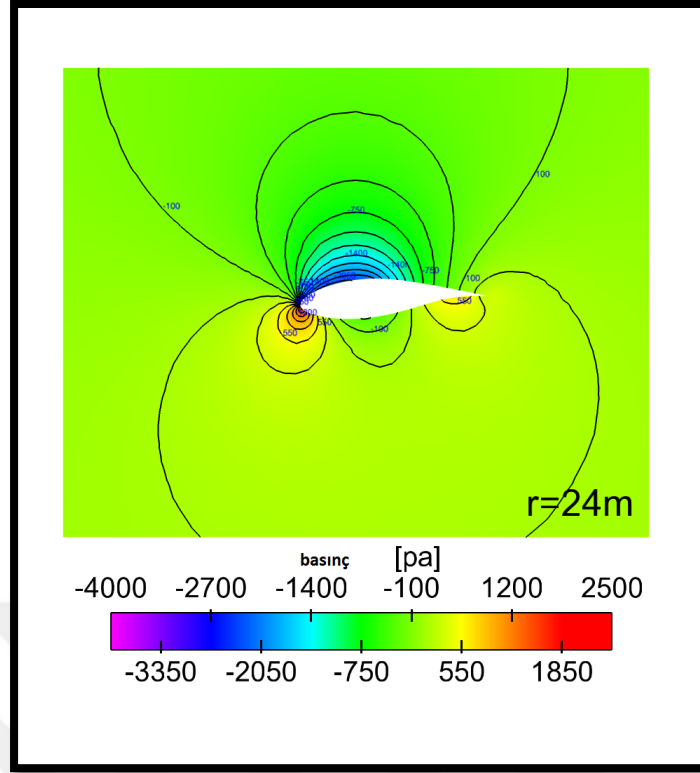
Şekil 7.47 $r=18m$ 'deki basınç dağılımı



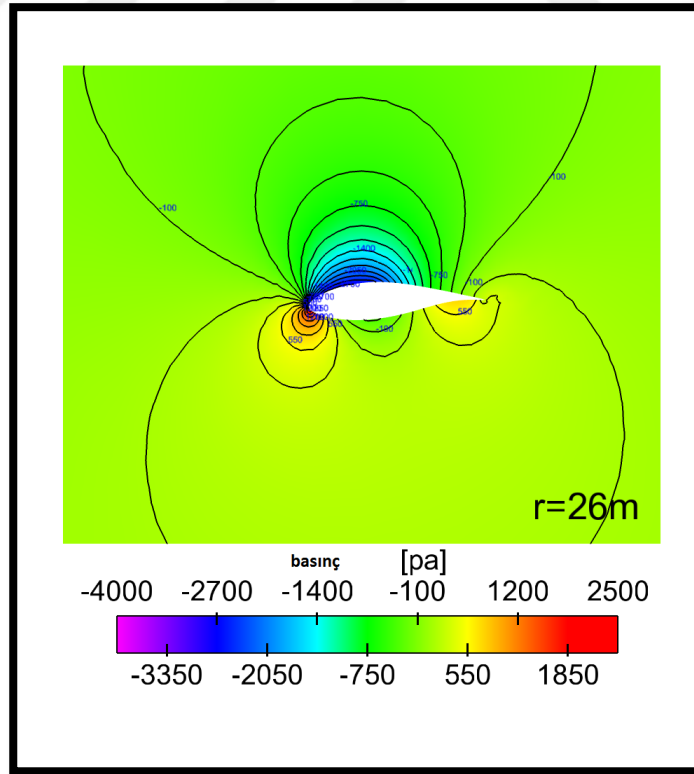
Şekil 7.48 r=20m'deki basınç dağılımı



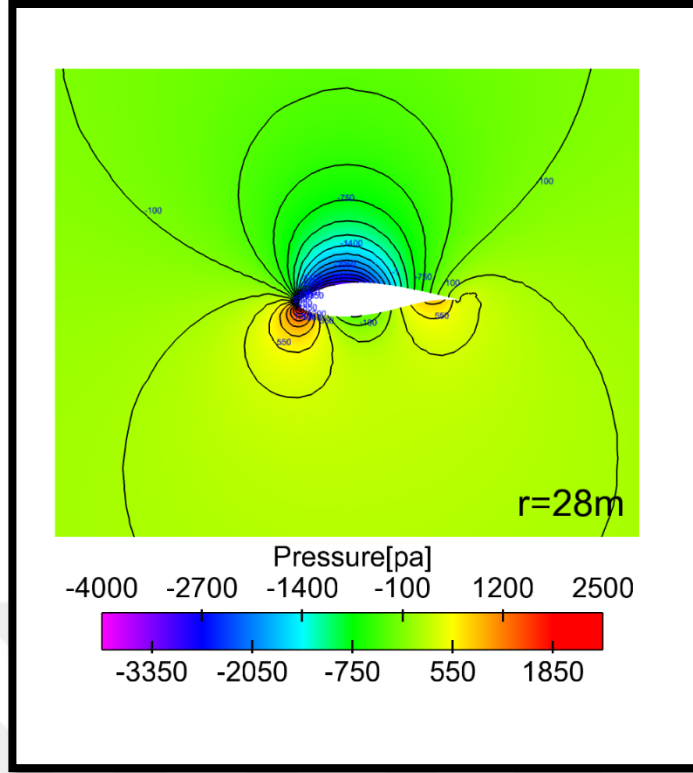
Şekil 7.49 r=22m'deki basınç dağılımı



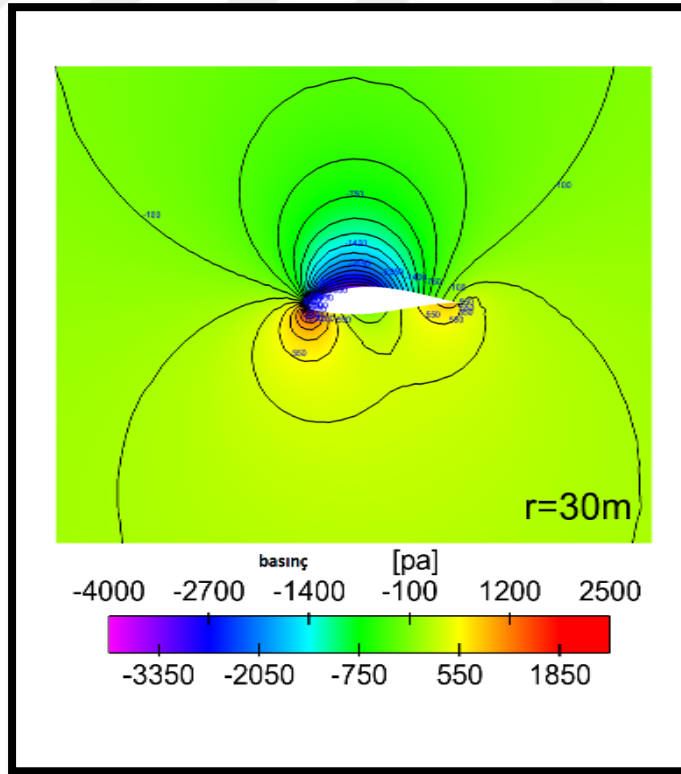
Şekil 7.50 r=24m'deki basınç dağılımı



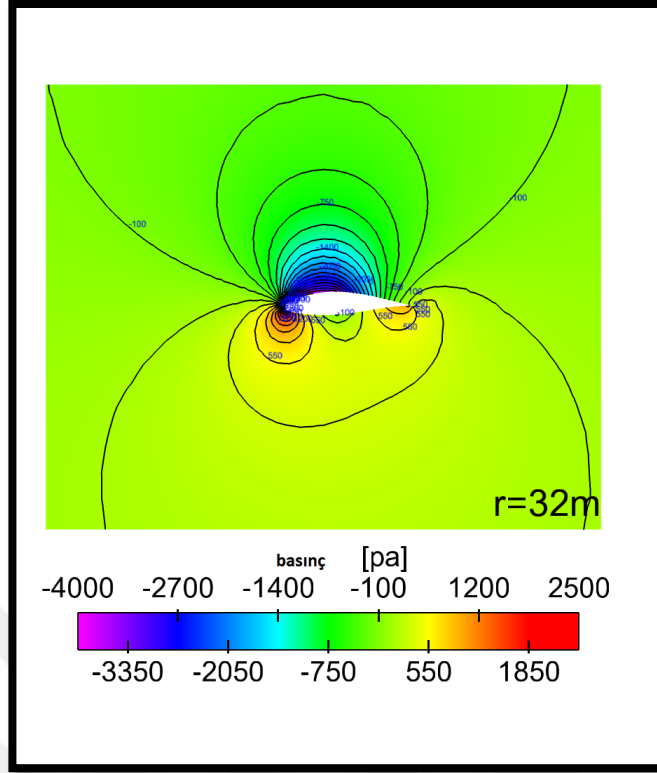
Şekil 7.51 r=26m'deki basınç dağılımı



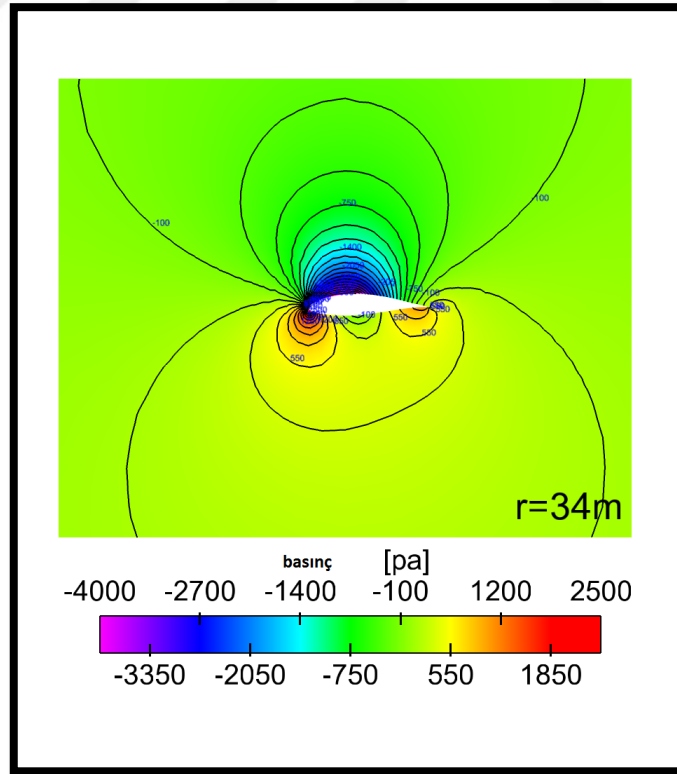
Şekil 7.52 r=28m'deki basınç dağılımı



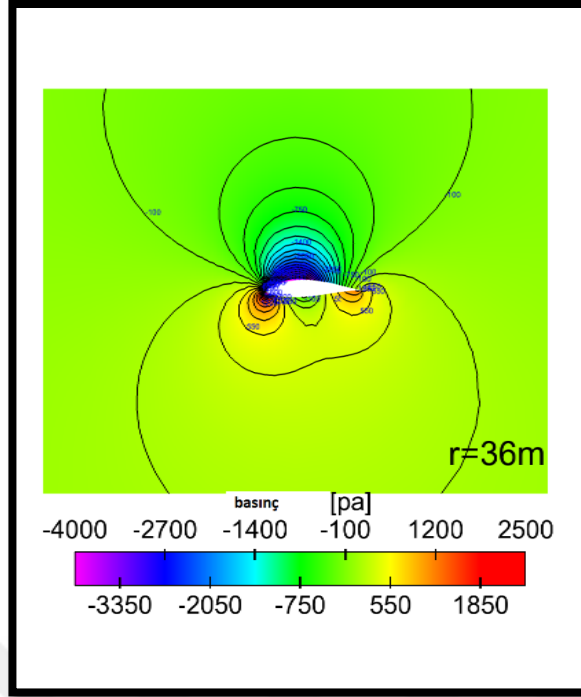
Şekil 7.53 r=30m'deki basınç dağılımı



Şekil 7.54 r=32m'deki basınç dağılımı

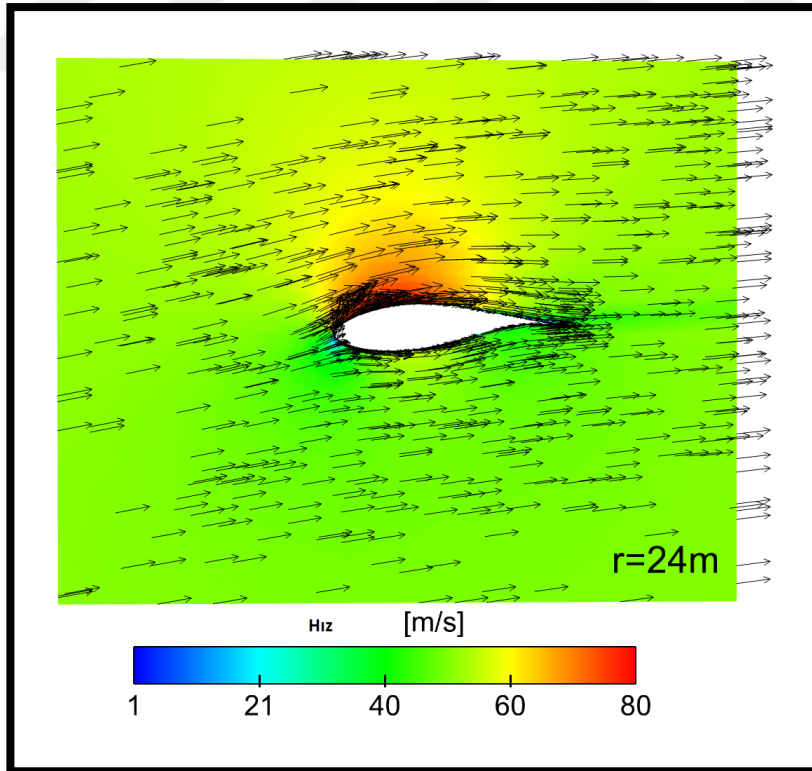


Şekil 7.55 r=34m'deki basınç dağılımı

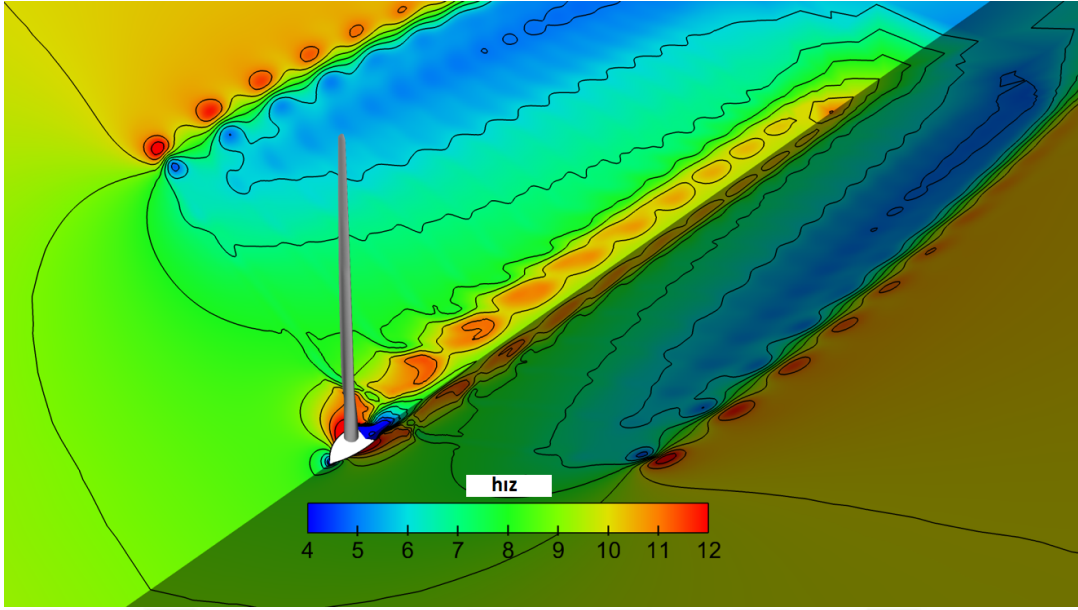


Şekil 7.56 $r=36m$ 'deki basınç dağılımı

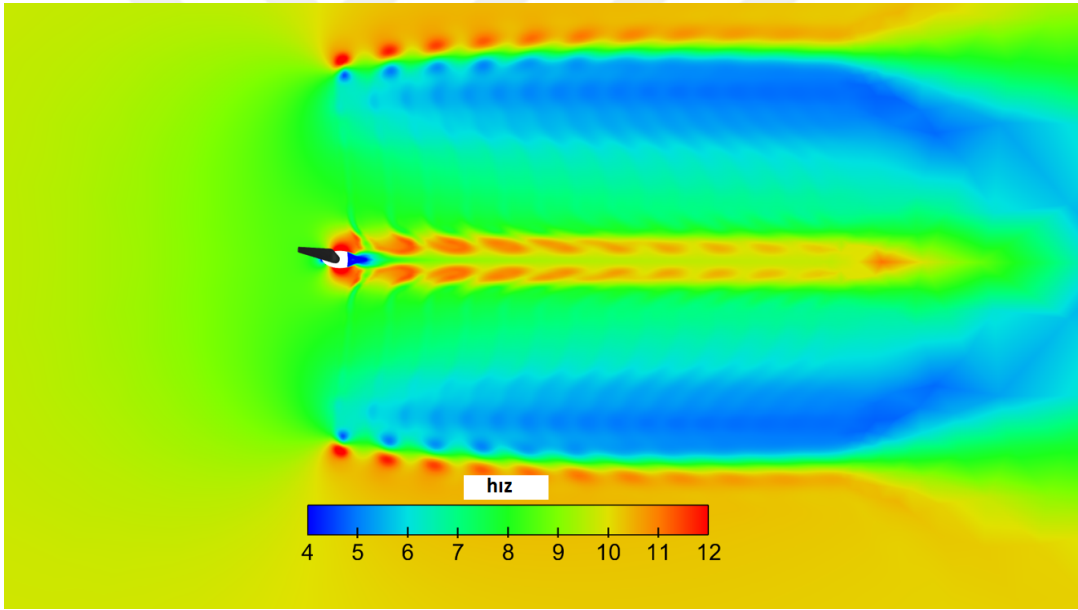
Ayrıca, örnek olarak verilen bir kesit etrafında hız dağılımı aşağıdaki gibidir:



Şekil 7.57 $r=24m$ 'deki kanat kesidi etrafındaki hız dağılımı



Şekil 7.58 Tahrik bölgesindeki hız değişimi



Şekil 7.59 Türbin etrafındaki hız değişimi, üstten görünüm

HAD analiz sonuçları KEM analizi sonuçları ile tutarlıdır. Tasarlanan rotor, nominal rüzgâr hızında istenilen gücü üretmektedir. HAD ile türbinin ayrıntılı ve hassas performans bilgileri elde edilmiştir ve en önemlisi de farklı rüzgâr hızları için yapısal tasarımın ana ihtiyacı olan aerodinamik yükleri elde edilir.

1.2 MW RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİK OPTİMİZASYON

SONUÇLARI VE ÖNERİLERİ

Projenin bu kısma kadar olan bölümünde, 1200 kW üretebilen yatay eksenli rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik tasarımı amaçlandı ve elde edildi. Tasarım rüzgâr hızını belirlerken, Türkiye'nin rüzgâr profili göz önüne alınmıştır, 10 m/s nominal rüzgâr hızında nominal gücü 1.2 MW olan kanat elde edilmiştir, ülkemizin rüzgâr ortalamasının 10 m/s'den az olması sebebiyle bu türbin tasarımı sayesinde düşük rüzgâr hızlarında da sürekli enerji üretimi söz konusu olacaktır. Bu nedenle, kanatlar düşük rüzgâr hızlarında sürekli olarak çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. İlk kanat geometrisini elde etmek için kanat element momentum teorisi uygulanır ve daha sonra bir 3 boyutlu modelleme yazılımında kanat modellenir. Kanadın performans özelliklerini doğrulamak için hesaplamalı akışkan dinamiği yöntemi kullanılır ve aerodinamik yükler hesaplanır. Projenin sonunda, yüksek çıkıl gücüne sahip düşük rüzgâr hızlarında sürekli elektrik üretebilen bir kanat tasarlanmıştır.

Hesaplamalı akışkan dinamiği analizleri ve KEM sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu, rüzgâr türbinlerini simüle etmek için kullanılan KEM modelinin güvenilirliğini gösterir, yani gelecekteki türbin projeleri için kullanılabilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri sonucunda, rüzgâr türbini kanadı üzerinde 10m/s rüzgâr hızında oluşan basınç, sonraki aşama olan yapısal tasarım ve malzeme optimizasyonu kısmında sınır şartları arasında yük olarak kullanılacaktır.

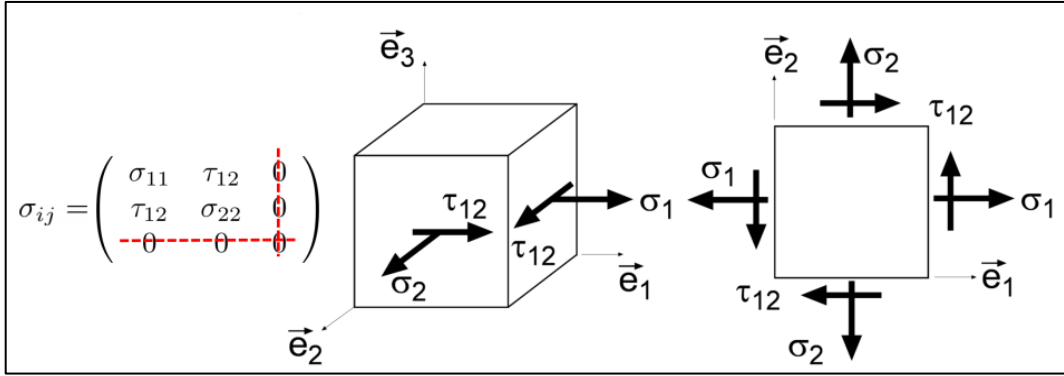
1.2 MW RÜZGÂR TÜRBİNİ YAPISAL TASARIM VE MALZEME OPTİMİZASYONU

9.1 Amaç

Aerodinamik tasarımı yapılan rüzgâr türbini kanadının, çalışma koşullarında ve aşırı çalışma koşullarında, kendi ağırlığı ve aynı zamanda merkezkaç kuvvetlerine maruz kaldığı durumlar sırasında dayanabilmesi, bu yükleme koşullarına dayanırken olabildiğince hafif olması da bu bölümdeki asıl amaçtır. Kanatların üretim maliyetini düşürmek için malzemeler diğer rüzgâr türbini kanat malzemeleri ile benzer olmalıdır. Yaygın olarak kullanılabilen kanat malzemelerinden, performans vb. konularda daha üstün olan malzemeler, maliyetleri nedeniyle türbin maliyetlerini de yükselttikleri gerekçesiyle şu an fizibil bir kullanım ortamına değillerdir. Projenin yapısal tasarım aşamasında, benzer kanatlarda kullanılan malzemeleri kullanılarak aerodinamik olarak tasarlanmış türbin kanadının ağırlığının azaltılması amaçlanmaktadır. Bir başka amaç da türbinin Türkiye'nin rüzgâr koşulları için tasarlanmasıdır. Bu nedenle, herhangi bir rüzgâr türbini kanadının ağırlığını azaltmak yerine yeni bir kanat tasarlanmasının nedeni budur.

9.2 Kompozit

Rüzgâr türbini kanatlarında kullanılan kompozit malzemeler fiber takviyeli plastiklerdir. Bu malzemeler genellikle ortotropik laminalar olarak modellenir ve düzlemsel gerilme altında olduğu düşünülür.

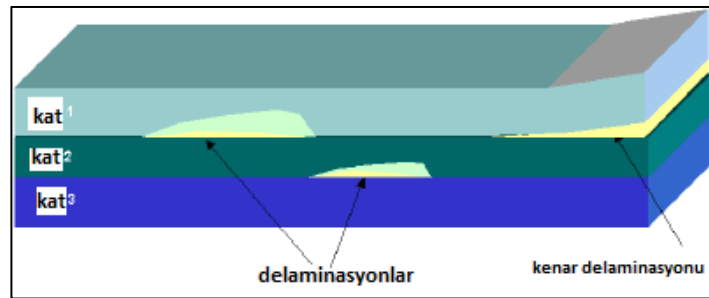


Şekil 9.1 Düzlemsel gerilme durumu

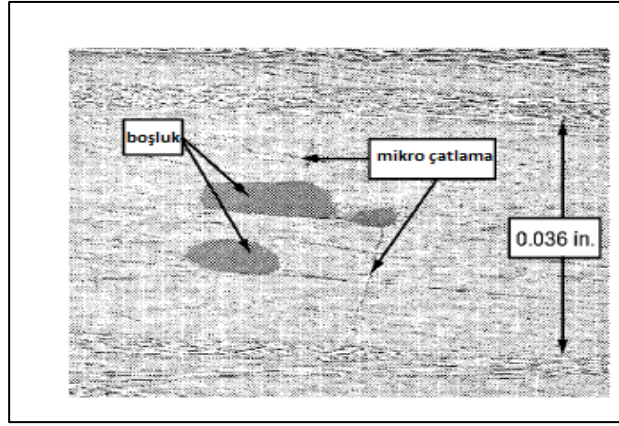
Kompozitlerin sonlu eleman analizinde, her katın bir kabuk olduğu kabul edilir ve kalınlığı, aksi belirtilmedikçe iki tarafa eşit olarak dağıtılmak üzere düzenlenir. Klasik laminasyon teorisi, her katın sertliklerini ve kütle yoğunluğunu hesaplamak için kullanılır ve bu değerler homojenleştirilmiş kabuk özellikleri elde etmek için kullanılır [13]. Stres sonuçları kabuk gerilmeleri ve kat gerilmeleri olarak elde edilir.

Projede, katmanlar da eğer açısallık varsa, bu katmanların simetrik bir düzende dizilmesi gerekmektedir. Dengeli katmanlar eşit sayıda +45 ve -45 derece şeklinde dağıtılır[14]. Katların simetrik olması, eğilmeyi azaltmaya olanak verirken, dengeli katman serimi, kesme kuplajını azaltır.

Mikro çatlama, delaminasyon ve lif kırılması, kompozitler için çeşitli hasar tiplerindedir. Mikro çatlama genellikle kırılmadan önce gözlenen ilk tiptir[15]. Mikro çatlama oluşumu diğer hasar tiplerine de yol açabilir ve hasar alma hızını artırabilir[16]. En yaygın mikro çatlama tipi, aksenal yükleme sırasında enine bir şekilde yönlendirilen katlarda meydana gelir[14].



Şekil 9.1 Delaminasyon

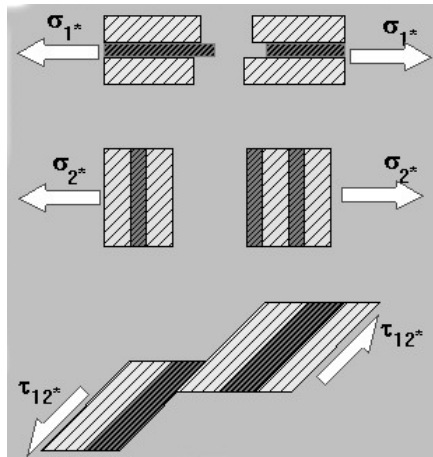


Şekil 9.3 Mikro Çatlama

Burulma, düzlemsel basma gerilmesinin altında kalan plakalarda meydana gelebilir. Genel olarak, tek eksenli veya çift eksenli basınç yükleri burulma sebebidir, ancak aynı zamanda bir yönde basma ve diğer tarafta çekme olan iki eksenli yükler altında da meydana gelebilir[17]. Sonlu eleman analizinde lineer burulma analizi özgül değer (eigen value) problemi olarak yürütülür.

Kanatların yorulma mukavemetini kontrol etmek için kanatlar test tesislerinde sürekli dinamik yüklemeye tabi tutulurlar. Metallerin aksine kompozit malzemelerin yorulma süreci hakkında çok fazla bilgi yoktur[14].

Kompozit malzemeler için üç hasar mekanizması vardır. Bunlar, uzunlamasına yönde hasar, enine yönde hasar ve düzlemdeki kesme ile yönünde hasar.



Şekil 9.4 Kırılma Mekanizmaları

Bir kompozit katmanın dayanımını karakterize etmek için beş değer gereklidir:

σ_1^T = boyuna çekme mukavemeti

σ_1^C = boyuna basınç dayanımı

σ_2^T = enine çekme mukavemeti

σ_2^C = enine basınç dayanımı

τ_{12} = düzlem içi kesme kuvveti

Kompozitler için üç ana hata kriteri vardır. Birincisi maksimum stres teorisi, ikincisi maksimum gerilim teorisi ve sonuncusu da Tsai-Hill kırılma kriteri olarak da bilinen maksimum bozulma enerjisidir[18].

Maksimum stres teorisinde, eksenlerdeki streslerden herhangi birinin izin verilen stresi aşması durumunda hata oluşur[19]:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\geq \begin{cases} \sigma_1^{T*} (\sigma_1 > 0) \\ -\sigma_1^{C*} (\sigma_1 < 0) \end{cases} \\ \sigma_2 &\geq \begin{cases} \sigma_2^{T*} (\sigma_2 > 0) \\ -\sigma_2^{C*} (\sigma_2 < 0) \end{cases} \\ \tau_{12} &\geq \tau_{12}^* \end{aligned}$$

Şekil 9.5 Maksimum Gerilme Teorisinin Formülü

Maksimum Şekil Değiştirme teorisi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &\geq \begin{cases} \varepsilon_1^{T*} (\varepsilon_1 > 0) \\ -\varepsilon_1^{C*} (\varepsilon_1 < 0) \end{cases} \\ \varepsilon_2 &\geq \begin{cases} \varepsilon_2^{T*} (\varepsilon_2 > 0) \\ -\varepsilon_2^{C*} (\varepsilon_2 < 0) \end{cases} \\ \gamma_{12} &\geq \gamma_{12}^* \end{aligned}$$

Şekil 9.6 Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi

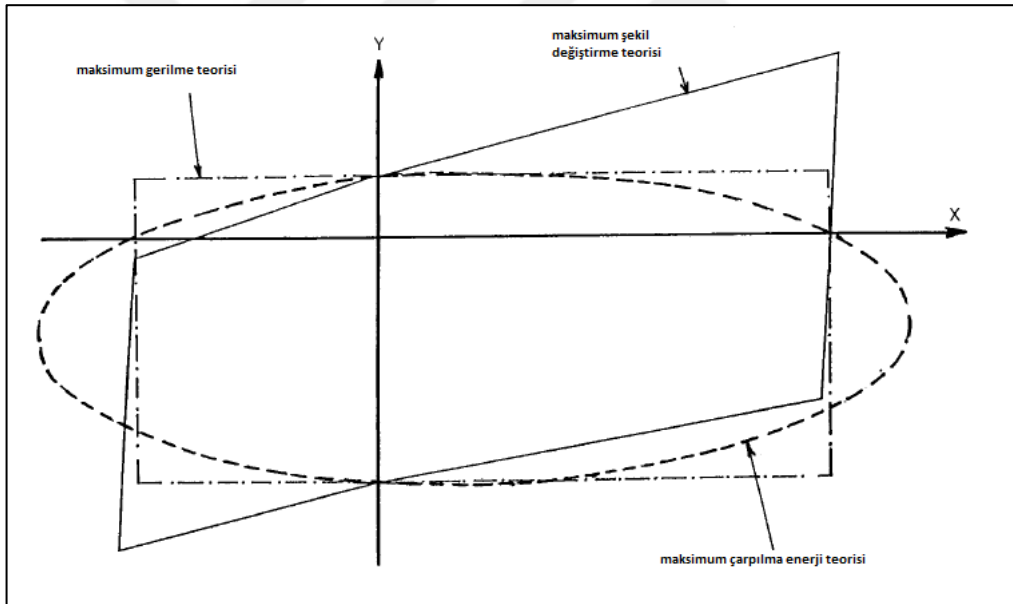
Bu kriterin olumlu tarafı, farklı stres bileşenlerinin Poisson oranı ile etkileşimini modellemesidir.

Tsai-Hill arıza kriterleri, çok eksenli stres durumundaki etkileşimler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Formülü şöyledir:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^*}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^{*2}} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^*}\right)^2 \geq 1$$

Şekil 9.7 Tsai-Hill arıza kriteri

Yukarıdaki denklemin sol tarafındaki terimlerin toplamı bire eşitse veya onu aşarsa, hasar meydana gelebilir[19]. Yine de, hata mekanizmasını tanımlamaz.



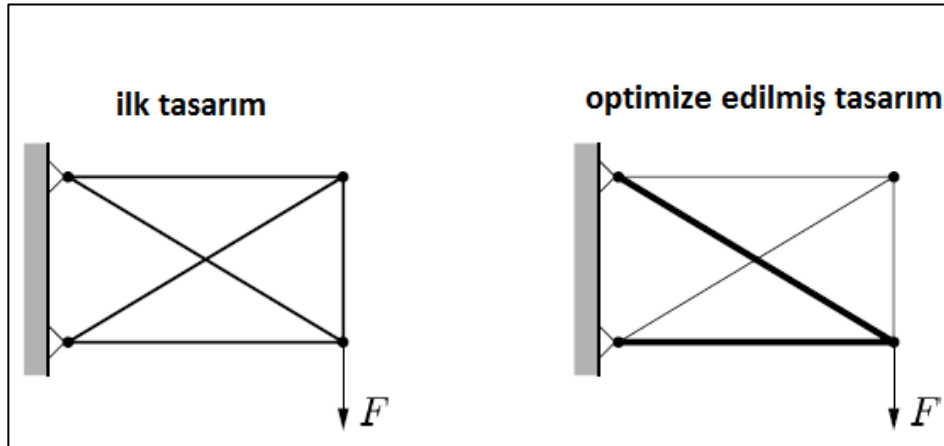
Şekil 9.8 Üç hata kriteri için arıza mukavemet zarfı

9.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Yapısal Optimizasyon

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzün mühendislik hayatında en önemli mühendislik çözümlerinden biri haline gelmiştir. Mühendislerin çok fazla deney yapmadan ve testler için bol para harcamadan ürünlerini tasarlamalarına veya optimize etmelerine yardımcı olur. Geleneksel mühendislik tarzında, bir ürünün kabul edilip edilmediğini görmek için tasarlanmış ürünün test edilmesi gerekiyordu. Gereksinimleri karşılamıyorsa, yeniden tasarlama süreci başlar ve istenen ürün elde edilene kadar yinelemeli bir işlem devam eder. Bu süreçte, işlem maliyetini artıran birçok test / deney yapılır. SEM kullanımı deney ihtiyacını azaltır ve tasarım işlemleri herhangi bir deney yapılmadan bile tamamlanabilir.

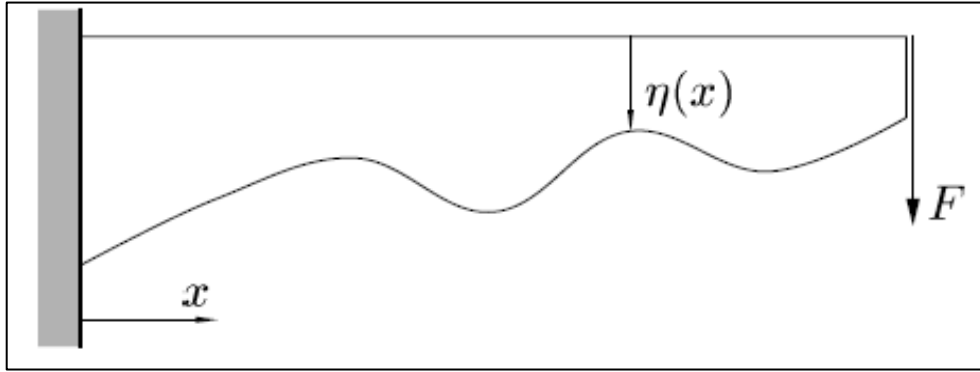
Sonlu elemanlar metodu, problem alanında, analitik olarak hesaplanması zor olan, alan değişkenlerinin yaklaşık çözümlerini yapan, hesaplayan sayısal bir yöntemdir[20]. Problem alanı, yani problemin bölümleri ağ yapısı denen küçük parçalara bölünür ve bütünü görmek için her ağ yapısı için problem çözülür. SEM hakkında ayrıntılı bilgiler Chandrupatla ve Belegundu [21] kitabından bulunabilir.

Yapısal optimizasyon problemleri, boyutlandırma optimizasyonu, Şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu olan üç ana türe ayrılabilir. Bir üyenin en iyi kalınlığına karar vermek için boyutlandırma optimizasyonu kullanılır.



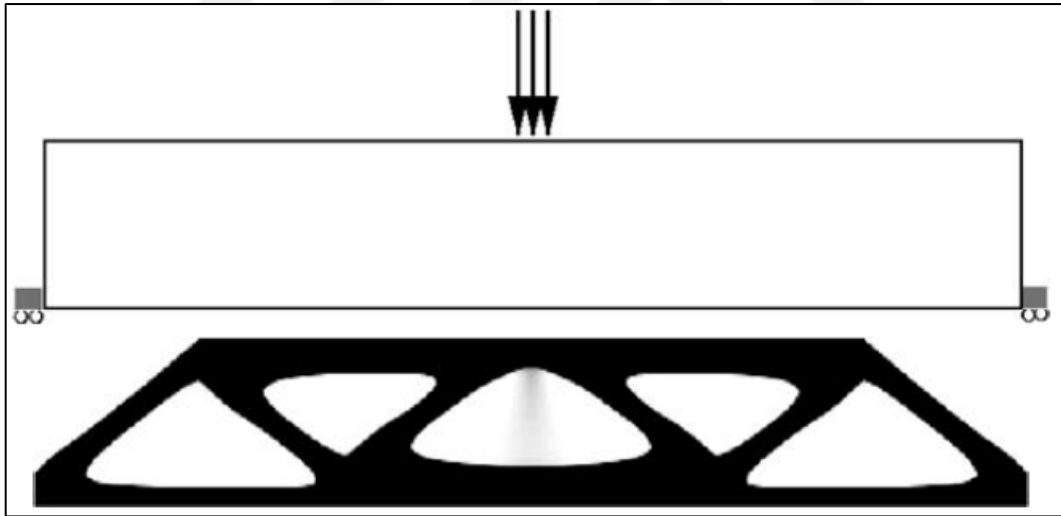
Şekil 9.9 Boyut Optimizasyonu

Şekil optimizasyonunda, yapısal alanın sınırının bir kısmının formu veya konturu optimize edilir[22].



Şekil 9.10 Şekil Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonunda, hem kalınlık hem de şekil optimize edilir. Tüm alan, tasarım değişkenidir ve yüksek stres altında olmayan bölümlere düşük önem verilmektedir. Eleman yoğunluğu denen bir parametreye 0 ile 1 arasında bir değer verilir.



Şekil 9.11 Topoloji optimizasyonu

Optimizasyonun amacı maksimum veya minimum noktaları bulmaktır. Optimum nokta, objektif fonksiyonu sıfır yapan değerdir. Eğer objektif fonksiyonun ikinci türevi pozitif ise, fonksiyonun değeri minimumdur ve ikinci türev negatif ise maksimumdur. Optimizasyon problemi şöyle ifade edilebilir:

Amaç: $W(x)$ 'yi objektif işlevi olan $W(x)$ 'yi küçültmek.

Kısıtlar: $c(x) - c^u \leq 0$, $c(x)$ kısıtlama işlevi ve c^u üst sınırdır

Tasarım Değişkenleri: $x^l \leq x \leq x^u$ x tasarım değişkeni ve l ve u üst ve alt sınırlardır.

Kompozit optimizasyon süreci denilen süreç üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar, serbest-boyut optimizasyonu, boyut optimizasyonu ve katman optimizasyonu. Serbest boyutlu optimizasyon aşamasında, her katın kalınlığı sürekli olarak değişebilir, bu nedenle parçanın her bölümünde her katın yönüne yönelik optimum kat kalınlıkları elde edilir. Bu aşamada, süper kat olarak adlandırılan kalın katlar kullanılır. Yüksek kalınlıklara sahip farklı açılı katlardan değişken kalınlıklı katmanlar elde edilir. Katman demetleri aynı şekle ve kalınlığa sahiptir.

Boyutlandırma optimizasyonu adımı, serbest boyutlu optimizasyon sonucunda oluşan katman kalınlıkları, tasarım değişkenleri olarak ayarlanmıştır. Üretilebilir katman sınırları analize dahil edilmiştir, bu sınırlar dahilinde serbest boyut optimizasyonu sonucunda elde edilen katmanlar, üretilebilir katmanlara bölünür. Bu sayede serbest boyut optimizasyonunda elde edilen üretilebilen katman kalınlıklarına sahip çok sayıda katmana bölünmüş çok sayıda katman halini alır.

Bu adımdan sonra, son katmanlar optimum yapıya sahip olacak şekilde birbirleri arasında karıştırılır. Bu aşamada, kanadının kütlesi değişmez, rijitliği ve sertliği değişir.

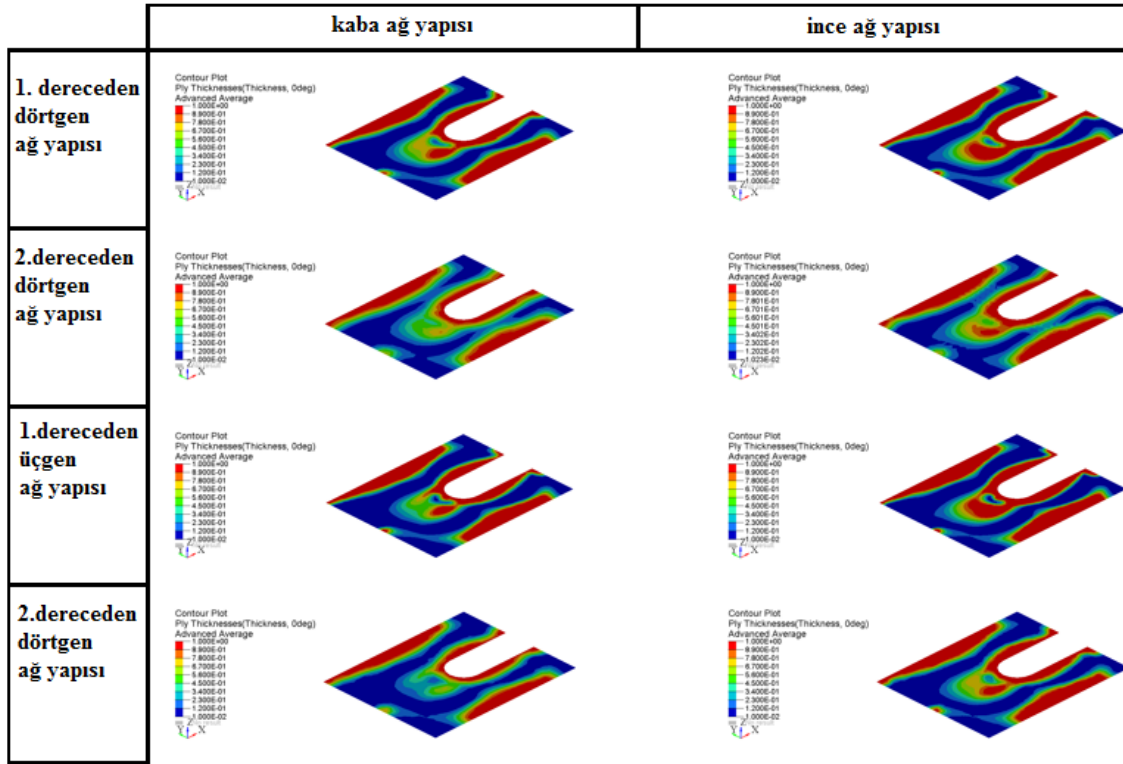
9.4 Kompozit Optimizasyonunun Ağ Yapıya Bağımlılık Kontrolü

Bu işlemde ağ yapı bağımlılığı kontrol etmek için, küçük bir parça 2 farklı eleman tipi, her biri için 2 farklı enterpolasyon sırası ve her biri için 2 farklı ağ yapı boyutu ile analiz edilir. Tüm modellerin ağ yapı bilgileri aşağıda gösterilmiştir.

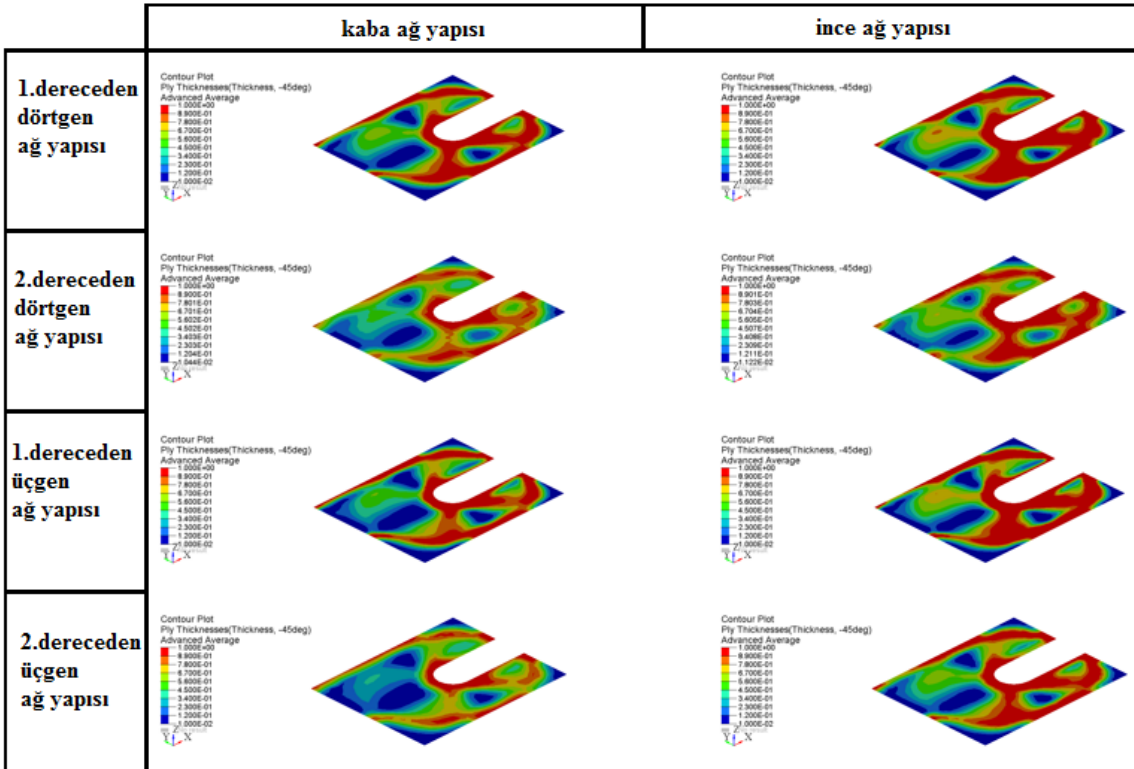
Çizelge 9.1 Ağ Yapı Bilgileri

El. Tipi	dörtgen		dörtgen		üçgen		üçgen	
	ince	kaba	ince	kaba	ince	kaba	ince	kaba
Int. derecesi	1	2	1	2	1	2	1	2
düğüm sayısı	1866	1867	508	508	2158	2159		557
üçgen					4088	4088		998
dörtgen	1752	1752	450	450				

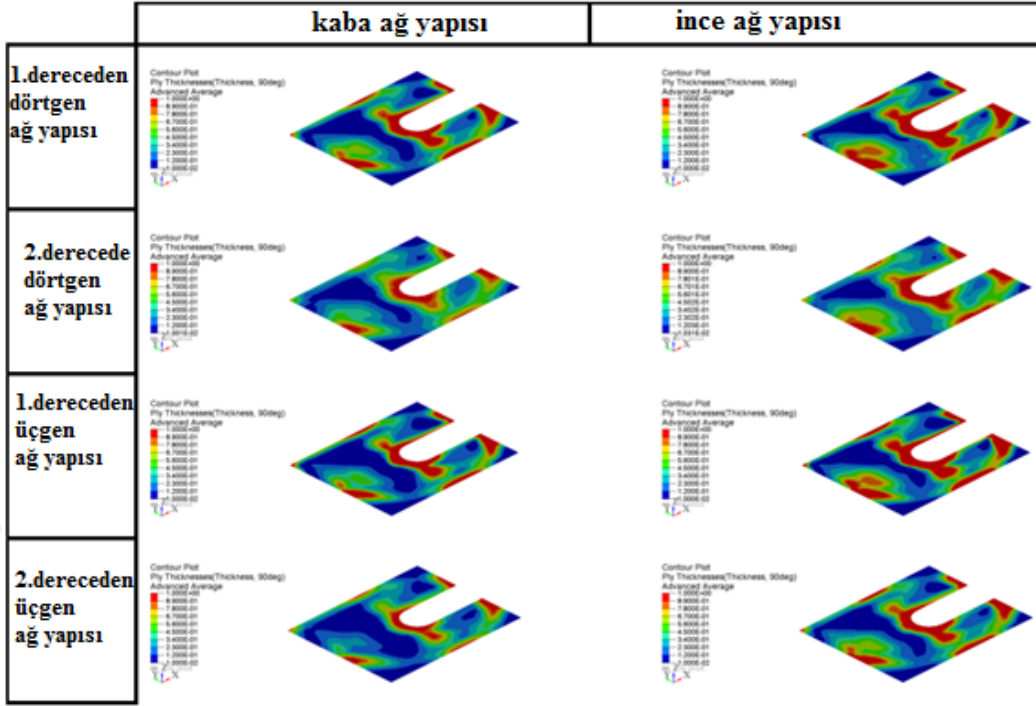
Çizelge 9.2 Sıfır derece katman serbest boyut optimizasyon sonuçları



Çizelge 9.3 Kırk beş derece katman serbest boyut optimizasyon sonuçları



Çizelge 9.4 Doksan derece katman serbest boyut optimizasyon sonuçları



Sonuçlar incelendiğinde, ağ yapının çeşidinin ve derecesinin sonuçları çok fazla etkilemediği görülebilir.

9.5 1.2 MW Rüzgâr Türbini Kanadının Yapısal Tasarımı

9.5.1 Malzeme Seçimi

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan malzemeler çoğunlukla cam fiber takviyeli plastikler (GFRP) ve karbon fiber takviyeli plastiklerdir (CFRP). CFRP mekanik özellikleri daha iyi olmasına rağmen, çoğunlukla GFRP kanatların çoğunda tercih edilir, çünkü CFRP'lerin aksine GFRP daha ucuzdur. Bu ve benzeri sebeplerle şu an gelinen teknoloji de kanat boyu 45 metreyi aşmadığı sürece özel bir durum, özel bir istek olmazsa GFRP kullanılmaktadır. CFRP kullanımı, türbinin boyutu arttıkça zorunlu hale gelir, çünkü türbinler için yeterli dayanım elde etmek için gereken GFRP miktarı makul sınırlardan daha fazla olur.

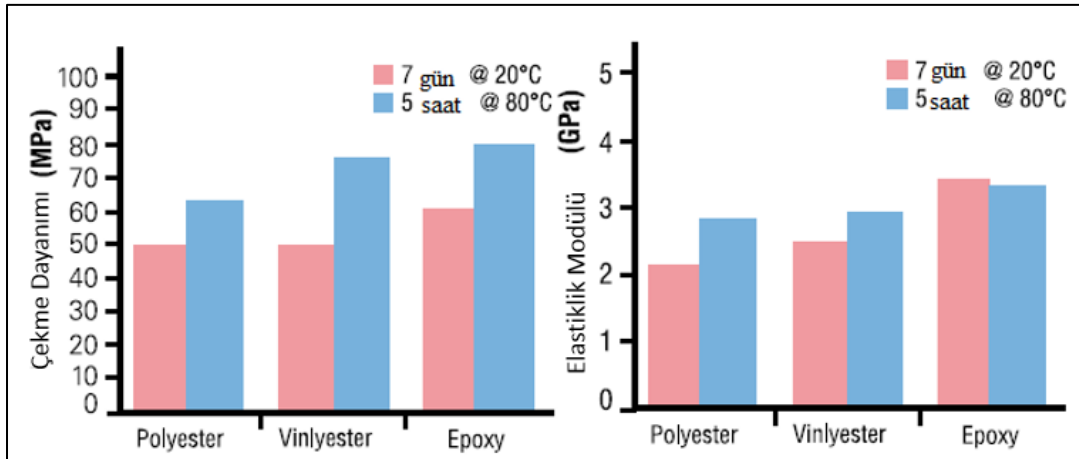
Bu projede, düşük maliyetli bir türbine sahip olmak için GFRP kullanılmaktadır. Birkaç cam fiberi ve reçine türü vardır. Cam fiber türleri, AR, C, D, E, ECR, R, S ve

S2'dir. En yaygın kullanılan fiber, yüksek mukavemetli uygulamalarda E sınıfı ve S camdır. Bu proje için S cam fiberi seçilmiştir.

Çizelge 9.5 Cam Fiber ve Mekanik Özellikleri

Fiber Tipi	yoğunluk (g/cm ³)	çekme dayanımı (Mpa)	elastiklik modülü (Gpa)	yüzde uzama
A-tipi	2,44	3300	72	4,8
AR-tipi	2,70	1700	72	2,3
C-tipi	2,56	3300	69	4,8
D-tipi	2,11	2500	55	4,5
E-tipi	2,54	3400	72	4,7
ECR-tipi	2,72	3400	80	4,3
R-tipi	2,52	4400	86	5,1
S-tipi	2,53	4600	89	5,2

Üç reçine türü karşılaştırıldı; polyester, vinilester ve epoksi [14]. Epoksinin diğer iki ürüne kıyasla en iyi yapıştırıcı ve mekanik özelliklere sahip olduğu ortaya çıktı. Çekme mukavemeti ve elastiklik modülünün karşılaştırması aşağıdaki şekilde görülmektedir. Bu nedenle, reçine malzemesi olarak epoksi seçilmiştir.



Şekil 9.12 Reçine Malzeme Karşılaştırılması

Kompozit yapının kalınlığını arttırmak için, kütle artışı olmaksızın, atalet momentini arttırmak için, kompozit katmanları arasına dolgu malzemesi eklenir.

Malzeme türleri belirlendikten sonra pazar araştırması yapılır ve kompozit ve dolgu malzeme seçilir.

Çizelge 9.6 Kompozit Malzeme Mekanik Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
E₁	22680	MPa
E₂	10430	MPa
v₁₂	0.3465	-
G₁₂	13000	MPa
ρ	1758	kg/m ³
X_t	452	MPa
X_c	363	MPa
Y_t	120	MPa
Y_c	159	MPa
S	35	MPa

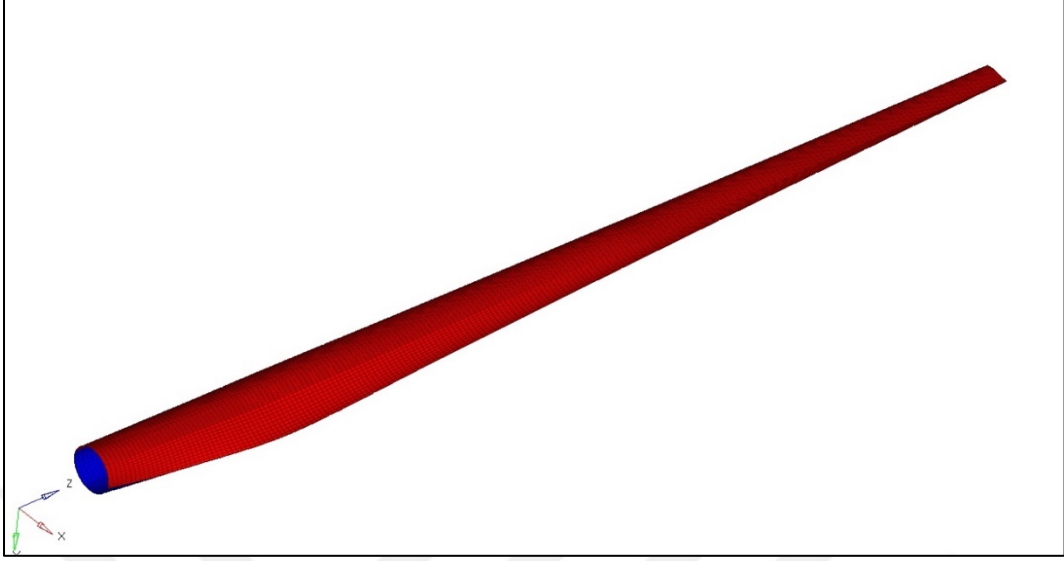
Çizelge 9.7 Dolgu Malzemesinin Mekanik Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
E	36000000	MPa
G	19	MPa
ρ	32	kg/m ³
X_t	1.9	MPa
X_c	0.9	MPa
S	0.8	MPa
E_{kırılma}	3	%

9.5.2 Serbest Boyut Optimizasyonu

Kanadın CAD modeli HyperMesh yazılımına aktarıldı ve dörtgen elemanlarla ađ yapı haline getirildi. Eleman büyüklüğü hassasiyet analizine göre belirlendi. Kompozit ve

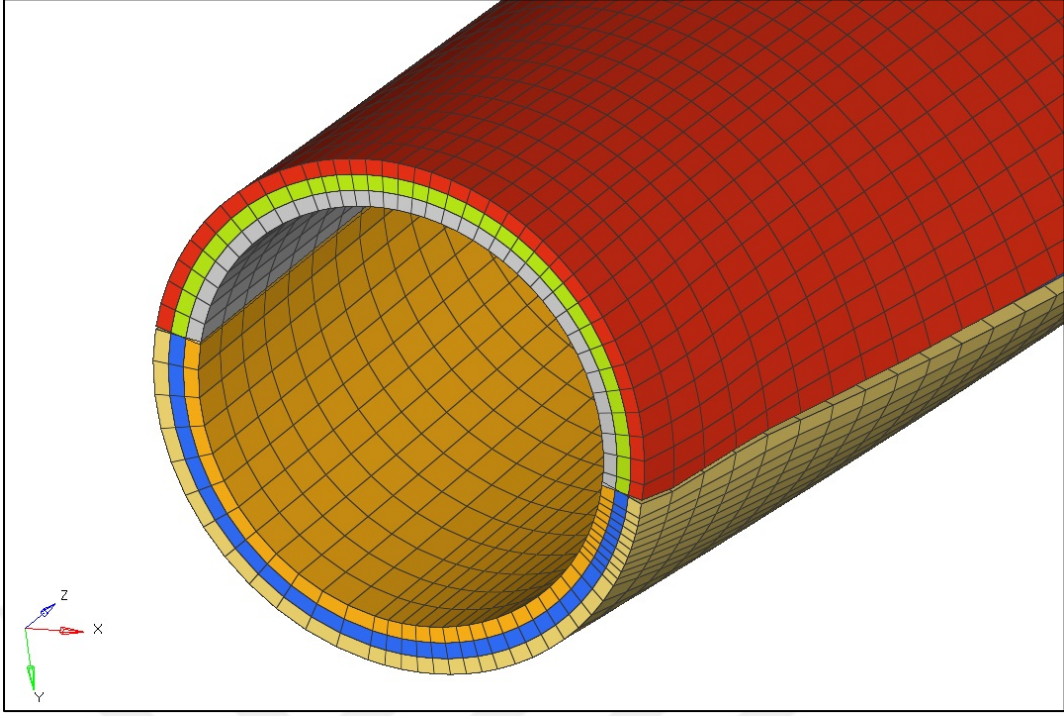
dolgu malzeme özellikleri elemanlara atandı. 0 derece yönelimle 3 süper katman oluşturuldu.



Şekil 9.13 Ağ yapı haline getirilmiş kanat

Çizelge 9.8 Ağ yapı bilgileri

<i>Eleman Tipi</i>	<i>Sayısı</i>
Düğüm	16063
Dörtgen	15984



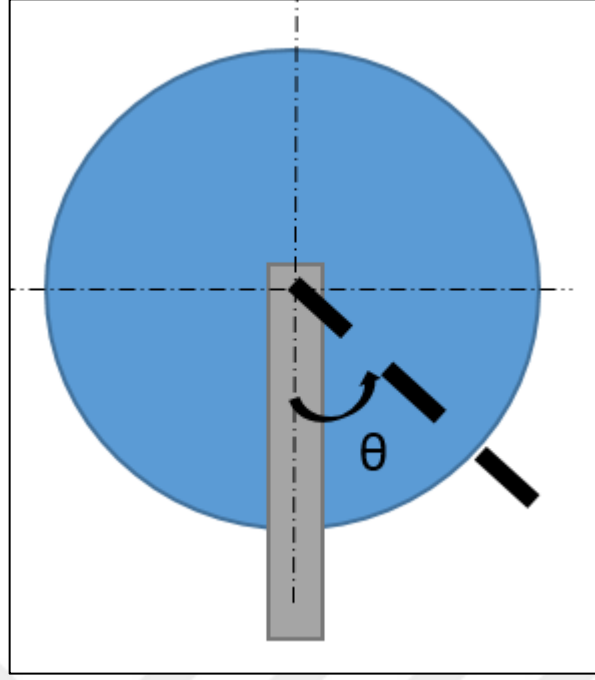
Şekil 9.14 Modeldeki Süper Katmanlar

Tasarım şartlarını veren TS EN 61400-1 standardına göre yük senaryosu oluşturuldu. Nominal rüzgâr hızları doğrultusunda gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen aerodinamik yükler, SEM modelinde yerçekimi ve rotasyonel yükler de eklenmiştir.

Çizelge 9.9 Yükleme Durumları

	Yük 01	Yük 02	Yük 03	
Senaryo	Aerodinamik	Yer Çekimi	Rotasyonel	Kanat Konumu
10 m/s-26 rpm	+	+	+	0

Kanadın konumu, alt dikey noktadan ölçülür. Kanat, zemine doğru olduğunda yönelim 0 derecedir. Aşağıdaki resimde görülebilir:



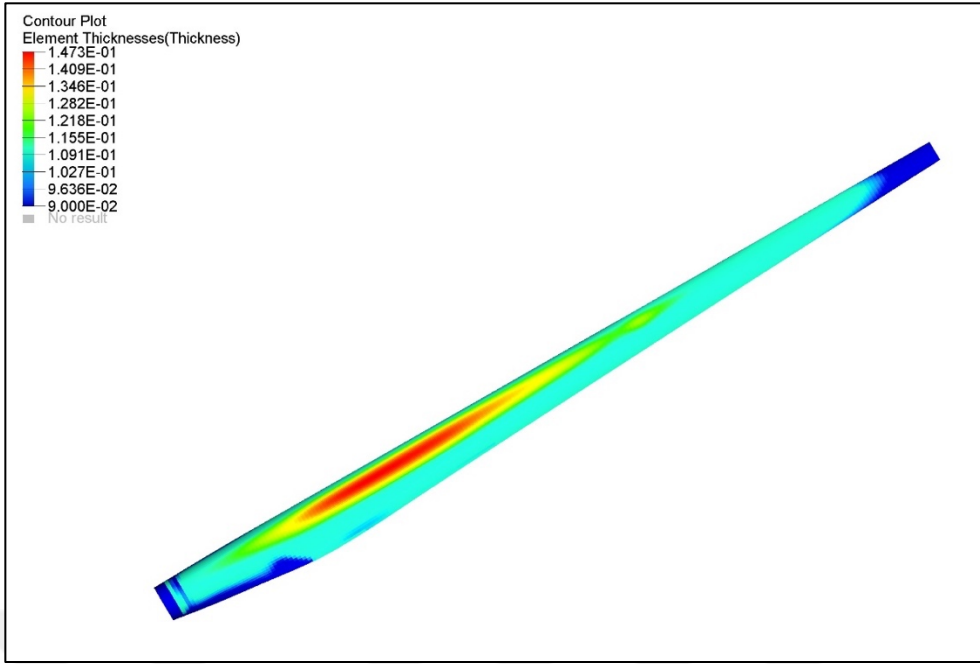
Şekil 9.15 Kanat Konumu

Optimum kalınlık dağılımına sahip olmak için, bazı tasarım kısıtlamaları uygulanmıştır. Yeterince dayanıma sahip bir kanada sahip bir kanada sahip olurken, deplasman sınırı, malzemenin gerilme sınırı ve maksimum ağırlık sınırı analizde uygulanır.

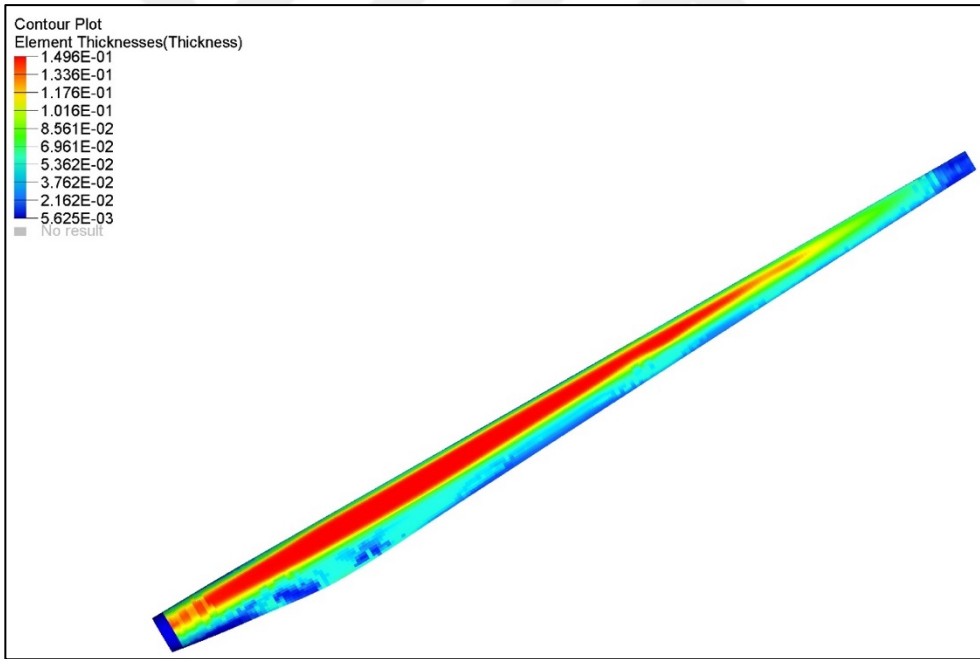
Çizelge 9.10 Optimizasyon Kısıtları

Kısıt Tipi	Alt Limit	Üst Limit
Kanat Uç Deplasmanı	-	2 m
Malzeme Gerilme Sınırı	-	35 MPa
Kütle Sınırı	-	Olabildiğince minimum

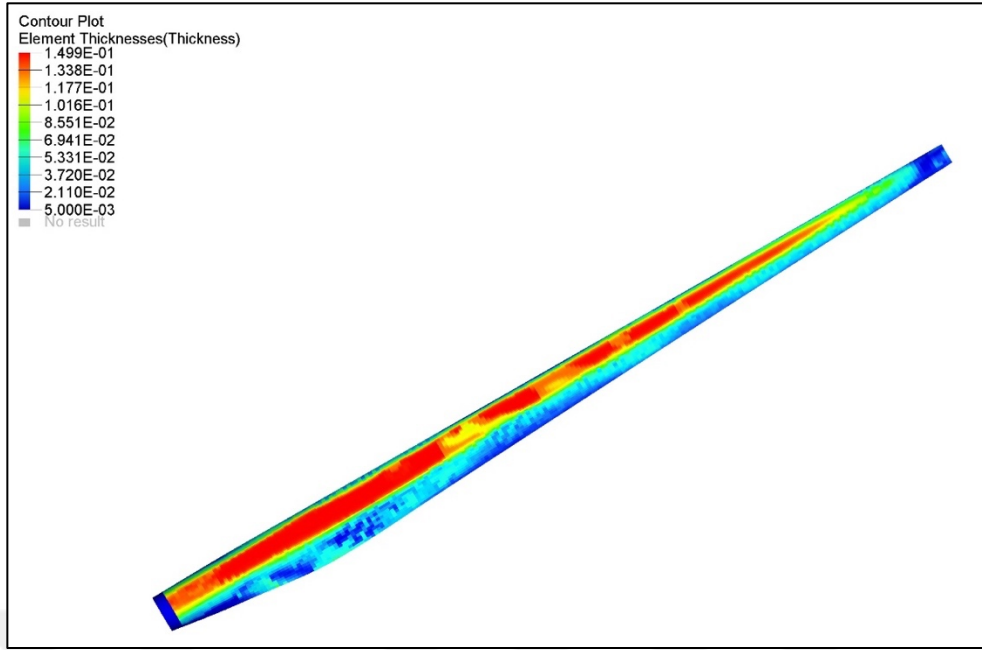
Optimizasyonun amacı, yapının kütleini en aza indirmektir. Optimizasyon sonucu, uygun bir tasarım vermiştir. Element kalınlıkları ve katman kalınlıkları aşağıdaki gibidir:



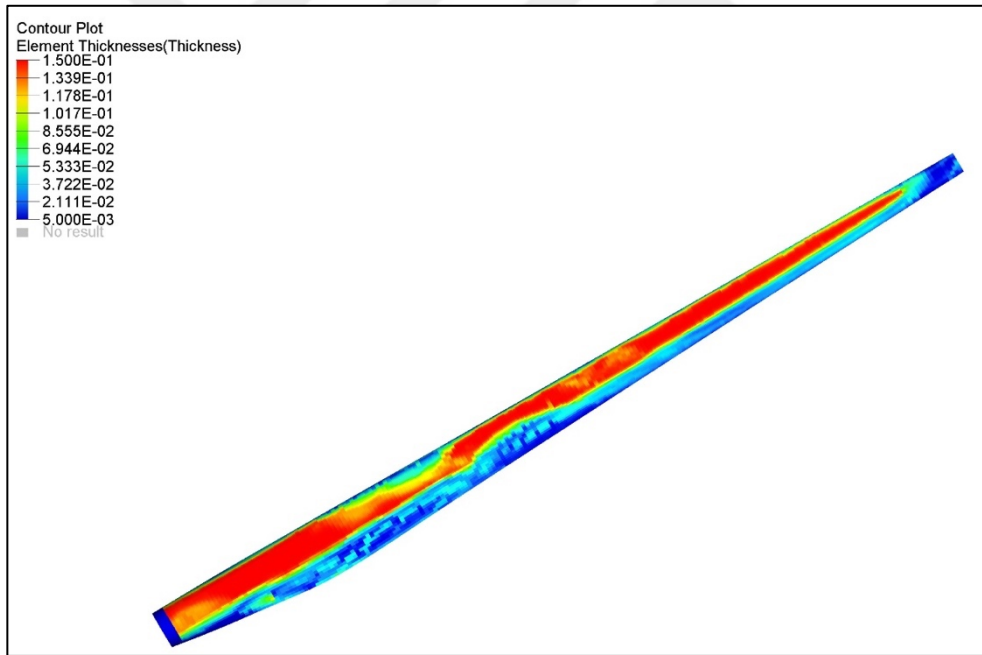
Şekil 9.16 Kalınlık Dağılımı 01



Şekil 9.17 Kalınlık Dağılımı 02



Şekil 9.18 Kalınlık Dağılımı 03

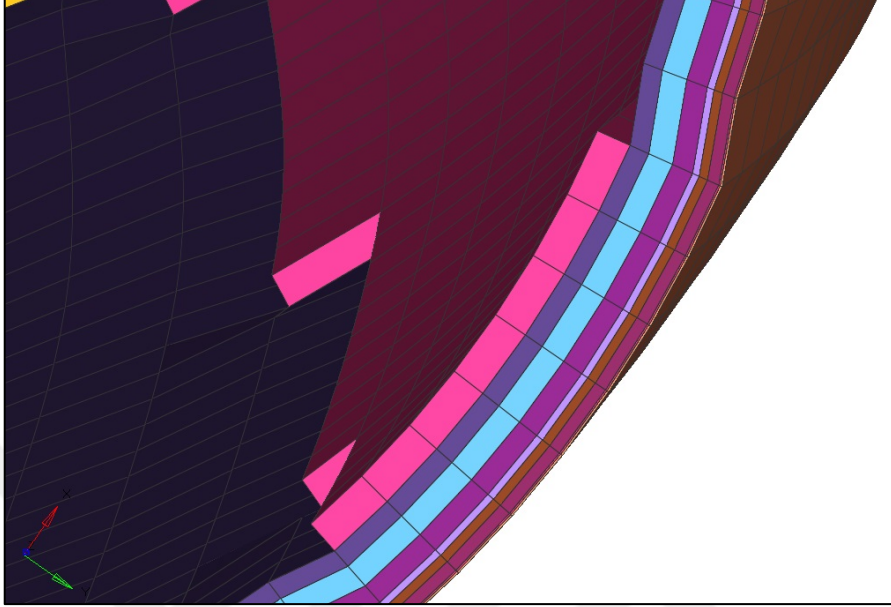


Şekil 9.19 Kalınlık Dağılımı 04

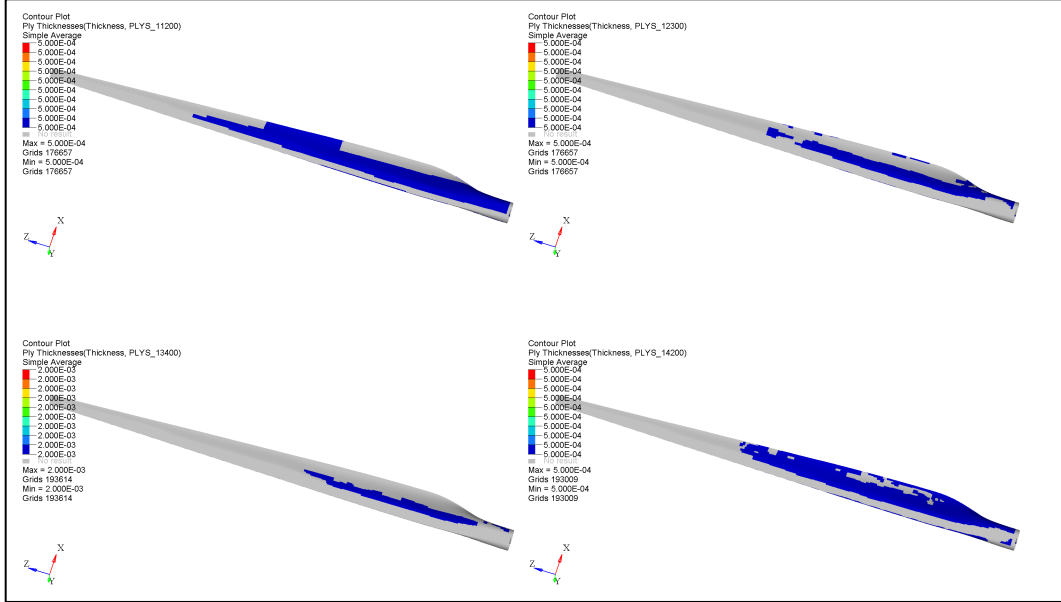
9.5.3 Boyut Optimizasyonu

Serbest boyut optimizasyonundan sonra, istenilen sınır şartlarını sağlayan kalınlık dağılımı elde edildi. Bu katmanların kalınlıkları üretime uygun olabilmesi için, boyut optimizasyonuna geçilir. Boyut optimizasyonunda amaç, kalınlık dağılımı belli olan

katmanları, üretim için belirlenen kalınlıklara bölerek çok sayıda ince üretilebilir katman haline getirmektedir. Üretilebilir katman kalınlığı 0.5 mm olarak düzenlenmiştir.



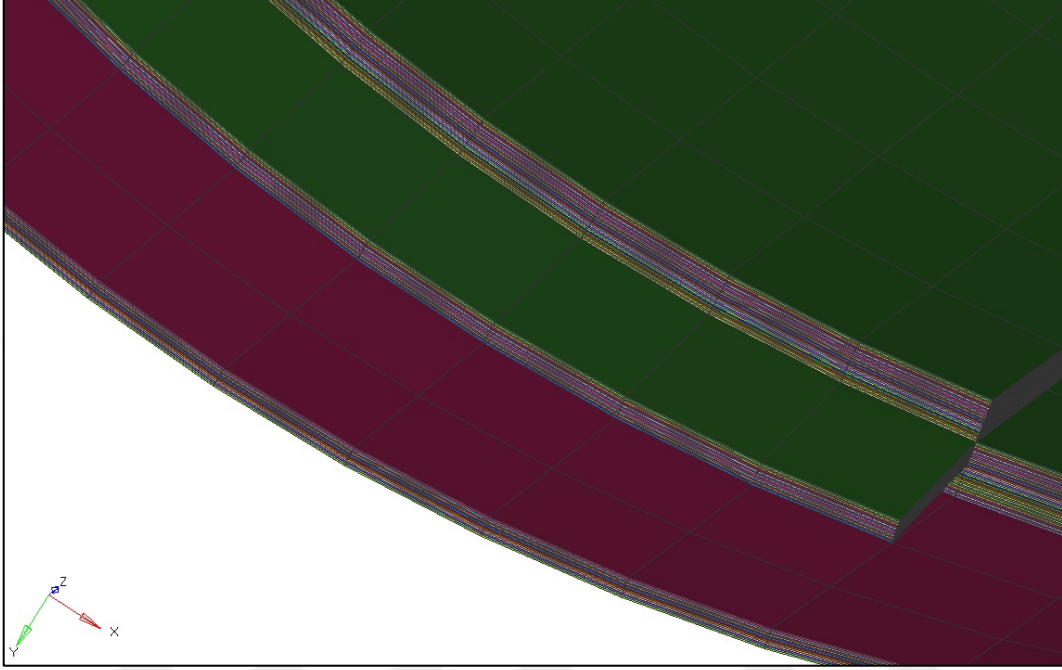
Şekil 9.20 Serbest Boyut Optimizasyonu Sonrası Katmanlar



Şekil 9.21 Boyut Optimizasyonu Sonrası Bazı Katmanların Dağılımı

Boyut optimizasyonu ile serbest boyut optimizasyonu sonrası elde edilen kalın katmanların üretilebilir hale geldiği katmanlar oluşmuştur. Bu katmanlar boyut optimizasyonu ile üretilebilir kalınlıkta katmanlara bölünmüştür. Ancak bu

katmanlar optimizasyon sonucunda dağınık bir şekilde çıkabilmektedir. Bu dağınıklığı, yani boyut optimizasyonu sonucunda elde edilen katmanları elle düzeltip üretilebilir hale getirdikten sonra sıra karıştırma optimizasyonu kısmına gelmiştir.



şekil 9.22 Boyut Optimizasyonu Sonrası Katmanlar

9.5.4 Karıştırma Optimizasyonu

Boyut optimizasyonundan sonra 48 katman oluşturuldu. Bu katların 23' dolgu malzeme katlarıdır ve programın bu dolgu malzemeyi karıştırmasına izin vermemek için hepsini bir katman altında birleştirilmiştir. Karıştırma optimizasyonu, dolgu katmanın laminasyonun ortasında olması gereken kısıtlama ile yapılır. şöyle ki dolgu katman ortada kalacak şekilde kısıtlama yapılmış ve geri kalan fiber katmanların karıştırılması sağlanmıştır. Bu kısımdaki asıl amaç, sadece katman dizilimini değiştirerek daha rijit bir yapı elde etmektir.

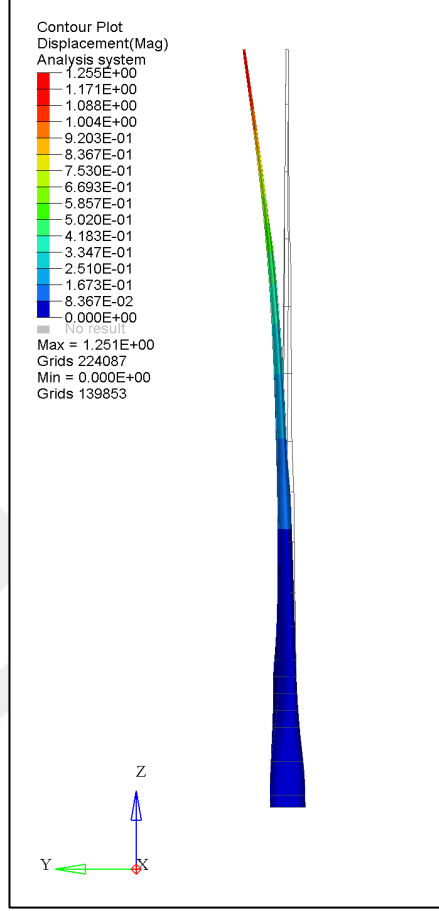
Çizelge 9.11 Karıştırma optimizasyonu adımları

İterasyon 0	İterasyon 1	İterasyon 2	İterasyon 3	İterasyon 4
11101	12101	11401	11401	11401
11201	13101	11303	11303	11303
11301	14101	11302	11302	11302
11302	11101	11301	11301	11301
11303	14201	11201	11201	11201
11401	12301	12101	11101	11101
12101	13301	13101	12101	12101
12301	11201	14101	13101	13101
12401	14301	11101	12301	12301
12402	12401	14201	13301	13301
12403	13401	12301	12404	12404
12404	11301	13301	13404	13404
13101	14401	12404	12403	12403
13301	12402	13404	13403	13403
13401	13402	12403	12402	12402
13402	11302	13403	13402	13402
13403	14402	12402	12401	12401
13404	12403	13402	13401	13401
14101	13403	12401	14201	14201
14201	11303	13401	14101	14101
14301	14403	14403	14403	14403
14401	12404	14402	14402	14402
14402	13404	14401	14401	14401
14403	11401	14001	14301	14301
14404	14404	14404	14404	14404
15101	15101	15101	15101	15101

9.6 Son Kanadın Yapısal Özellikleri

Kanadın nihai ağırlığı, 4260 kg'dır. Tek bir kompozit katın kalınlığı 0,5 mm'dir ve toplam kompozit kalınlık 36 mm'dir. Dolgu malzeme kalınlığı 48 mm'dir ve kanat boyunca sabittir.

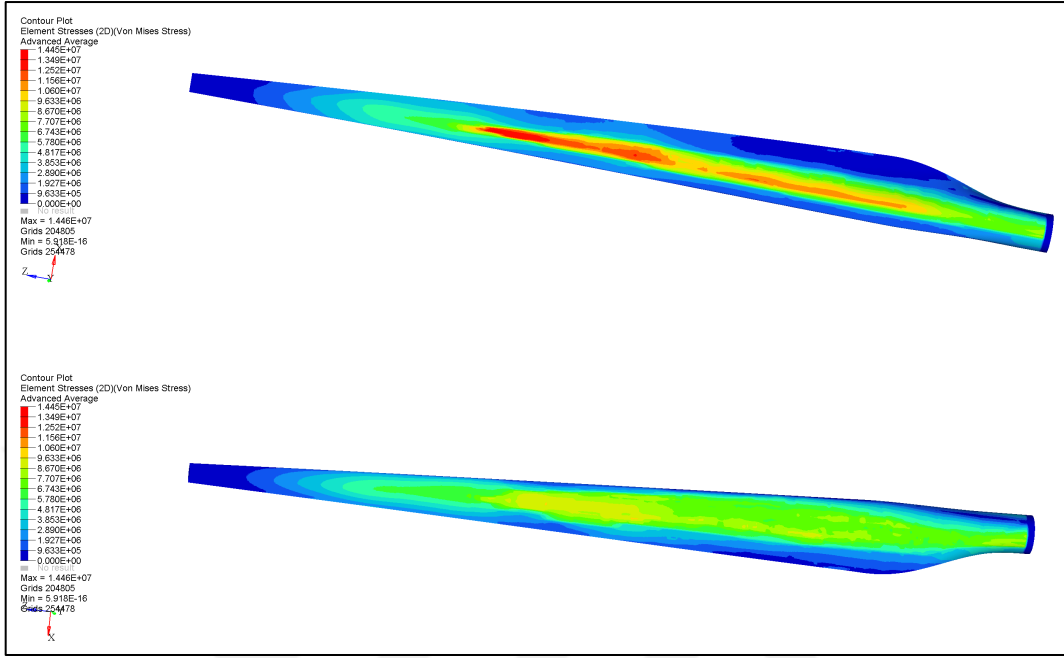
9.6.1 Şekil Değişirme Dağılımı



Şekil 9.23 Kanadın şekil değişimine uğramış hali

Deplasman sonuçları incelendiğinde, kanat ucunda maksimum yer değiştirmenin 1,25 metredir[Şekil 9.18]. Genel olarak rüzgâr türbinlerinde gövde, kuleye yatay düzlemde 4 veya 5 derece açı ile monte edilir. Bu açı, kanat ucunda 2-3 metrelik bir açıklığa neden olur. Buna ek olarak, türbinin burun kısmı kule ile aynı yatay mesafede değildir. Kuleden 2 ila 4 metre uzaklıktadır. Böylece, kanat ucunun türbin üzerinde herhangi bir yük olmadığı durumda kuleden en az 4 metre uzakta olduğu söylenebilir. Bu sebeple 1.25 metre deplasman yeterince düşüktür.

9.6.2 Gerilme Dağılımı



Şekil 9.24 Kanat Üzerindeki Gerilme Dağılımı

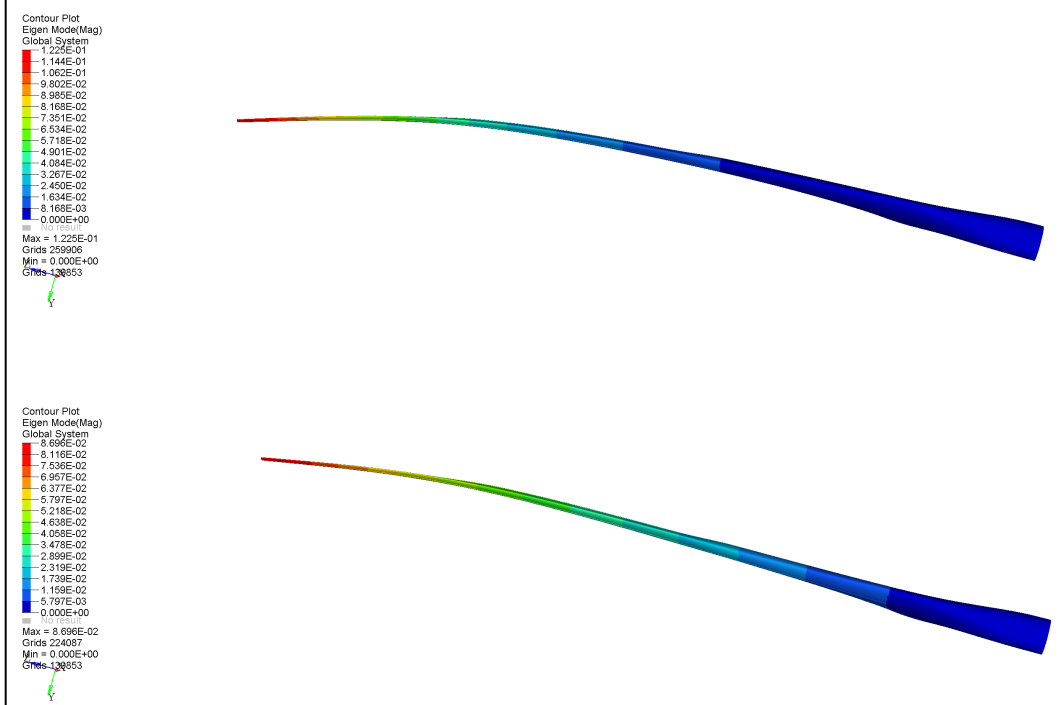
Gerilme dağılımlarından görüldüğü üzere maksimum gerilme 14,5 MPa'dır [Şekil 9.19]. Bu projede kullanılan kompozit malzemenin nihai çekme mukavemeti 1758MPa'dır. Mikro çatlama maksimum çekme değerinin yaklaşık % 10'u civarında gerçekleşir. Bu 175.8MPa'ya karşılık gelir. Yorulma mukavemeti için 1/5'lik bir emniyet faktörü kullanılırsa, elde edilen değer 35 MPa'dır. Gözlenen maksimum stres bu değerden daha azdır. Böylece kanat yorulma açısından da güvenlidir öngörüsü yapılabilir.

9.6.3 Titreşim Biçimleri

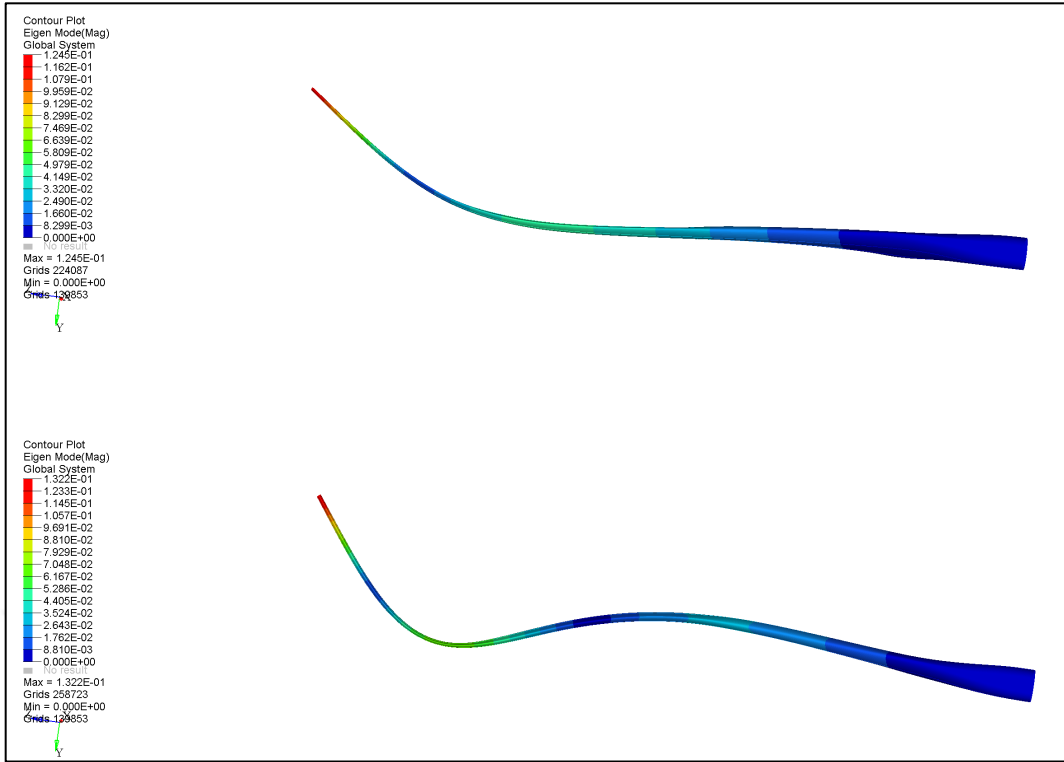
İlk 6 titreşim biçim frekansları aşağıdaki gibidir:

Çizelge 9.12 Titreşim Biçim Frekansları

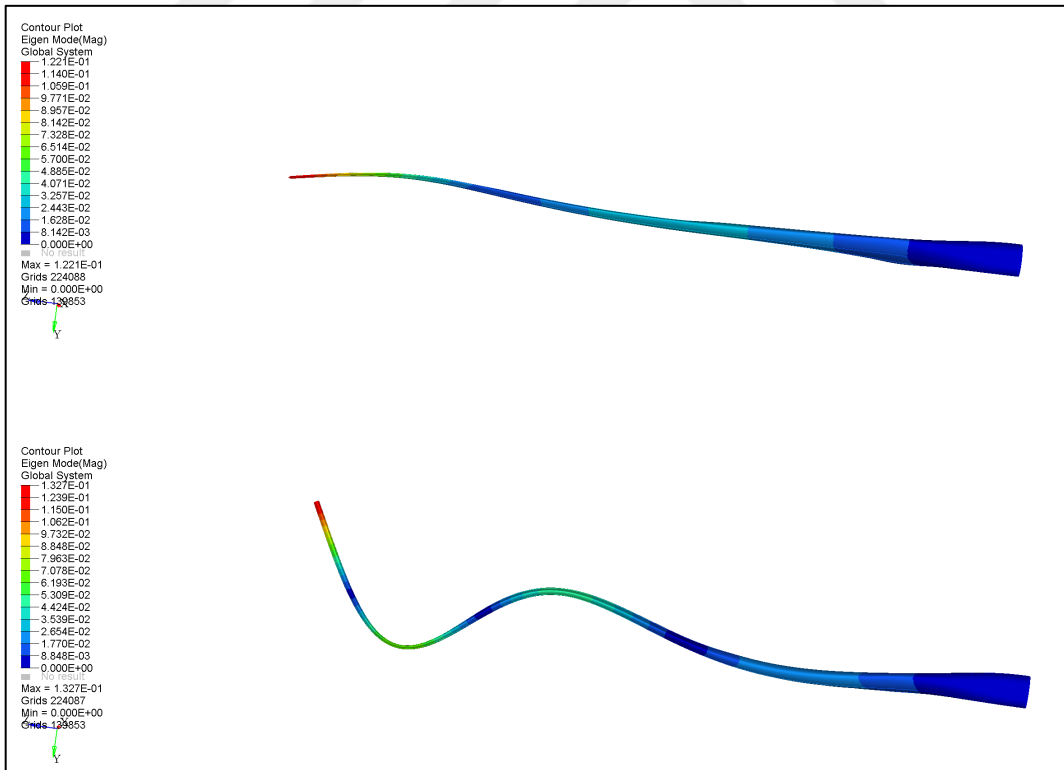
Titreşim Biçim Numaraları	Frekans [Hz]
1	1.34
2	2.64
3	3.46
4	7.56
5	8.56
6	13.49



Şekil 9.25 Birinci ve İkinci Titreşim Biçimi (100 defa büyütülmüş görüntü)



Şekil 9.26 Üçüncü ve Dördüncü Titreşim Biçimi (100 defa büyütülmüş görüntü)



Şekil 9.27 Beşinci ve Altıncı Titreşim Biçimi (100 defa büyütülmüş görüntü)

Titreşim frekansları belirlenirken ve de titreşim biçimleri ortaya çıkartılırken yapılan analizlerde, yapının üzerinde hem rüzgâr yükleri hem rotasyonel yükler hem de ağırlık yükleri etki ettirilmiş ve sonuçlar bu doğrultuda oluşturulmuştur.

Rüzgâr türbin sistemlerinde bazı çalışma frekansları ve katlarından uzak durmak gerekmektedir. Bunun nedeni yapının sağlıklı bir şekilde çalışabilmesini sağlamaktır. Bu çalışma frekanslarının ilki; ilk titreşim frekansıdır, sonrasında bu ilk frekans tek kanat için geçerli olduğu için bu titreşim frekansının 3 katı ve 6 katı değerler dikkate alınmalı, yapının titreşim frekanslarının bu değerlerden uzak kalması gerekmektedir. Bunun gibi yapının ikinci titreşim frekansından, bu frekansın 3 katından ve 6 katından uzak değerlerde çalışmak yapının sağlıklı bir şekilde çalışması için önem arz etmektedir.

Çizelge 9.13 Titreşim Biçim Frekansları ve Uzak Durulması Gereken Değerler

1P	3P	6P
0.2Hz	0.6Hz	1.2Hz
0.43Hz	1.29Hz	2.58Hz

Bu tablo da kanadın çalışma değerleri yani, uzak durulması gereken değerler verilmiştir. Analizler sonucu elde edilen değerler ise bu değerlerden uzaktır ve yapı emniyetlidir öngörüsü yapılabilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu proje de mevcutta bulunan 1-1.5MW mertebelerindeki kanatlardan hem daha hafif hem de ülkemiz koşullarında daha performanslı kanat tasarlanması amaçlandı. Yurt dışında üretilen türbinler ülkemizdeki rüzgâr koşullarından ziyade üretildiklerin yerlerin rüzgâr koşullarına göre tasarlanmıştır. Bu sebeple tarafımızca tasarlanan rüzgâr türbini kanadı düşük rüzgâr hızlarında üretim yapacak şekilde tasarlanmıştır. İlk kanat geometrisini elde etmek için KEM modeli kullanıldı, sonrasında 3 boyutlu bir tasarım programıyla kanadın modellemesi tamamlanmıştır. Kanadın performansını belirlemek için HAD analizleri kullanılıp aerodinamik yükler hesaplanmıştır. Kanadın ağırlığını minimuma düşürmek için kanat modeli üzerinde kompozit optimizasyon işlemi uygulandı. Proje sonunda muadillerinden daha hafif ve düşük hızlarda da elektrik üretimi yapabilen 1.2 MW rüzgâr türbini kanadı elde edildi.

KEM sonuçları ile HAD sonuçları arasındaki hata oranı çok düşüktür ve kabul edilebilir bir seviyededir. Proje sonucunda elde edilen kanadın verileri bu kanadın Türkiye'deki MW üstü pazarda yer alabileceğini, performans vb. verilerinin buna uygun olduğunu belirtmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Schubel, P.J. ve Crossley R.J., (1997). "Wind Turbine Blade Design", *Energies*, 9:3425-3449.
- [2] Spera, D.A. (1998). *Wind Turbine Technology, Fundamental Concept of Wind Turbine Engineering*. American Society of Mechanical Engineering, New York.
- [3] Hau, E. (2012). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Economics*, Springer, London.
- [4] Hansen, M.O.L. (2008). "Aerodynamics and Design of Horizontal-Axis Wind Turbines", *Wind Turbine Technology*, 25:115-149.
- [5] Hepperle, M. (2008). *Numerical Methods, Designing an Airfoil*, University of Stuttgart, Germany.
- [6] Drela, M. (1989). *XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils*. MIT Dept. of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, Massachusetts.
- [7] Mahmuddina, F., Klaraa, S., Sitepua, H. ve Hariyanto, S. (2016). "Airfoil Lift and Drag Extrapolation with Viterna and Montgomerie Method", *The 8th International Conference on Applied Energy*, 2-4 Ağustos 2016.
- [8] Xu, H., Shen, W., Zhu, W., Yang, H. ve Liu, C. (2014). "Aerodynamic Analysis of Trailing Edge Enlarged Wind Turbine Airfoils", *Journal of Physics*, 524:468-478.
- [9] Gundoft, S. (2009). *Wind Turbines*, Publication of Aarhus University, Aarhus.
- [10] Stol, K.A., Zhao, W.X. ve Wright, A.D. (2006), "Individual blade pitch control for the controls advanced research turbine (CART)". *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, 128: 498–505.
- [11] Marten, D. ve Wendler J. (2013). "Weibull Parameters", *Energies*, 11: 356-375.
- [12] Gasch, R., Tvele, J., (2005) *Wind Turbine, Second Edition*, England. (2005).

- [13] Altair,HyperWorks. Composite Laminates
[http://www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/hw12.0/help/hwsolvers/
modeling_composite_materials.htm?toc](http://www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/hw12.0/help/hwsolvers/modeling_composite_materials.htm?toc), 14 Şubat 2015.
- [14] Guide to Composites, <http://www.gurit.com> 11 Mart 2014.
- [15] Hodge, A. J. (2001). "Evaluation of Microcracking" MSFC Engineering Directorate, 301: 278-291.
- [16] Nairn, J.A. (2000). "Matrix Microcracking in Composites", Damage Mechanics of Composite Materials, 2: 33-43.
- [17] Leissa, A.W. (1995). "Buckling and Postbuckling Theory for Laminated Composite Plate", 4: 3-29.
- [18] Niu, M. C. Y. (1992). Composite Airframe Structures, Third Edition, Adastr Engineering LLC, Hong Kong.
- [19] Hull, D. ve Clyne, T.W. (1996). An Introduction to Composite Materials, Cambridge Solid State Science Series, Second Edition, Cambridge.
- [20] Liu, G.R. ve Quek, S.S. (2003). The Finite Element Method A Practical Course, Butterworth – Heinemann, Second Edition, London.
- [21] Chandrupatla, T.R. ve Belegundu, A.D. (2002). Introduction to Finite Elements in Engineering, Pearson, 4 Edition, Pennsylvania.
- [22] Chirstensen, P.W. ve Klarbing, A. (2009). An Introduction to Structural Optimization, Springer 153 Edition, Linköping.

HAD İÇİN GEREKLİ BAZI BİLGİLER

A-1 Reynolds numarası

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

A-2 k-w SST model:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad \text{with } P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

(Wilcox, 2008)

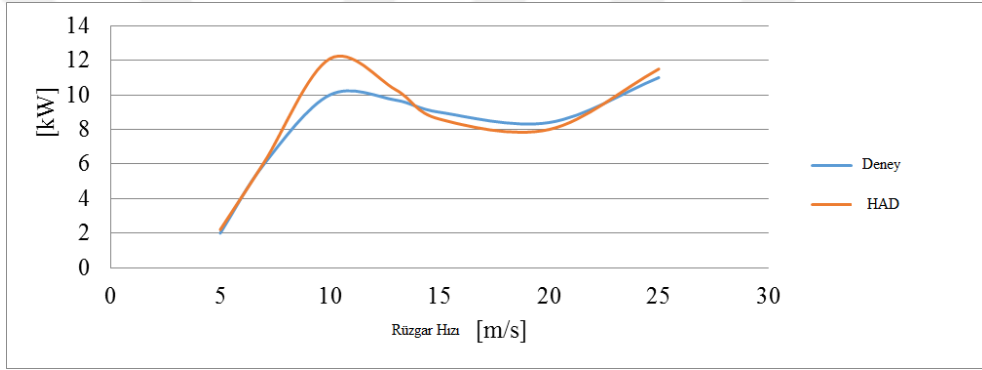
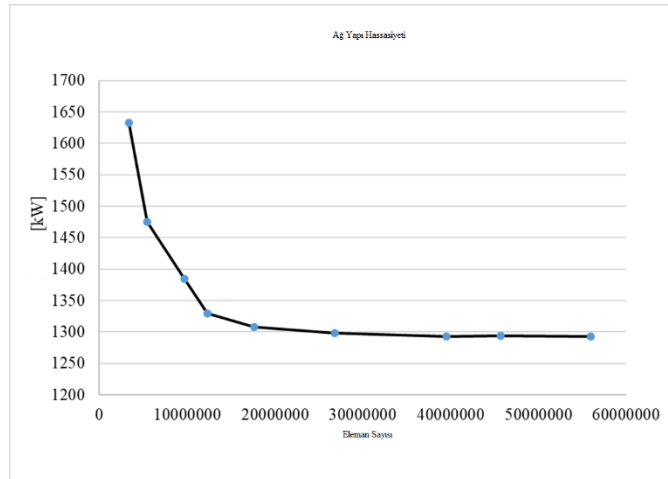
A-3 4th dereceden denklem DU 91-W-2250LM/ AH 93-W-257/ NACA 64618

$$\theta_{new} = -2 \times 10^{-05} \theta^4 + 0.0006 \theta^3 + 0.0585 \theta^2 - 2.925 \theta + 35.49$$

A-4 Spalart-Allmaras model, eddy viskosite:

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = C_{b1} [1 - f_{t2}] \tilde{S} \tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \{ \nabla \cdot [(\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}] + C_{b2} |\nabla \tilde{\nu}|^2 \} - \left[C_{w1} f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1} \Delta U^2$$

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \quad \chi := \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

**B-1 NREL PhaseVI Deney Sonuçları & HAD Model Karşılaştırması NLSS
Mühendislik Çalışmaları****B-2 Ağ Yapı Hassasiyeti**

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Oğuzhan GEDİK
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.08.1989
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : oguzhngedik@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	İstanbul Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Büyükçiftlik Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014 – Halen	NLSS Mühendislik	Tasarım ve Ar-Ge Müdürü
2015 - Halen	EOLO Enerji	Genel Müdür

YAYINLARI

Bildiri

1. Gedik, O., Akdoğan Eker, A. ve Demir, C. (2018). " 1.2 MW Rüzgâr Türbini Kanadının Aerodinamik Optimizasyonu", 3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 4-5 Mayıs 2018, Kocaeli.

